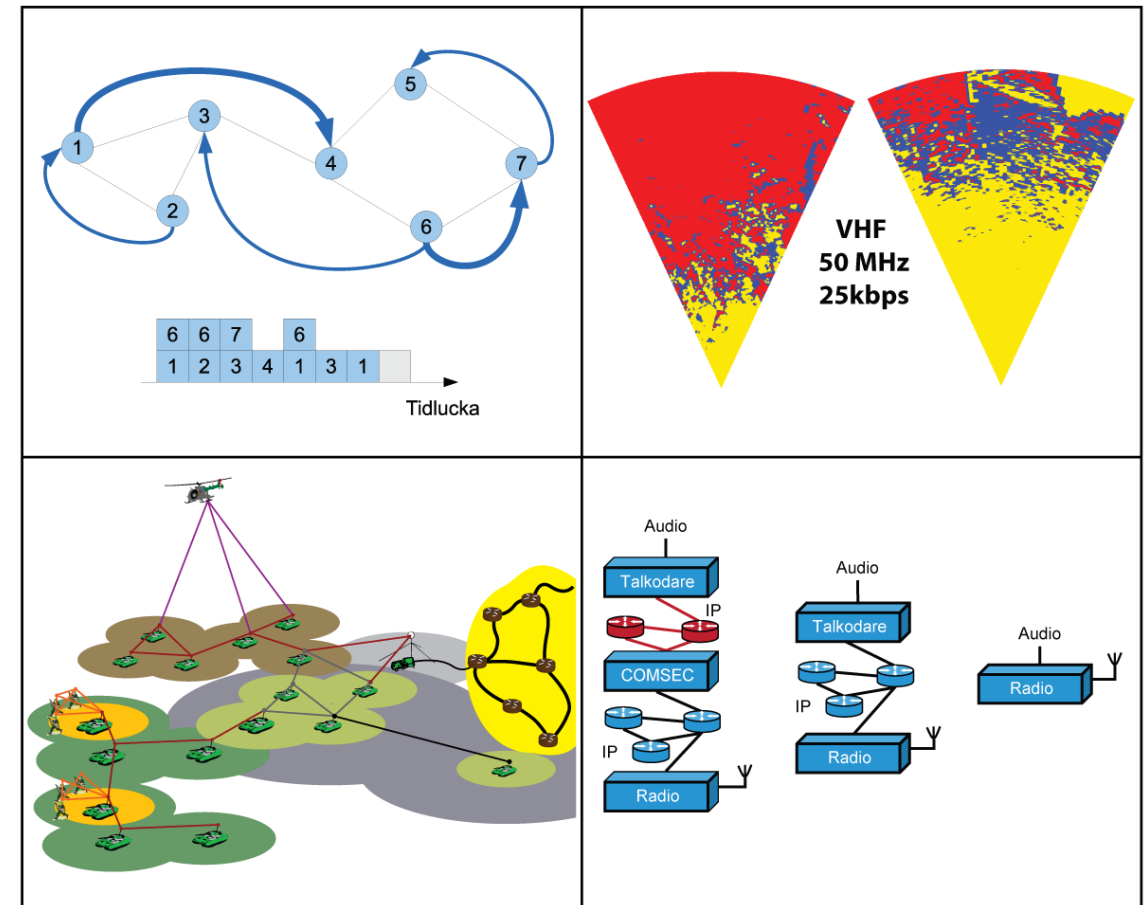


ANDERS HANSSON, JAN NILSSON, ULF STERNER,
JIMMI GRÖNKVIST OCH ERIKA JOHANSSON



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.

Anders Hansson, Jan Nilsson, Ulf Sterner,
Jimmi Grönkvist och Erika Johansson

Kommunikationsnät för tal- och databaserad stridsledning

Slutrapport

Titel	Kommunikationsnät för tal- och databaserad stridsledning Slutrapport
Title	Communication networks for tactical voice and data Final report
Rapportnr / Report No.	FOI-R--3340--SE
Rapporttyp	Användarrapport
Report Type	User Report
Månad / Month	December / December
Utgivningsår / Year	2011
Antal sidor / Pages	38
ISSN	1650-1942
Kund / Customer	FM
Projektnr / Project No.	E53057
Godkänd av / Approved by	Magnus Jändel
FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut	FOI, Swedish Defence Research Agency
Avdelningen för Informationssystem	Information Systems
Box 1165	P.O. Box 1165
581 11 LINKÖPING	SE-581 11 LINKÖPING

Sammanfattning

I rapporten ges en sammanfattning av resultaten i projektet "Kommunikationsnät för tal- och databaserad stridsledning". När olika typer av tjänster ska understödjas i samma nät, behövs lösningar som samtidigt kan hantera olika typer av trafik med ofta motstridiga krav. Gruppsamtal och distribution av positions- och statusinformation är exempel på viktiga taktiska kommunikationstjänster med olika krav på kommunikationsresurser.

Ett viktigt taktiskt krav på moderna mobila kommunikationsnät är att de mobila noderna ska kunna kommunicera även i områden utan täckning från radiomaster eller basstationer. Mobila ad hoc-nät är trådlösa flerhopsnät med förmåga att dynamiskt anpassa sig efter varierande förhållanden. En stor taktisk vinst med ad hoc-nät är att de kan användas oberoende av fast infrastruktur om så krävs, vilket inte är fallet med många kommersiella system för mobil kommunikation. Mobila ad hoc-nät har dock av fundamentalt fysikaliska skäl normalt lägre kapacitet än kommunikationsnät som använder basstationer.

Några av de viktigare resultaten i rapporten är följande. Vi har tagit fram en prioritetsmodell med relativa prioriteter, vilket medför att en tjänsts prioritet beror av kostnaden att realisera den. Detta är särskilt intressant i nät där länkkapaciteten varierar mycket.

Vi visar att för dynamiskt adapterande nätprotokoll, blir kraven på adaptionstid orimligt höga för att stödja tjänster med höga fördröjningskrav. För att stödja sådana tjänster har vi utvärderat en ny alternativ teknik för resursallokering som är föreslagen i litteraturen. Den är robust mot topologiförändringar och kan därmed hantera fördröjningskänslig trafik i mobila situationer. Vi visar med några olika systemexempel att talgrupper är möjliga att realisera över multipla hopp, både i smalbandiga och bredbandiga system. En förutsättning är dock att onödig overhead minimeras.

Nyckelord: ad hoc-nät, prioritet, taltjänster, push-to-talk, broadcast, multicast, heterogena nät.

Abstract

The report summarizes the results of the project "Communication networks for tactical voice and data". When different types of services are supported in the same network, we need solutions that can simultaneously handle different types of traffic with conflicting demands. Voice group calls and distribution of position and status information are examples of important tactical communications services with different requirements for the communication resources.

An important tactical requirement of modern mobile communications is that the mobile nodes should be able to communicate even in areas without coverage from radio masts or base stations. Mobile ad hoc networks are wireless multihop networks with the ability to dynamically adapt to varying conditions. A great tactical benefit of ad hoc networks is that they can be used independent of fixed infrastructure if required, which is not the case with many commercial systems for mobile communications. Mobile ad hoc networks have, however, for fundamental physical reasons usually a lower capacity than networks with base stations.

Some of the important results in the report are as follows. We have developed a priority model with relative priorities, where the priority of a service depends besides its importance also on its resource cost for the network. This is particularly interesting in networks where link capacities vary greatly.

We show that for network protocols with dynamic adaptation, the requirement on the adaptation delay will be unrealistic high in order to support low-latency services. To support such services, we have evaluated a new alternative resource allocation technique that is proposed in the literature. This technique is robust against topology changes and can thus handle delay-sensitive traffic in mobile situations. We show with different system examples that voice groups are possible to realize over multiple hops in both narrowband and wideband systems, provided that unnecessary overhead is minimized.

Keywords: ad hoc networks, prioritet, voice services, push-to-talk, broadcast, multi-cast, heterogenous networks.

Innehållsförteckning

1	Inledning	7
1.1	Taktiska ad hoc-nät	7
1.2	Helt mobila nät jämfört med kommersiell mobil kommunikation .	7
1.3	Projektets inriktning i stort	8
1.4	Frågeställningar	8
1.5	Referensgrupp	8
2	Sammanfattning av projektet	9
2.1	Multipla tjänster i ad hoc-nät	9
2.2	Broadcasttekniker	9
2.3	Heterogena nät	11
2.4	Tal i taktiska mobila nät	11
2.5	Transportprotokoll för ad hoc-nät	12
3	Resurshantering	13
3.1	STDMA - Spatial reuse TDMA	13
3.2	Simuleringsmodell	13
3.3	Slutsatser	14
4	Prioritering – Resursfördelning	15
4.1	Nyttan av en tjänst	15
4.2	Kostnaden för att realisera en tjänst	15
4.3	Relativa prioriteter	16
4.4	Demonstrator	17
4.5	Slutsatser	18
5	Adaptionstid i ad hoc-nät	19
5.1	Förutsättningar	19
5.2	Slutsatser	21
6	Tal i ad-hoc nät	23
6.1	Barrage Relay Networks	24
6.2	Tidluckelängd	25
6.3	Fördröjningsestimering från mun till öra	25
6.4	Systemexempel med prestandaberäkningar	26
6.4.1	Exempel 1: Traditionell IP-lösning	27
6.4.2	Exempel 2: Traditionell IP-lösning med sammanslagna paket .	28
6.4.3	Exempel 3: Minimal overhead och extern talkodare	29
6.4.4	Exempel 4: Minimal overhead med sammanslagna paket och extern talkodare	30
6.5	Slutsatser	31

7	WOLF	33
7.1	Nätverkslagret	33
7.2	MAC-lagret	34
7.3	Fysiska lagret	35
	Referenser	37

1 Inledning

Den här rapporten sammanfattar FOI-projektet "Kommunikationsnät för tal- och databaserad stridsledning" (KomStril). Projektet är ett treårigt projekt inom ramen för Försvarmaktens samlingsbeställning FoT (Försvarmaktens Forskning och Teknikutveckling) och har genomförts år 2009-2011.

1.1 Taktiska ad hoc-nät

Ett viktigt taktiskt krav på moderna mobila kommunikationsnät är att de mobila noderna ska kunna kommunicera även i områden utan täckning från radiomaster eller basstationer. Mobila ad hoc-nät är trådlösa flerhopsnät med förmåga att dynamiskt anpassa sig efter varierande förhållanden. En stor taktisk vinst med ad hoc-nät är att de kan användas oberoende av 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 det pågår även flera internationella projekt med uppgift att ta fram handburna och fordonsburna taktiska mobila ad hoc-nät.

1.2 Helt mobila nät jämfört med kommersiell mobil kommunikation

Mobila ad hoc-nät har av fundamentalt fysikaliska skäl normalt lägre kapacitet än kommersiella mobiltelefoninät med basstationer. Trenden med till synes ständigt ökande kapacitet i de kommersiella kommunikationsnäten beror till stor del på att det är möjligt att placera basstationer tätare i områden med många användare. Fyra förutsättningar för en hög tillgänglig kapacitet i ett basstationsnät är att:

- mobilen är nära en basstation,
- det finns en anslutning med hög kapacitet från basstationen till det fasta nätet
- basstationen har god tillgång till effekt för transmission och beräkningar,
- samt att basstationen har en högt placerad antenn.

I ett helt mobilt radionät saknas ofta flera av dessa förutsättningar. Kapaciteten är därför mer begränsad och det är viktigt att radionätet kan hantera tillgängliga resurser effektivt.

1.3 Projektets inriktning i stort

Framtida ledningstjänster förväntas bli alltmer databaserade, även om talkommunikation troligtvis kommer att vara högt prioriterad under en lång tid framöver. Att i ett ad hoc-nät upprätthålla tillräcklig tjänstekvalitet i svåra taktiska situationer är en utmaning. Olika stridsledningstjänster ställer olika krav för att effektivt utnyttja befintliga kommunikationsresurser. Eftersom flera typer av tjänster ska understödjas i samma nät, behövs lösningar som samtidigt kan hantera olika typer av trafik med ofta motstridiga krav. Gruppsamtal och distribution av positions- och statusinformation är exempel på viktiga taktiska kommunikationstjänster med olika krav på kommunikationsresurser. Syftet med projektet var att analysera, prova och förorda metoder för att hantera många olika tjänster i mobila ad hoc-nät och i heterogena nät (detta inkluderar både mobila och fasta nät).

1.4 Frågeställningar

- Kommunikation för tal- respektive databaserad stridsledning ställer delvis motstridiga krav på kommunikationsprotokollen i nätet. Hur ska detta hanteras? Se kapitel 2.1 och 2.4.
- Hur ska nätprotokollen utformas för att fördela resurser mellan användarna i nätet? Se kapitel 2.1.
- Hur kan man distribuera stridsledningsinformation till en eller flera användare snabbt och effektivt? Se kapitel 2.2.
- Vilka problem uppstår när stridsledningstjänster utnyttjas över heterogena nät? Se kapitel 2.3.

1.5 Referensgrupp

Projektets referensgrupp har bestått av Magnus Grennvall (HKV), Henrik Strand (HKV), Lars Behm (MSS), Magnus Hallberg (MSS) och Jörgen Andersson-Strand (HKV), Thorbjörn Ericson (FMV) och Ola Winberg (FMV).

2 Sammanfattning av projektet

Det här kapitlet sammanfattar projektets resultat och ger samtidigt ett sammandrag av kapitel 3-7, som innehåller fördjupad information om några av projektets problemområden.

2.1 Multipla tjänster i ad hoc-nät

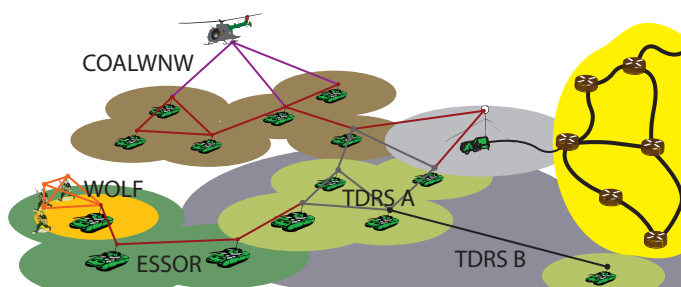
För att kunna hantera flera olika typer av tjänster i ett dynamiskt mobilt radionät krävs att användningen av den tillgängliga och begränsade nätresursen anpassas efter tjänsternas behov och prioritet. Viktiga taktiska tjänster måste kunna fungera effektivt tillsammans. Detta är viktigt för designen av vågformerna i TDRS (Taktiskt Dataradiosystem) och även för utformningen av internationella vågformer, som ESSOR (European Secure Software defined Radio), COALWNW (Coalition Wideband Networking Waveform) och WOLF (Wireless rObust Link for urban Force operations). En viktig frågeställning i projektet har varit hur taktiska tjänster, med ibland motstridiga krav, kan hanteras i ett ad hoc-nät.

Under projektets första år beskrev vi några av de taktiska mobila kommunikationsnät som håller på att utvecklas nationellt och internationellt, vanliga taktiska användarkrav samt konsekvenser och frågeställningar som dessa leder till [1]. Vi identifierade tre viktiga frågeställningar för vidare utvärdering. Den första frågeställningen var **prioritetsbaserad resursfördelning** inom ad hoc-nät. Eftersom resurserna är begränsade i mobila taktiska nät, vill man fördela resurserna till de tjänster som gör att användarnytan maximeras, se kapitel 3 och kapitel 4. Den andra frågeställningen gäller **broadcasttekniker** i nät med variabla datatakt. En stor del av trafiken i taktiska nät är multicast (en till många) eller broadcast (en till alla) och det finns ett tydligt behov av att kunna effektivisera distributionen av sådan trafik. Den tredje frågeställningen gäller interaktioner mellan vågformer i **heterogena nät**. Kommande generationers radiosystem kommer samtidigt att hantera multipla vågformer. Några exempel på möjliga framtida radiosystem är de internationella projekten ESSOR, WOLF och COALWNW, se figur 2.1. I kapitel 7 ges en sammanfattning av EDA-projektet WOLF, som under 2010 levererade designförslag till ett handburet radiosystem för urban miljö. FoT-projektet Projektet KomStril har medfinansierat WOLF vilket har möjliggjort för FOI och Försvarsmakten att utbyta idéer och erfarenheter med forskare inom WOLF-konsortiet.

Under projektets senare del har vi fokuserat på frågan hur **säkert tal** kan hanteras i flerhopsnät. Vi har också under projektets gång utvecklat en simuleringsmiljö för att kunna utvärdera prestanda i mobila ad hoc-nät [2].

2.2 Broadcasttekniker

I [3, 4] ger vi en översiktlig beskrivning av broadcast och multicast, med fokus på hur adaptiv datatakt kan utnyttjas till detta. Med broadcast i ad hoc-nät menar vi att en nod



Figur 2.1: Nästa generations radiosystem behöver hantera multipla vågformer såsom till exempel TDRS A, TDRS B, ESSOR, WOLF, och COALWNW.

sänder (via enkelhopp eller flerhopp) till alla andra noder i ad hoc-nätet, multicast innebär att en nod 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 lösningar behövs. Med adaptiv dataakt kan man dynamiskt byta räckvidd mot kapacitet på länkarna i ad hoc-nätet; en hög kapacitet, hög dataakt, ger kortare räckvidd medan en lägre kapacitet (dataakt) ger en längre räckvidd. 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 (och därigenom längre räckvidd på vissa länkar). Detta är relativt rättframt att tillämpa i nät där mobiliteten hanteras med basstationer, men är mer komplext för ad hoc-nät. Fyra metoder för att utnyttja adaptiv dataakt i taktiska ad hoc-nät med broadcast-trafik har utvärderats.

Sändningstiden minskar vanligtvis med ökande datahastighet på en länk i nätet. I [5] visar vi att så inte är fallet för broadcast i ett ad hoc-nät, eftersom det totala antalet sändningar som krävs för att vidarebefordra paketen ut i nätet kan växa med ökad datahastighet på grund av minskad räckvidd. Det är därför svårt att välja en lämplig dataakt i ett ad hoc-nät. Vi föreslår i [5] en ny metod som är teoretiskt optimalt under vissa förenklade villkor. Den ger bättre prestanda jämfört med andra metoder för att välja dataakt.

Nätkodning är en relativt ny teknik med potential att minska behovet av nätverksresurser. Nätkodning innebär att i stället för att vidarebefordra paketen ett i taget, så vidarebefordrar noderna olika matematiska kombinationer (i enklaste fallet summor) av tidigare mottagna paket. Mottagande noder löser ekvationer av mottagna kombinationer för att erhålla de ursprungliga paketen. Under vissa förutsättningar krävs då färre sändningar för att skicka en mängd paket jämfört med traditionell teknik, där paketen sänds var för sig. Multipoint relay flooding är en känd teknik för effektiv hantering av

broadcast-trafik. Vi har skrivit ett konferensbidrag, [6], baserat på tidigare resultat [7], som visar att nätkodning ytterligare kan minska antalet sändningar som behövs för att nå alla noder i nätet med multipoint relay flooding och som även visar hur nätkodningen beror av topologin i nätet.

2.3 Heterogena nät

Ett heterogent taktiskt kommunikationsnät består av olika typer av radionoder: till exempel fasta, handburna och fordonsburna. En radionod kan samtidigt ingå i flera olika nät och ha tillgång till ett flertal vågformer med stor variation i kapacitet och räckvidd. Som exempel kan nämnas radiolänk, TDRS A- och B-vågform eller de framtida taktiska vågformer som tas fram inom ESSOR, COALWNW och WOLF. Hur olika mobila nät ska fungera ihop och anslutas till fasta nät innehåller flera öppna frågeställningar. I [8] beskriver vi möjligheter och utmaningar när olika radio- och kommunikationssystem kopplas samman, samt något om de tekniker som kan användas för att utnyttja den fulla potentialen i ett heterogent kommunikations- och ledningssystem. Rapporten beskriver principer för att välja en bra väg genom näten från sändare till mottagare. Detta är viktigt, både för att kommunikationsnätet ska fungera effektivt och för att hantera tjänster som kräver höga datataxter. Dessutom behandlas i [8] olika tekniker för mobilitetshantering samt frågeställningar kring tjänstekvalitet i heterogena nät. Till exempel innebär behovet av att använda flera tjänster över heterogena nät att principer för tjänstekvalitet i de enskilda näten måste samordnas på en högre nivå. Rapporten innehåller även ett appendix som mer ingående beskriver relevanta tekniker och protokoll.

2.4 Tal i taktiska mobila nät

Huvudfrågan i [9] är om tal- och datakommunikation bör implementeras i en gemensam vågform eller i två separata vågformer. Det går inte att ge ett enkelt svar på den frågan, men vi tar upp för- och nackdelar med de två alternativen. Det ena konceptet vi har utvärderat innebär att talkommunikation hanteras i ett separat smalbandigt flerhopsnät på VHF-bandet, med övrig datakommunikation i ett bredbandigt flerhopsnät på UHF-bandet. Det andra konceptet innebär att all kommunikation, även tal, hanteras i den bredbandiga UHF-vågformen. Fokus ligger på realisering av talkommunikation för grupper eftersom den tjänsten ställer speciella krav på utformningen av kommunikationssystemet. Vi konstaterar att det går bra att realisera tal över flera hopp med både bredbandiga och smalbandiga vågformer. Med några räckviddsexempel visar vi att smalbandiga vågformer har längre räckvidd per hopp. Den bredbandiga vågformen kräver fler hopp över mellanliggande noder för att ge en bra räckvidd.

Resultaten i [10] indikerar att tjänster med högre fördröjningskrav än ad hoc-nätets adaptationstid behöver en mycket stor andel av nätets resurser vid hög trafikbelastning, vilket skulle innebära att taltjänster är kostsamma att hantera med adaptiva ad hoc-nätsprotokoll. I kapitel 6 visar vi med några olika systemexempel att talgrupper ändå verkar möjligt att realisera över multipla hopp, både i smalbandiga och bredbandiga sy-

stem. En förutsättning för detta är att resursallokering och val av rutter inte behöver adapteras efter trafik- och topologiförändringar i nätet. Det är också viktigt att minimera overhead i alla funktioner som involveras (talkodare, krypto och övriga nätfunktioner).

2.5 Transportprotokoll för ad hoc-nät

Ett examensarbete [11], har genomförts i samarbete med Karlstads Universitet (KAU) och KomStril, inom projektet "Enhanced Application Performance in Future Wireless Meshed Network" (finansierat av KK-stiftelsen).

Transmission Control Protocol (TCP) är ett protokoll för dataöverföring som används för en stor del av all kommunikation över Internet. Syftet med TCP är att möjliggöra en tillförlitlig ström av paket mellan två datorer och används för exempelvis HTTP, FTP och e-post. Examensarbetet behandlar TCP för ad hoc-nät och innefattar en gedigen litteraturstudie som beskriver 28 olika transportprotokoll för flerhopsnät. Tre TCP-protokoll: TCP-ELFN (Explicit Link Failure Notification), New Reno samt Westwood+, valdes ut för utvärdering i mobila nät med TCP-flöden och bakgrundstrafik. Utvärderingen har gjorts i nätsimulatorens NS-2, med OLSR och AODV som routingprotokoll och TDMA och 802.11 som MAC-protokoll. Simuleringsresultaten visar att TCP-ELFN presterar bäst eftersom det utnyttjar information från routingprotokollet i nätet. TCP-ELFN kan tillfälligt stoppa TCP-överföringen när en rutt bryts och återuppta överföringen när en ny rutt är tillgänglig. New Reno och Westwood+ tar inte hänsyn till routinginformation utan styrs istället av information om paketförluster och fördröjning för TCP-flödet.

3 Resurshantering

En viktig designfråga i ett mobilt radionät är valet av accessprotokoll. Accessprotokollet avgör när en viss nod får sända samt på vilket sätt sändningen ska ske för att inte störa närliggande noders kommunikation. I ett radionät med många mobila noder är detta en relativt komplex frågeställning.

Ett accessprotokoll som är lämpat för mobila radionät är Time Division Multiple Access (TDMA) då detta ger goda möjligheter både till broadcast-sändningar och till att upprätthålla vissa tjänstekvalitetsgarantier (QoS).

3.1 STDMA - Spatial reuse TDMA

I ett enkelt TDMA-protokoll delas tiden in i tidluckor som fördelas jämt mellan noderna. Ofta varierar dock trafikbelastningen mellan noder. Dels på grund av att olika noder producerar olika mycket trafik, dels på grund av att mängden trafik som noderna behöver reläa varierar. Mera avancerade TDMA-protokoll stödjer därför ofta någon typ av trafikutjämning där noder med mycket trafik kan tilldelas extra tidluckor.

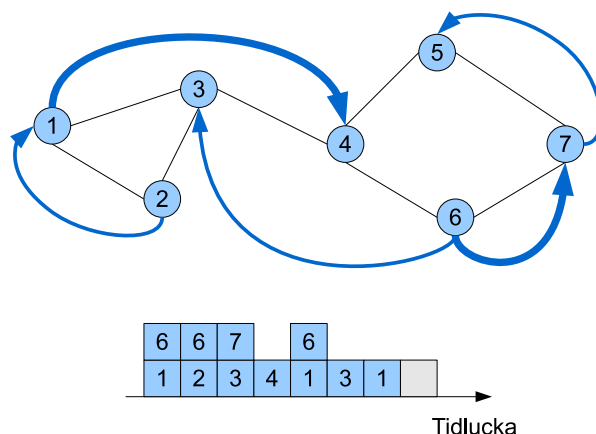
För att öka kapaciteten i nätet så kan också spatiell återvinning användas. Detta innebär att flera noder kan använda samma tidlucka om noderna är så långt ifrån varandra att de inte orsakar interferenser i de enheter som ska ta emot respektive sändning. I figur 3.1 visas ett exempel på hur tidluckorna kan fördelas av ett trafikadaptivt STDMA-protokoll. De blå pilarna representerar trafikflödena i nätet. En tunn pil representerar ett flöde med behov av en tidlucka per ram medan en tjock pil representerar ett flöde med behov av två tidluckor per ram. Då ramen inte utnyttjas fullt ut av de aktuella flödena blir en tidlucka tom.

För att protokollet ska kunna utnyttja mera avancerade tekniker som trafikutjämning och spatiell återanvändning, krävs mer kännedom om nätets topologi och trafik än vad som behövs för ett enkelt TDMA-protokoll. Detta innebär att mängden kontrolltrafik som krävs ökar. En avvägning måste därför alltid göras mellan optimaliteten i protokollet och mängden kontrolltrafik.

3.2 Simuleringsmodell

För att kunna stödja FM i valet av vilka tekniker vars införande bör premieras i det taktiska näten finns ett behov av att kunna testa olika tekniker i en nätverkssimulator. För att på ett kostnadseffektivt sätt kunna utvärdera olika tekniker med nära koppling till accessprotokollet har vi bedömt att en simuleringsmodell av ett generiskt STDMA-protokoll behövs.

Idag saknas ett öppet publicerat STDMA-protokoll som kan anses vara tillräckligt generiskt för att fungera som grund för utvärdering av olika tekniker. FOI har därför utvecklat ett eget STDMA-protokoll. Fokus för denna utveckling har varit dels att nya tekniker enkelt ska kunna införas i protokollet, dels att olika parametrar som styr



Figur 3.1: Exempel på hur tidluckorna kan fördelas i ett trafikadaptivt STMDA-protokol med 8 tidluckor per ram. De blå pilarna representerar trafikflödena i nätet.

protokollet, t.ex. mängden kontrolltrafik som sänds, enkelt ska kunna varieras.

FOIs STDMA-protokoll är i nuläget färdigimplementerat. En omfattande testning mot enkla scenarier har också utförts. Som nästa steg avser vi genomföra en mera fullständig utvärdering mot avancerade scenarier.

3.3 Slutsatser

En avgörande fråga för hur effektivt ett STDMA-protokoll kommer att vara är hur aktualiteten och omfattningen hos topologi- och trafikinformationen påverkar protokollets förmåga att skapa effektiva sändningsscheman. Ju mer aktuell och mer omfattande topologi- och trafikinformationen är, ju effektivare sändningsscheman kan protokollet normalt sätt generera. Tyvärr innebär mer information in till protokollet också att mer information måste spridas i nätet, denna trafik tar kapacitet som då inte kan användas för användartrafik. Kostnaden i kapacitet för att sprida informationen måste därmed vägas mot nyttan av att ha informationen.

Både frågan vilken information som ska spridas samt frågan när eller hur ofta informationen ska spridas får idag betraktas som relativt utforskade. Vidare behöver de designmässiga aspekterna av införandet av variabel datatakt på länkarna i nät med mycket multicasttrafik studeras. Speciellt prioriterat är hur olika principiella lösningar för estimering av datatakten påverkar systemets prestanda. På samma sätt som ovan gäller att bättre estimat ger potential till högre kapacitet. Bra länkestimat i fallet med multicasttrafik är dock en utmaning då inte bara en enskild länk utan en hel grupp länkar måste beaktas.

4 Prioritering – Resursfördelning

En central fråga i ett taktiskt radionät är hur radioresurserna ska fördelas mellan användarna. Att tilldela de olika tjänsterna en fix prioritet där tjänsten med högst prioritet alltid har företräde till resurser kan visserligen vara en fungerade lösning men behöver inte vara den mest effektiva.

Vid fördelningen av resurserna är det viktigt att systemet beaktas ur ett helhetsperspektiv. Att ta hänsyn till tjänsternas prioritet i till exempel kösystemet är viktigt men sällan tillräckligt. Särskilt gäller detta i system med dynamisk resurshantering där resurser regionalt kan flyttas mellan noder, se [10].

Inom ramen för projektet har därför alternativa prioriteringsmetoder studerats. Dessa metoder bygger på att flera aspekter hos tjänsten, såsom kapacitetskrav och nytta, beaktas när beslut tas om vilken tjänst som ska tilldelas en viss resurs.

4.1 Nyttan av en tjänst

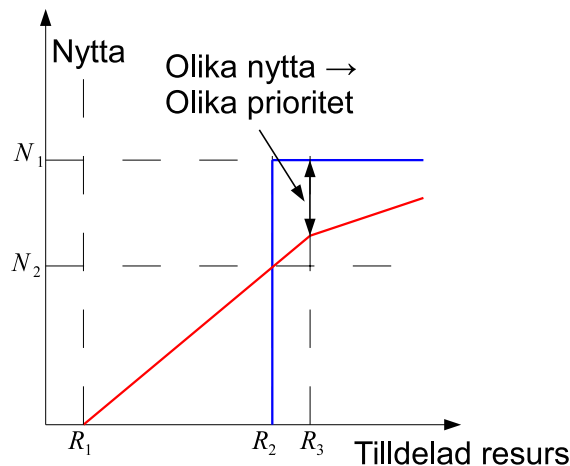
För att avgöra vilka tjänster som ska tilldelas resurser i ett resursbegränsat system väljer vi här att tilldela varje tjänst ett relativt värde, N , som återspeglar nyttan av tjänsten. Då en tjänsts nytta är beroende av den resursmängd, R , som tilldelas tjänsten är N inte ett fix värde utan en funktion av den tilldelade resursmängden. För en tjänst som kräver en viss resurs för att fungera innebär detta att N är noll för lägre resursmängder. Om tjänsten inte vinner något på tillgång till ytterligare resurser förblir N konstant. För en tjänst som alltid vinner på mera resurser så växer N med ökande resurser.

I figur 4.1 har vi illustrerat nyttan, N , av två tjänster som funktion av den tilldelade resursen, R . Är den tilldelade resursen mindre än R_1 antas att ingen av tjänsterna fungerar. Om den tilldelade resursen är över R_1 fungerar den röda tjänsten. Värdet av den röda tjänsten antas här växa relativt linjärt då ytterligare resurser tillförs. Efter att den tilldelade resursen passerat R_3 antas dock nyttan växa allt långsammare då mera resurser tillförs. När den tilldelade resursen är över R_2 kan den blå tjänsten fungera. Nyttan av den blåa tjänsten är dock konstant även om mera resurser tillförs.

4.2 Kostnaden för att realisera en tjänst

För att vid resursfördelningen kunna ta hänsyn till systemets kostnad att hantera en viss tjänst definierar vi kostnaden, K , för en tjänst som sändningstiden per sekund som tjänsten utnyttjar.

I ett system med konstant datatakt blir kostnaden att realisera en tjänst över ett hopp proportionell mot den datatakt som tjänsten kräver, ju högre datatakt ju högre kostnad. Har systemet flera datatakt blir kostnaden för att realisera en tjänst över ett hopp omvänt proportionell mot den använda länkens datatakt. Ju högre datatakt den använda länken har, ju lägre kostnad att realisera tjänsten. Kostnaden för ett hopp, C ,



Figur 4.1: Nyttan, N , för två tjänster som funktion av tilldelade resurs, R .

kan vi således estimera till

$$C = \frac{K}{D}$$

där D är datatakten på den använda länken.

Det hela försvåras om tjänsten nyttjar flera hopp. En möjlig metod är att summera kostnaden för varje ingående hopp, detta är dock inte ett givet val. Dels är det inte självklart att långa rutter ska viktas med den totala sändningstiden då delsändningar tillräckligt långt ifrån varandra kan dela på kanalresurserna genom spatiell återanvändning. Dels är det inte givet att rutter över flera hopp överhuvudtaget ska viktas med kostnaden för hela eller delar av ruten då detta leder till att korta rutter premieras över långa. Exakt hur viktningen ska ske är en fråga för framtida studier.

4.3 Relativa prioriteter

För att avgöra vilken tjänst som har högst prioritet beaktar vi kvoten mellan nyttan av tjänsten, N , och kostnaden att realisera tjänsten, C ,

$$\frac{N}{C} = \frac{N \cdot D}{K},$$

där likheten gäller för fallet med ett hop. Som ett värde på en tjänsts prioritet, P , utnyttjar vi det maximala värdet av kvoten sett över de resursmängder som tjänsten skulle kunna tilldelas.

Studerar vi figur 4.1 får vi att om den tillgängliga resursen är mindre än R_1 har båda tjänsterna prioritet 0. Mellan R_1 och R_2 har den röda tjänsten högst prioritet. Om den tillgängliga kapaciteten är större än R_2 får den blå tjänsten högst prioritet.

En fördel med en prioritetsmodell med relativa prioriteter är att en tjänsts prioritet kan göras beroende av kostnaden att realisera den. Detta är särskilt intressant i nät där länkkapaciteten varierar kraftigt och kostnaden för att realisera en tjänst därigenom kan variera mycket.

I ett nät med fasta prioriteter kommer nätet att försöka upprätthålla ett så likartat tjänsteutbud för noderna som möjligt. Om enskilda noder har avsevärt sämre kommunikationsresurser än andra kommer nätet att försöka omfördela sina resurser så att tjänsteutbudet fortsatt är likartat. Detta riskerar dock att leda till att en oproportionerligt stor resursandel läggs på ett fåtal noder, samtidigt som alla noder får ett högst begränsat tjänsteutbud.

I ett system med relativa prioriteter erbjuds bättre möjlighet att styra tjänsteutbudet. Vi kan exempelvis låta noder som har kraftigt begränsade kommunikationsresurser få ett mera begränsat tjänsteutbud samtidigt som övriga noders tjänsteutbud är relativt opåverkat.

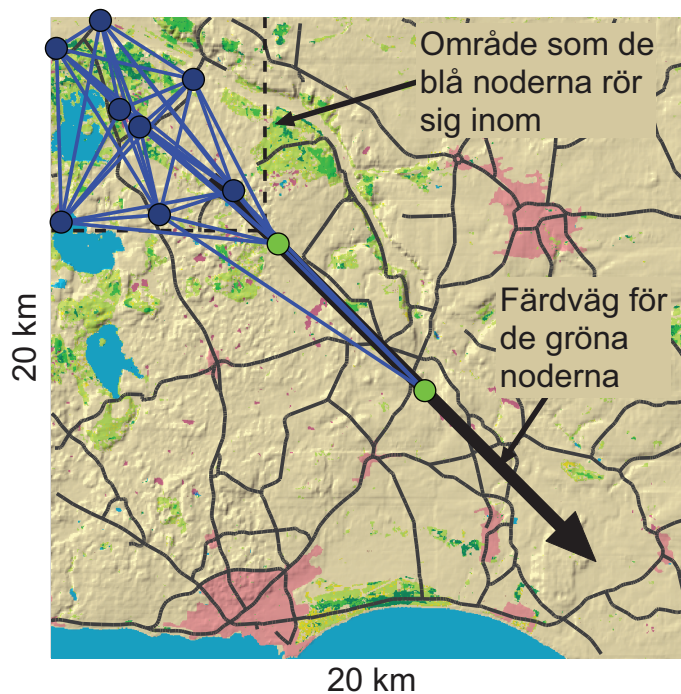
4.4 Demonstrator

För att visualisera effekten av olika prioriteringsmetoder har en mjukvarudemonstrator utvecklats inom projektet. I figur 4.2 illustreras nätets utseende drygt 1/3 in i det studerade scenariot. Scenariot består av 10 noder som initialt befinner sig i fyrkanten i det övre vänstra delen av kartan. De gröna noderna börjar sedan färdas mot det nedre högra hörnet av kartan medan de övriga rör sig inom den ursprungliga fyrkanten. Redan i initialläget är systemet tungt nedlastat av ett antal unicast sessioner.

För att illustrera effekten av olika prioriteringssystem har vi valt att låta en session mellan den bortersta gröna noden och en nod bland kvarvarande noderna ha högre prioritet än övriga sessionerna. I takt med att avståndet till de övriga noderna växer, försämras kommunikationsförhållandena allt mera till de noder som färdas bort från startområdet. De försämrade kommunikationsförhållandena leder till att länkarna använder allt lägre datatakter samtidigt som rutterna blir allt längre sett till antal hopp.

I ett system med fix prioritet kommer systemet i det längsta att försöka omfördela allt mer resurser till den högprioriterade sessionen på bekostnad av de lågprioriterade sessionerna. I det använda scenariot leder detta till att de samtliga lågprioriterade sessioner straffas hårt för att den enda högprioriterade sessionen ska fungera när de gröna noderna avlägsnar sig från de övriga noderna.

I ett system med relativa prioriteter kommer systemet initialt att uppföra sig på samma sätt som systemet med fixa prioriteter. I takt med att kostnaden för att realisera den högprioriterade tjänsten ökar, kommer dock dess prioritet att minska. Detta leder till att den initialt högprioriterade tjänsten inte får några resurser när den blir alltför dyr att realisera samtidigt som de initialt lågprioriterade tjänsterna får behålla sina resurser.



Figur 4.2: Ögonblicksbild av nätet som använts i demonstratorn.

4.5 Slutsatser

Vid införande av relativa prioriteter i ett radionät med dynamisk resursallokering behöver hänsyn ofta tas på flera nivåer. Lokalt i noderna behöver kösystemen kunna hantera relativa prioriteter. Detta kan kräva vissa modifieringar då kösystem ofta är designade för ett fixt antal diskreta prioritetsnivåer medan den ovan föreslagna modellen genererar ett kontinuum av nivåer.

Vidare behöver resursallokeringen ta hänsyn till prioriteterna när de tillgängliga resurserna fördelas mellan noderna. Då resursallokeringen oftast är en regional process i mobila radionät finns det dock inga garantier för att en tjänst som fått resurser i en del av nätet även tilldelas resurser längre fram efter vägen. Även om applikationen kopplar ner sig och allokerade resurser frigörs vid en misslyckad allokering, kommer misslyckandet att innebära en kostnad för systemet.

Om problemet med partiellt uppkopplade applikationer blir stort kan det vara av intresse att införa någon typ av tillträdeskontroll som redan i källnoden avgör om det är troligt att systemet kan hantera den nya applikationen. Då en sådan kontroll kostar kapacitet i sig är det dock inte givet vilket som är bäst.

5 Adaptionstid i ad hoc-nät

Taktiska ad hoc nät är dynamiska vilket innebär att de hela tiden behöver adaptera sig till en föränderlig situation och miljö. Både topologi och trafikförändringar kräver att protokoll uppdateras. I detta kapitel sammanfattas resultaten från en undersökning av hur olika applikationer påverkas av tiden det tar att uppdatera protokollen i ett TDMA baserat ad hoc-nät [10]. De protokoll som har undersökts är ett proaktivt, kortaste väg, routingprotokoll och ett trafikadaptivt TDMA (Time Division Multiple Access) protokoll.

5.1 Förutsättningar

Om topologin förändras genom att vissa länkar försvinner och vissa tillkommer kan rutter genom nätet behöva ändras och tidsluckor behöva omfördelas mellan noder. Trafikförändringar i nätet medför också att tidsluckor kan behöva omfördelas mellan noder.

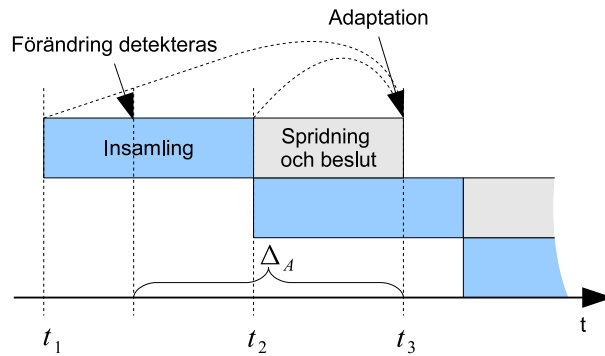
Det tar tid att uppdatera protokollen; en förändring måste först detekteras, information om förändringen måste spridas i nätet och protokollen måste sedan uppdateras till förändringen. Ett exempel på detta är tiden från att en länk slutar fungera tills systemet har adapterat sig till den nya topologin. För att kunna detektera att en länk inte fungerar behöver ett paket skickas över länken. Eftersom paket inte skickas hela tiden tar det tid från att en länk försvinner tills det detekteras.

Adaptionstid definierar vi som tiden från att en förändring detekterats tills protokollen i alla noder som berörs av förändringen har adapterats till den nya situationen, se figur 5.1. Vi är intresserade dels av adaptionstiden för systemet, d v s inkluderande både MAC- och routingprotokollet, och dels av adaptionstiderna för MAC- och routingprotokollet var för sig.

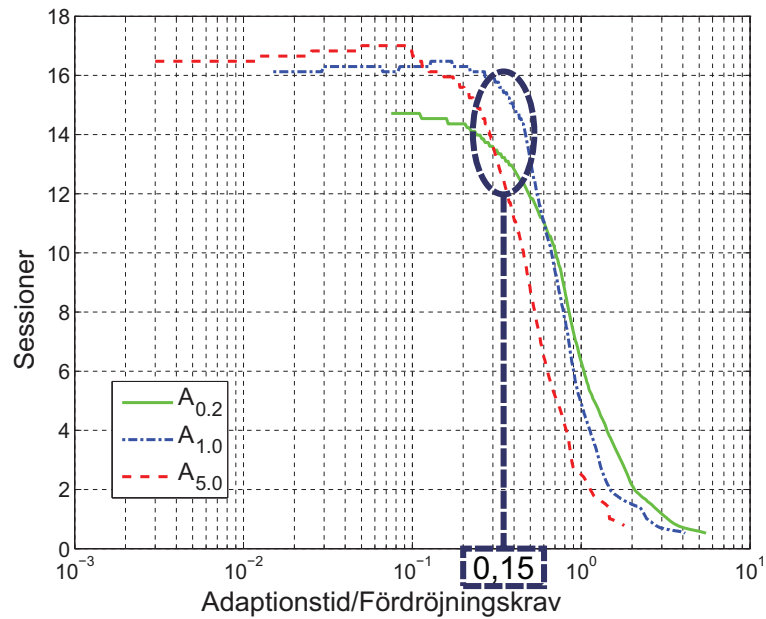
Efter insamling av förändringar ska information om förändringar spridas, och sedan (eller parallellt) ska beslut om eventuell åtgärd fattas. En åtgärd i MAC-protokollet kräver att en förhandling sker mellan noder om hur resurserna ska fördelas. En åtgärd i routingprotokollet kräver att information mottagits om förändringar av länkars status. Notera att adaptionstiden därmed är något som delvis kan kontrolleras via designen av protokollen genom att tillåta sändning av mer eller mindre kontrollinformation. En kort adaptionstid är önskvärd men kostsam, det finns dessutom fundamentala begränsningar på hur kort adaptionstiden kan göras.

Det mobila nätet som studeras består av 64 mobila noder som rör sig med en hastighet av 20 m/s enligt en slumpvandningsmodell över en yta på 64 km². Trafiken som har undersöks är punkt-till-punkt (unicast) sessioner mellan slumpmässigt utvalda noder. För att en session ska klassificeras som lyckad måste minst 95 procent av sessionens sända paket uppfylla ett givet fördröjningskrav.

I figur 5.2 illustreras antalet sessioner som lyckas som funktion av adaptionstid normerad med fördröjningskrav. Adaptionstiden bör inte överstiga 15 procent av fördröjningskravet för att sessionerna ska lyckas, d v s för talsessioner med 150 ms som fördröjningskrav bör adaptionstiden inte överstiga 22.5 ms. Realistiska adaptionstider



Figur 5.1: Illustration av detektion, spridning och beslutsprocessen vid uppdatering av ett protokoll, där Δ_A betecknar adaptionstiden.



Figur 5.2: Antal lyckade samtidiga sessioner som funktion av normerad adaptionstid. Kurvan $A_{0.2}$ visar resultatet när sessionernas fördröjningskrav är 200 ms, $A_{1.0}$ när fördröjningskravet är 1.0 s, och $A_{5.0}$ när fördröjningskravet är 5.0 s.

är dock betydligt större. Det innebär att protokollen inte hinner omallokera resurserna och adaptera när sessioner med sådana fördröjningskrav är uppkopplade. Antingen får man acceptera avbrott på sessionerna eller använda andra lösningar, t ex att överallokera resurser.

När man jämför MAC-lagret och routinglagret ser man att det är MAC-lagret som är känsligast avseende adaptationstid. Medan MAC-protokollet behöver kunna adaptera sig på en tid motsvarande 15 procent av fördröjningskravet behöver routingprotokollet bara kunna adaptera sig på en tid i samma storleksordning som fördröjningskravet. Detta beror på att det är viktigare att åtminstone ha tillgång till en tidslucka så att paketet kan sändas på någon länk/rutt mot destinationen än att använda den bästa länken/rutten mot destinationen.

5.2 Slutsatser

Slutsatserna man kan dra av undersökningen är att ett mobilt nät inte samtidigt kan ha hög kapacitet, eller genomströmning, och vara fullt lastat med tidskritiska applikationer. Man kan se det som att det kostar mera i form av nätresurser att stödja tidskritiska applikationer jämfört med icke-tidskritiska applikationer.

En lösning som kan används för att handskas med tidskritiska applikationer är att tilldela extra resurser/tidsluckor till noderna. Då kan dessa tidsluckor användas vid förändringar utan att MAC-protokollet behöver uppdateras, d v s besluten kan fattas lokalt i noderna utan att någon förhandling behöver genomföras. Dessutom, om man inför ett prioriteringssystem lokalt i noden, kan dessa extra tidsluckor när de inte behövs för den tidskritiska applikationen användas till att i stället kommunicera icke-tidskritiska applikationer. Denna lösning medför att andelen tidskritiska applikationer i nätet måste begränsas. Samtidigt behöver inte kostnaden i form av icke-utnyttjande nätresurser bli så stor så länge det finns annan (icke-tidskritisk) trafik i nätet.

6 Tal i ad-hoc nät

För större nät är det orealistiskt att tjänster med så besvärliga fördröjningskrav som tal kan hanteras på samma sätt som annan mindre fördröjningskänslig data, se kapitel 5. Detta betyder inte att tal inte kan hanteras i mobila multihoppsnät utan enbart att specialhantering av taldata ofta kommer krävas, speciellt i smalbandiga system.

I användarrapporten [9] undersöktes om tal- och datakommunikation bör implementeras i en gemensam vågform eller i två separata vågformer. Utvärderingen var baserad kring två olika koncept för tal i taktiska flerhoppsnät. Det ena konceptet innebär att all kommunikation, även tal, hanteras i den bredbandiga UHF-vågformen. Det andra konceptet innebär att talkommunikation hanteras i ett separat smalbandigt flerhoppsnät på VHF-bandet, med övrig datakommunikation i ett bredbandigt flerhoppsnät på UHF-bandet.

- **Tal och data i en gemensam bredbandig vågform:** En fördel med en bredbandig vågform är att man har mycket mer tillgänglig kapacitet än i en smalbandig vågform (även om bara en del av kapaciteten används till tal). Detta ger möjlighet att sända talet fler hopp, varje hopp blir dock kortare än motsvarande smalbandigt hopp. Den andra stora fördelen är att all funktionalitet finns i en vågform, d v s bara en sändtagare behövs, vilket ger utrymme för montering av annan (kommunikations)utrustning.

Den stora nackdelen är behovet av ett - ledigt - brett, sammanhängande frekvensband för att få någon kommunikation överhuvudtaget.

- **Tal i en separat smalbandig vågform:** En stor fördel med en smalbandig talvågform är att den ger större räckvidd, d v s man kan nå längre med ett visst antal hopp och behöver alltså färre återutsändningar för att nå fram till en viss punkt. Antal hopp en vågform klarar är därmed av mindre betydelse i en smalbandig vågform. Det är också lättare att hitta ett ledigt smalt frekvensband än ett brett (i detta fall behövs dock fortfarande ett relativt brett frekvensband för att hantera datatrafik eftersom den skickas med en separat vågform). Att använda två separata vågformer innebär också att man behöver två separata sändtagare samt antensystem.

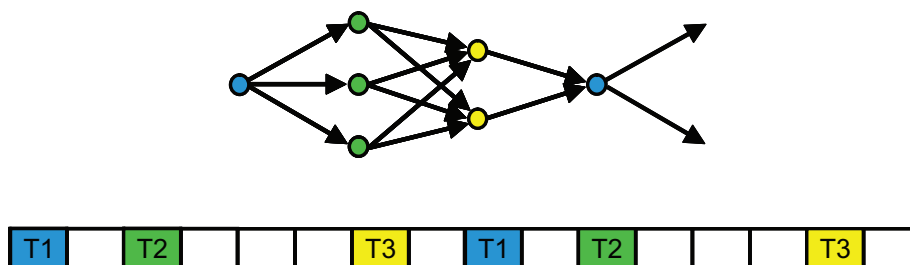
Av räckviddsberäkningarna i [9] framgår att det är fördelaktigt att använda VHF-bandet i svår terräng på grund av bättre utbredning (längre räckvidd) än för UHF-bandet. I enklare terräng blir skillnaden mellan VHF- och UHF-bandet inte lika stora. Vald datatakt, eller bandbredd, påverkar också räckvidden. Med en hög datatakt fås generellt en kortare räckvidd än man skulle få med en låg datatakt. Räckviddsförändringarna är här dock inte lika beroende av terräng som då man byter frekvensband. Om man i terrängexemplen i [9] jämför ett system på VHF (50 MHz) med datatakten 25 Kb/s och ett system på UHF (350 MHz) med datatakten 1 Mb/s, är räckvidden för VHF-systemet ca 1,4 respektive 3,5 ggr räckvidden av UHF-systemet (den större räckviddsvinsten är för svår terräng).

6.1 Barrage Relay Networks

Trafikflödet för talgrupper i flerhopsnät karakteriseras av att varje talpaket sprids ut till alla mottagare som är med i talgruppen. Det enklaste sättet att hantera talgrupper i mindre nät är att sprida talpaketen till alla noder i nätet (broadcast). Flooding är det engelska namnet på en känd metod för att realisera broadcast-trafik över multipla hopp. Metoden innebär att varje nod återsänder det ursprungliga paketet en gång. På så sätt garanteras att alla noder i nätet nås av broadcast-trafiken. Fördelen med flooding är att alla noder kan ta emot broadcast-trafik utan kännedom om nodernas placering i nätet. En nackdel är att trafiken är mycket resurskrävande, eftersom alla noder behöver var sin tidlucka för att återsända paketen.

Barrage Relay Networks (BRN) är en ny teknik för effektiv hantering av broadcast-trafik i flerhopsnät. Namnet kommer av det engelska uttrycket *Barrage fire* (spärrelld). Tekniken innebär att flera olika noder kan återsända ett paket i samma tidlucka och passar bra för att realisera push-to-talk-tjänster för talgrupper i ad hoc-nät. Exemplet i figur 6.1 illustrerar hur detta fungerar. Den vänstra blå noden skickar ett talpaket till alla grannar i tidlucka T1. I tidlucka T2 återsänder grannarna (gröna noder) samtidigt detta paket. Grannarna till dessa noder tar alltså emot paketet från flera sändare, med lite olika tidsdifferens beroende på sändarnas placering. Denna tidsdifferens kan hanteras med känd beprövad teknik, på samma sätt som flervägsutbredning. Eftersom de återsändande noderna kan använda en gemensam tidlucka stället för var sin, så blir metoden avsevärt mer effektiv än vanlig flooding, [12].

Noder som är mer än tre hopp från varandra kan normalt sända olika paket i samma tidlucka utan att störa varandras mottagare. I figur 6.1 illustreras detta med de två blå noderna. Den vänstra blå noden sänder ut ett nytt paket samtidigt som den högra blå noden återsänder nodens förra paket. Detta innebär att talgrupper som kan schemaläggas för att nå tre hopp bort, kommer att nå ut till hela nätet utan att det krävs mer resurser i form av allokerade tidluckor.



Figur 6.1: Noderna sänder eller återsänder paket i respektive tidlucka enligt färgkodningen.

6.2 Tidluckelängd

En undre gräns för storleken på tal-tidluckorna bestäms av egenskaper hos radions hård- och mjukvara, till exempel längden på frekvenshopp och mängden overhead per paket. Tidluckorna i en frekvenshopsradio kan inte effektivt anpassas till taltjänsternas små paket. Detta beror på att varje gång en radio sänder så behövs gardtid för utbredning, tuning, preamble samt tid för ned- respektive upprampning i förstärkaren vilket tar resurser från nyttoöverföringen. Dessutom behövs bitar för felupptäckt i varje paket, vilket ytterligare minskar effektiviteten.

För en typisk bredbandig UHF-vågform kan den delen av tidluckan som inte bär nyttotrafik bli upp till 0,3 ms, under antagandet att en tidlucka består av ett frekvenshopp. Det innebär att tidluckor mycket mindre än någon ms blir ineffektiva. Till exempel motsvarar 1 Mb/s ca 700 bitar vilket normalt är mycket mer än storleken på ett talkodpaket. Tidluckorna för data kan vara större än tidluckorna för tal, men det är en fördel om storleken på tidluckorna är anpassade till varandra så att antalet talgrupper lätt kan anpassas till olika typer av uppdrag. Därför är det viktigt att olika kombinationer av tal-tidluckor och data-tidluckor kan schemaläggas effektivt.

För en smalbandig VHF-vågform gäller motsvarande förutsättningar. Flera av tidsparametrarna är dessutom större eftersom datatakten är lägre. Praktiskt kan man för denna vågform räkna med uppemot 2-3 ms overhead per sändning. Detta motsvarar dock mycket färre bitar än i UHF-fallet.

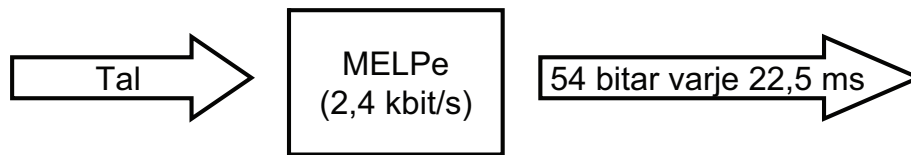
Det bör poängteras att korta paket kan slås samman i en sändning. Med BRN är det dock svårt att slå samman paket med ursprung från olika noder eftersom principen bygger på att identiska paket ska skickas samtidigt i en tidlucka.

6.3 Fördröjningsestimering från mun till öra

Eftersom tal är känsligt för fördröjningar och variationer i fördröjningar, är det relevant att undersöka var fördröjningarna uppstår. Om vi studerar den totala fördröjningen från mun till öra består den huvudsakligen av följande komponenter:

- Väntan på att talkodaren sätter ihop nästa talpaket (22.5 ms för talkodning enligt MELPe, figur 6.2).
- Eventuell sammanslagning av flera talpaket innan de sänds genom kommunikationssystemet.
- Väntan på tidlucka för källnodens sändning (tidlucka T1 i BRN)
- Transmissionstid genom systemet: Denna tid beror på antalet hopp som ett meddelande skickas och hur nära varandra tidluckorna kan läggas. För enkelhets skull antar vi att T1, T2, och T3 från figur 6.1 kan läggas direkt efter varandra i följande exempel i kapitlet. Detta ger en transmissionstid som är tidluckelängden gånger antal hopp, för sändningar upp till tre hopp bort.

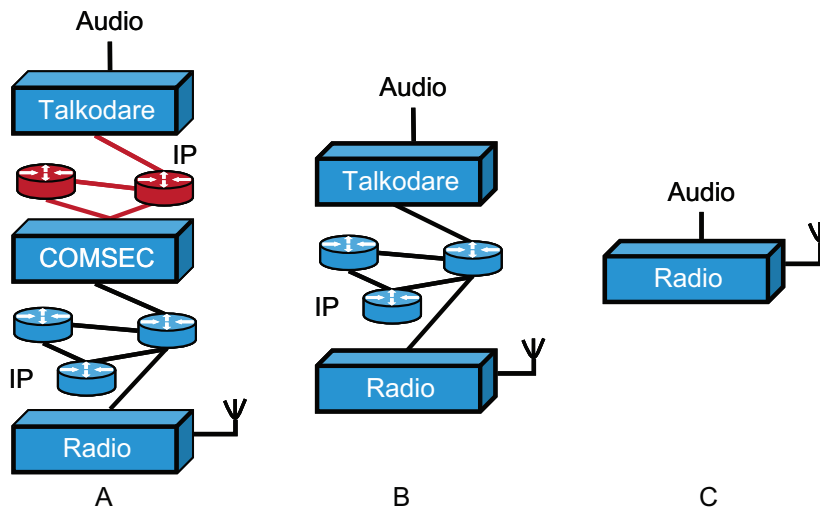
Vi försummar här fördröjningar orsakade av kryptering och annan processtid eftersom de är hårdvaru- och implementationsberoende.



Figur 6.2: MELPe är en talkodare som genererar 2.4 kb/s taldata i form av 54 bitars paket varje 22.5 ms.

6.4 Systemexempel med prestandaberäkningar

Eftersom kryptolösningar ofta är nationella medan radiosystem köps från utländska tillverkare så är det intressant att undersöka konsekvenserna av att separera tal- och kryptoenhet från själva radioenheten. Ett radiosystem kan utformas på några olika sätt. De tre vanligaste visas i figur 6.3. I exemplet till vänster implementeras talkodare och krypto (COMSEC) i separata moduler som kan vara åtskilda från varandra. I det röda nätet som visas mellan talkodare och krypto, tillåts överföring av oskyddad säkerhetsklassad information. Det nätet kan dock förväntas vara litet. I mitten antar man att krypto och talkodare implementeras i en enhet som genom ett IP-nät kan kopplas in på en extern radio. Längst till höger visas det traditionella sättet, där alla funktioner ligger i samma enhet.



Figur 6.3: Till vänster talkodare, krypto och radio i separata moduler, i mitten talkodare och krypto i samma enhet, till höger allt integrerat i samma enhet.

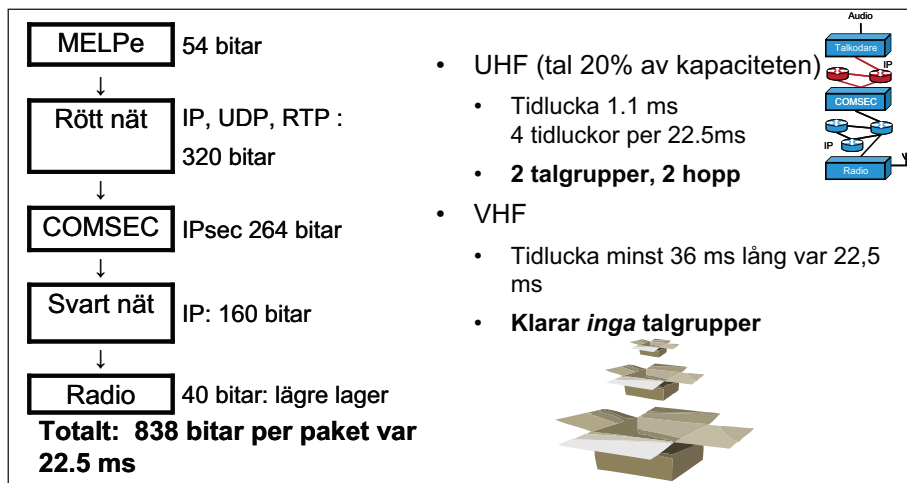
De olika metoderna har olika konsekvenser för overhead och därmed för hur många talgrupper och hopp de bredbandiga och smalbandiga systemen kan förväntas hantera. Nedan ges några exempel på metoder och vilka konsekvenserna blir. Dessutom ges en uppskattning av fördröjningarna i de olika fallen.

6.4.1 Exempel 1: Traditionell IP-lösning

Det första exemplet kan ses som ett extremt exempel där traditionell kommersiell IP-teknik har använts för kryptera och hantera taldata från den militärt standardiserade talkodaren MELPe. MELPe genererar 2.4 kb/s taldata i formen av 54 bitars paket varje 22.5 ms.

Vi antar att VoIP-teknik används för att förmedla tal och IPsec för att hantera kryptering. Detta innebär att till ett MELPe talpaket läggs en IP/UDP/RTP-header på totalt 40 byte (en byte är detsamma som åtta bitar). Paketet krypteras sedan med IPsec i tunnel-mode. Resultatet varierar en del med olika inställningar, men vi antar för enkelhets skull att paketstorleken ökar med 53 byte, inklusive svart IP-header. Själva radion kan sedan antas lägga till ytterligare fem byte information som behövs för det fysiska lagret och datalänklagret. Detta ger totalt 838 bitar per paket var 22.5 ms (figur 6.4).

- Bredbandigt system, UHF (tal 20% av kapaciteten): I detta fall behövs en tidlucka på minst 1.1 ms för att hantera 838 bitar. På grund av overhead enligt ovan ger detta högst fyra tidluckor per 22.5 ms intervall. Detta kan exempelvis användas till två talgrupper som sänds två hopp och fördröjningen blir då ungefär 47 ms.
- Smalbandigt system VHF: För att hantera 838 bitar krävs en tidlucka som är minst 36 ms lång, denna behövs dock varje 22,5 ms vilket inte är möjligt. Det smalbandiga systemet klarar alltså inga talgrupper.

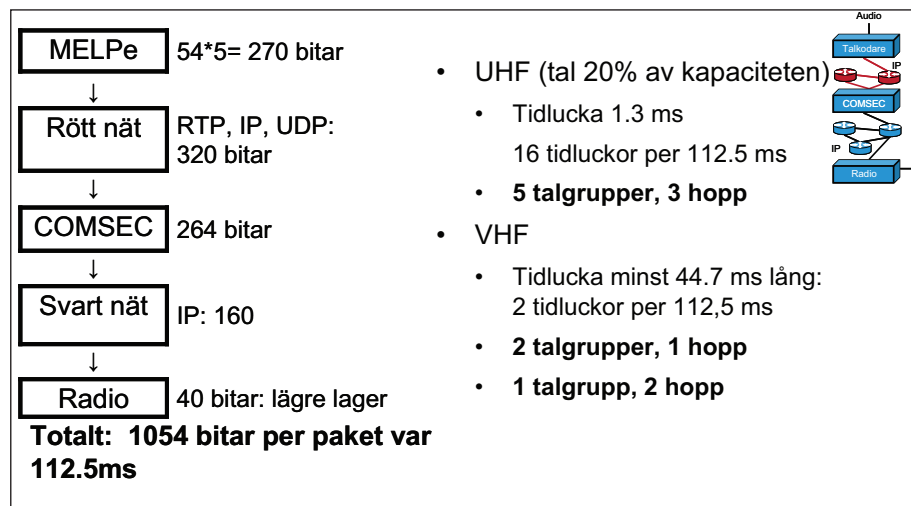


Figur 6.4: Exempel 1: Traditionell IP-teknik.

6.4.2 Exempel 2: Traditionell IP-lösning med sammanslagna paket

I exempel 2 antar vi att talkodaren lägger samman fem talpaket innan den sänder iväg dem. I övrigt görs samma antaganden som i förra exemplet. Denna gång genereras 270 bitar från talkodaren, motsvarande 112,5 ms. Till detta läggs sedan IP/UDP/RTP-header på totalt 40 byte. Paketet krypteras sedan med IPsec i tunnel-mode, resultatet varierar även här en del med olika inställningar, men vi antar för enkelhets skull att detta ökar paketstorleken med 53 byte, inklusive svart IP-header. Själva radion kan sedan antas tillföra ytterligare fem byte information som behövs för det fysiska lagret och datalänklaget. Detta ger totalt 1054 bitar per paket var 112,5 ms.

- Bredbandigt system, UHF (tal 20% av kapaciteten): I detta fall behövs en tidlucka på minst 1,3 ms för att hantera 1054 bitar, vilket ger högst 16 tidluckor per 112,5 ms intervall. Detta kan exempelvis användas till fem talgrupper som sänds tre hopp. Fördröjningen blir ungefär 229 ms. Om en högre fördröjning accepteras så kan vi tillåta fler hopp och då tillkommer 112,5 ms fördröjning per tre hopp.
- Smalbandigt system, VHF: För att hantera 1054 bitar krävs en tidlucka som är minst 44,7 ms lång. Detta ger högst två tidluckor per 112,5 ms intervall. Detta kan antingen användas till två talgrupper som sänds ett hopp eller en talgrupp som sänds två hopp. Fördröjningen blir då ca 270 ms respektive 315 ms, figur 6.5.



Figur 6.5: Exempel 2: Traditionell IP-teknik med sammanslagna paket.

6.4.3 Exempel 3: Minimal overhead och extern talkodare

Ett alternativ till att slå samman flera paket i talkodaren är att minska den tillagda overhead-informationen så mycket som möjligt. Vi antar att talkodare och krypto implementeras i samma modul, så att de kan optimeras tillsammans såsom visas i mittenbilden i figur 6.6. Då kan man anta att ingen röd information behövs utan att kryptoenheten med hjälp av sekvensnummer kan hantera att paket kommer i fel ordning samt att paket saknas. Vi antar att ett minimum av 10 bitar behöver läggas till ett talkodarpaket på 54 bitar (detta får anses vara lågt räknat om autentisering och verifiering av felaktig data också krävs).

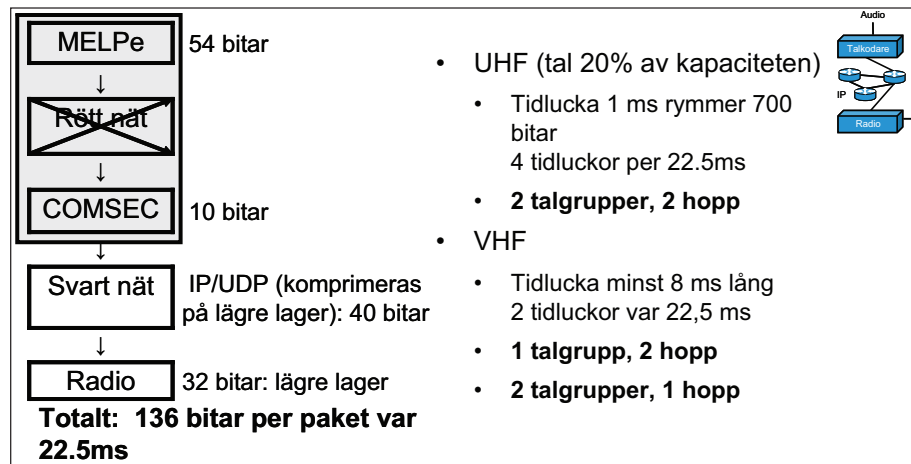
Talkodare/krypto kopplas samman med radion genom ett IP-interface så att en IP-header på 20 byte läggs till paketet som sedan kan komprimeras i radion. Idealt kan en sådan komprimering bli väldigt effektiv om en returkanal kan användas. Broadcast med returkanaler är dock opraktiskt att realisera, så komprimeringen blir i praktiken mindre effektiv i denna tillämpning. Komprimering av IP-headrar är ofta variabel; vissa IP-headrar kan komprimeras ner till 1-2 byte, andra inte alls. Tidluckelängderna vi tidigare talat om behöver kunna hantera det värsta fallet. En stor del av informationen i IP-headern är överflödigt eller förutsägbar i denna tillämpning. Delar av den informationen kan också konfigureras i förväg. Till exempel behövs inte 32-bitarsadresser för att beskriva de relativt få talgrupper som en militär radio ska kunna hantera.

Utän att gå in på detaljer antar vi att en komprimering till fem byte är rimlig utan återkoppling. Själva radion kan sedan antas addera ytterligare fyra byte information som behövs för det fysiska lagret och datalänklaget. Detta ger totalt 136 bitar per paket var 22,5 ms, figur 6.6.

- Bredbandigt system, UHF (tal 20% av kapaciteten): Eftersom den minsta rimliga storleken på en tidlucka (för effektiv datatrafik) är 1 ms och rymmer ca 700 bitar blir det ineffektivt att bara sända 136 bitar taldata. En effektivare lösning här är att lägga samman talpaket i radion för att fylla ut tidluckan (en tidlucka rymmer fem paket i detta fall). Skillnaden mot tidigare fall är att denna sammanläggning sker i radion och inte behöver byggas in i talkodaren.

Här behövs en tidlucka på 1 ms var 112,5 ms, vilket ger högst 22 tidluckor per 112,5 ms intervall. Detta kan till exempel användas till sju talgrupper som sänds tre hopp. Fördröjningen blir 138 ms. Om en högre fördröjning accepteras så kan vi tillåta fler hopp och då tillkommer 112,5 ms fördröjning per tre hopp.

- Smalbandigt system, VHF: För att hantera 136 bitar krävs en tidlucka som är minst 8 ms lång. Detta ger högst två tidluckor per 22,5 ms intervall. Detta kan antingen användas till två talgrupper som sänds ett hopp eller en talgrupp som sänds två hopp. Fördröjningen blir cirka 53 ms respektive 61 ms.

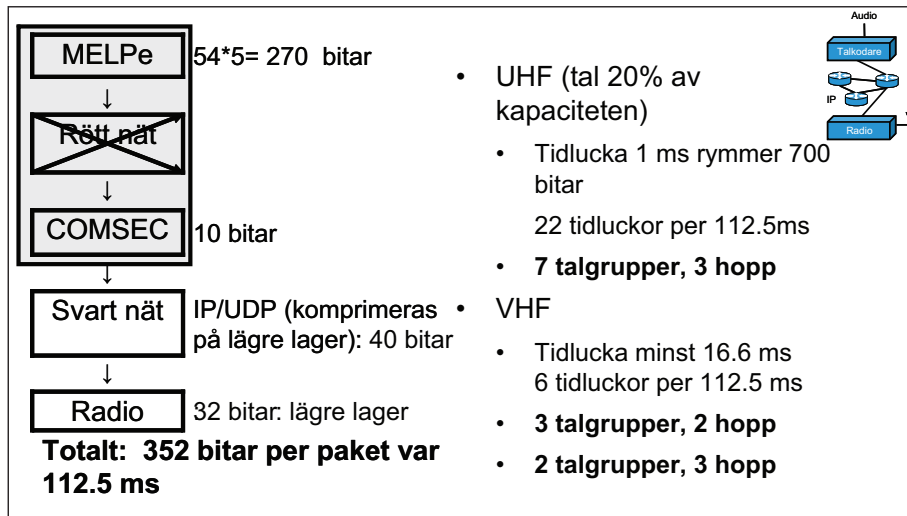


Figur 6.6: Exempel 3: Minimal overhead och extern talkodare.

6.4.4 Exempel 4: Minimal overhead med sammanslagna paket och extern talkodare

I det fjärde exemplet antar vi att båda metoderna för att minska overheadtrafiken används. Dels lägger vi samman fem talpaket (som i exempel 2), dels minimerar vi overheaden som beskrivs i exempel 3. Detta ger totalt 352 bitar per paket var 112,5 ms, figur 6.7.

- Bredbandigt system, UHF (tal 20% av kapaciteten): På samma sätt som i exempel 3 är den minsta tidluckestorleken 1 ms och rymmer 700 bitar. I detta exempel rymmer en tidlucka inte mer än ett sammanlagt talpaket. Detta ger 22 tidluckor per 112,5 ms intervall, vilket till exempel kan användas till sju talgrupper som sänds tre hopp. Fördröjningen blir 225 ms. Om en högre fördröjning accepteras så kan vi tillåta fler hopp och då tillkommer 112,5 ms fördröjning per tre hopp.
- Smalbandigt system, VHF: För att hantera 352 bitar krävs en tidlucka som är minst 16,6 ms lång. Detta ger högst sex tidluckor per 112,5 ms, vilket antingen kan användas till två talgrupper som sänds tre hopp, tre talgrupper som sänds två hopp, sex talgrupper som sänds ett hopp eller en talgrupp som sänds sex hopp. Fördröjningen i dessa fall blir cirka 275 ms, 258 ms, 241 ms respektive 325 ms. I fallet med två talgrupper som sänds tre hopp kan dessutom fler hopp hanteras om en högre fördröjning accepteras. Då tillkommer 112,5 ms fördröjning per tre hopp.



Figur 6.7: Exempel 4: Minimal overhead med sammanslagna paket och extern talkodare.

6.5 Slutsatser

Tal verkar vara möjligt att realisera över multipla hopp, både i smalbandiga och bredbandiga system. Både fördröjningskrav och hög mobilitet är hanterbara, men kräver speciallösningar i många system. Barrage Relay Networks är en ny teknik som kan användas för att realisera talgrupper i flerhopsnät. Det är viktigt att ta hänsyn till alla funktioner som involveras, det vill säga talkodare, krypto och övriga nätfunktioner måste anpassas för att ge en rimlig funktionalitet i de smalbandiga systemen. Sammanläggning av talpaket är ett bra sätt att reducera overhead. Detta bör vara variabelt för kompatibilitet med andra system. Reduktion av krypto- och nätöverhead är nödvändig för att effektivt hantera tal i smalbandiga nät.

7 WOLF

WOLF (Wireless rObust Link for urban Force operations) är ett projekt som finansierats inom ramen för ett gemensamt program inom EDA (European Defence Agency): EDA Defence R&T Joint Investment Programme on Force Protection (JIP-FP). Fas 1 av projektet var 2-årigt och genomfördes 2009-2010. Syftet med WOLF Fas 1 var att ta fram ett koncept för taktisk mobil kommunikation i urban miljö lämplig för EU-styrkorna i olika operationer [13]. FoT-projektet Projektet KomStril har medfinansierat WOLF vilket har möjliggjort för FOI och Försvarsmakten att utbyta idéer och erfarenheter med forskare inom WOLF-konsortiet.

Kommunikationsnätet i WOLF är avsett för fotsoldater på kompaninivå. Enheter kan också placeras i fordon och UAV:er. Ett WOLF-nät ska dynamiskt anpassa sig efter olika topologier och kan bestå av upp till 128 noder. En typisk topologi är att nätet dels består av ett fåtal enstaka noder (såsom sensorplattformar) och dels att resten av nätverket indelas i sammanhållna grupper av varierande storlek. Grupperna kan slås samman till större grupper för att sedan delas upp igen. Trafikflödena går över hela nätet och inte bara lokalt inom grupperna. En WOLF-vågform ska stödja olika typer av trafik, till exempel röst-, video och textmeddelanden med olika QoS krav. Dessutom måste både unicast-trafik och multicast -trafik kunna hanteras.

WOLF Fas1, härfter kallat WOLF, har fokuserat på att ta fram en kravbild avseende förmågor. Dessa krav har sedan värderats och prioriterats för att kunna föreslå en så bra vågform för soldater som möjligt. Kraven identifierades och värderades baserat på relevanta scenarier som togs fram i samarbete med slutanvändare. Utifrån dessa krav har projektteamet specificerat ett kommunikationssystem med SA (Situation Awareness) och relaterade tjänster, t ex positionering och identifiering.

En högnivåbeskrivning av systemkomponenter har realiserats för:

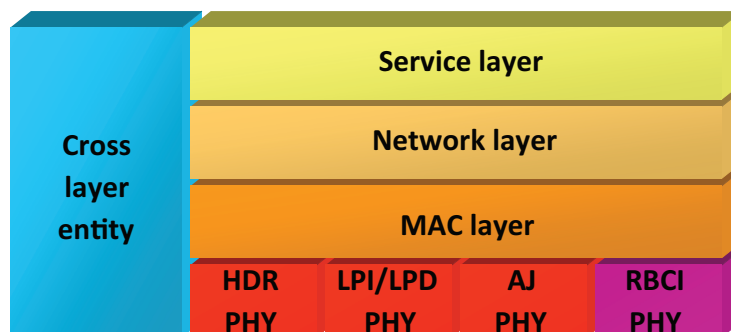
- Kommunikationssystemet: inkluderar det fysiska lagret, MAC-lagret och nätverkslagret. Olika systemkomponenter har testats via simuleringar plus att demonstrationer av några konceptimplementationer har utförts. En SDR-implementation av vågformen har också analyserats utifrån dess realiserbarhet.
- SA-systemet: inkluderar hela kedjan från fysisk utrustning, effektiv positioneringsteknik (både inomhus och utomhusmiljö), informationsdatamodeller upp till insamling och presentation av information.

Några komponenter och funktioner i nätverkslagret, MAC-lagret och det fysiska lagret beskrivs nedan.

7.1 Nätverkslagret

Följande nätverksprinciper är föreslagna för att spara bandbredd:

- Ett adaptionslager för att hantera kompression av IP headers och fragmentering. Internt i ett WOLF nät används korta MAC-adresser istället för hela IPv6-adresser.



Figur 7.1: Kommunikationslagren hos WOLF systemet.

- Routing utförs i nätverkslagret medan paketförmedlingen sköts av MAC-lagret
- Lokal topologikontroll sköts endast av MAC-lagret (t ex HELLO meddelanden hos OLSR) men informationen förmedlas vidare till nätverkslagret via så kallat "kors-lagerutbyte"(cross-layer exchange).

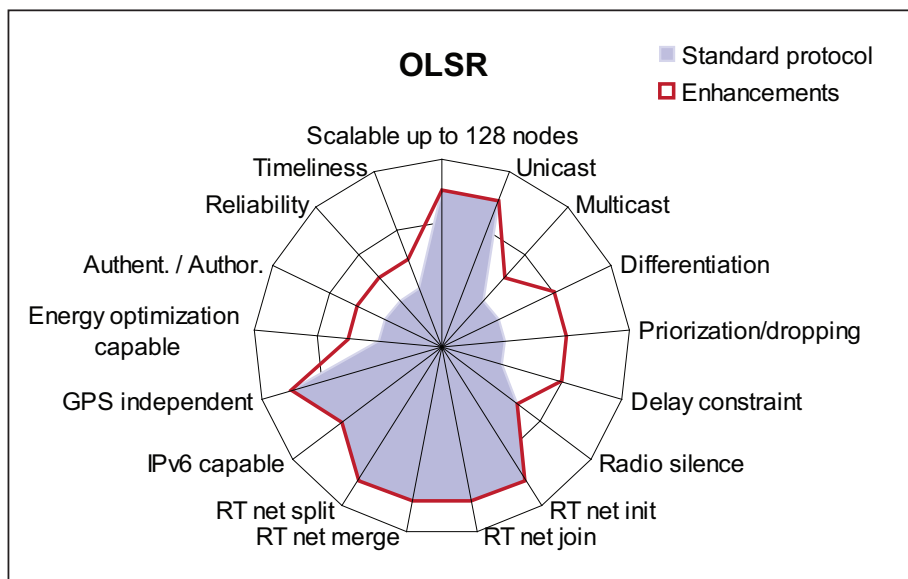
En TRL-(Technology Readiness Level) analys av olika routingprotokoll har utförts. När man efter att också väga in olika föreslagna förbättringar av protokollen valdes OLSR som grundprotokoll, speciellt på grund av MPR (Multi-Point-Relay) mekanismen som kan användas för multicast och broadcast, se figur 7.2. Slutligen valdes OLSRv2 som routing protokoll.

En utmaning i WOLF-systemet är att hantera tjänstekvaliteten (QoS) för alla olika trafiktyper trots att begränsat med resurser kan uppstå i dynamiska situationer. Ett QoS ramverk har tagits fram för detta. Ramverket innehåller en QoS modell, en klassindelning av trafiken, QoS signalering (d v s hur resurser reserveras), QoS-routing och QoS-MAC. Ett paket som ska sändas tilldelas en trafikklass, och två olika grundprinciper används sedan för att handskas med trafikklassen:

- Uppkopplad trafik för applikationer med strikta QoS krav. Detta kräver att resurser reserveras och en distribuerad metod för tillträdeskontroll (admission control) används.
- Ej uppkopplad trafik för applikationer med mera flexibla QoS krav. Denna trafik hanteras per hopp lokalt i noderna enligt DiffServprincipen, d v s ett kösystem finns lokalt i noden.

7.2 MAC-lagret

Ett stort antal krav ställs på MAC-(Medium Access Control) lagret samtidigt som kontrollinformation (andelen overhead) ska vara låg. Ett hybrid MAC-protokoll har valts,



Figur 7.2: Analys av OLSR och av OLSR med föreslagna förbättringar.

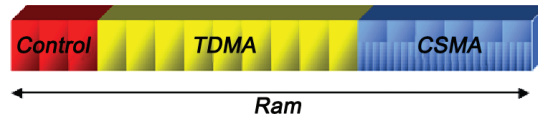
där en del av ramen används till kontrollinformation, en del till TDMA och en del till CSMA, se figur 7.3. Hur stor del som är TDMA respektive CSMA kan varieras dynamiskt beroende på behoven.

Tidsluckorna för TDMA-delen av protokollet tilldelas enligt två olika metoder, en centraliserad och en distribuerad. Under normala omständigheter används den centraliserade metoden där nätet indelas i pico-nät och för varje pico-nät väljs en nod som koordinator som sköter tilldelningen av tidsluckorna. Den distribuerade metoden utnyttjar ingen pico-nät indelning, utan alla noder har samma status och tidsluckor tilldelas via förhandlingar mellan noderna.

Både metoderna har visat sig fungera i ett WOLF-lik scenario men de har olika för- och nackdelar. Den centraliserade metoden erbjuder en mer effektiv resursallokering inom ett pico-nät. Den distribuerade metoden är å andra sidan bättre på att hantera mobilitet som orsakar topologiförändringar i nätet och vid omgrupperingar av pico-näten. I nästa fas av WOLF är målet att kombinera dessa metoder till en hybridmetod som sköter tilldelningen av tidsluckor.

7.3 Fysiska lagret

Beträffande det fysiska lagret så har focus varit att definiera en robust transmissionslänk för urban-/inomhusmiljö. De tekniska kraven visar på ett behov av att specificera tre olika LDR (Low Data Rate)-moder och en HDR (High Data Rate)-mod under sam-



Figur 7.3: Den föreslagna MAC-ramstrukturen.

ma MAC-lager, se figur 7.1.

- LDR 1: LPI/LPD (Low Probability of Interception/Low Probability of Detection), mod för smygkommunikation.
- LDR 2: AJ (Anti-Jamming), mod för robusthet mot interferenser och fiendlig störning.
- LDR 3: En mod som kan användas i nödfall (livlina) med högsta robustheten (ej illustrerad i figur 7.1).
- HDR: En hög dataaktmod för transmission av bilder, kartor eller video.

Förutom dessa moder har en RBCI-(Radio Based Combat Identification) mod tagits med. En analys av möjliga frekvensband för WOLF har identifierat 225-400 MHz bandet som lämpligt, dessutom skulle banden 1.3-1.7 GHz och eventuellt också 2.0-2.7 GHz kunna användas.

Referenser

- [1] J. Grönkvist, A. Hansson, J. Nilsson, M. Sköld, and J. Svensson. Hantering av multipla tjänster i heterogena ad hoc-nät. Användarrapport FOI-R--2886--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2009.
- [2] U. Sterner. Aquarius, en simuleringsmiljö för ad hoc-nät – strategidokument. Metodrapport FOI-R--2776--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2009.
- [3] A. Hansson and J. Grönkvist. Taktiska ad hoc-nät, broadcast med adaptiv datatakt. Användarrapport FOI-R--2820--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2009.
- [4] J. Löfvenberg, J. Grönkvist, and A. Hansson. Broadcast in multirate ad hoc networks. Vetenskaplig rapport FOI-R--2821--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2009.
- [5] J. Löfvenberg, J. Grönkvist, and A. Hansson. Data rate selection for efficient broadcasting in ad hoc networks. Inskickad artikel till IET Communications, 2012.
- [6] W. Zhu, A. Hansson, and J. Grönkvist. Topology Effects on MPR Flooding with Local Network Coding. Skickas som konferensbidrag till ADHOC-NOW eller till Med-Hoc-Net, 2012.
- [7] W. Zhu and A. Hansson. Improving broadcast efficiency in ad hoc networks using network coding. Teknisk rapport FOI-R--2753--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2009.
- [8] J. Grönkvist, J. Nilsson, A. Hansson, and E. Johansson. Heterogena taktiska kommunikationsnät. Användarrapport FOI-R--3033--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2010.
- [9] J. Grönkvist, A. Hansson, and J. Nilsson. Tal i taktiska flerhoppsnät. Användarrapport FOI-R--3084--SE, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Linköping, 2010.
- [10] J. Grönkvist, J. Karlsson, U. Sterner, J. Nilsson, and A. Hansson. Application Performance for Different Protocol Adaptation Delays in TDMA-based Ad Hoc Networks. Skickas som konferensbidrag till ADHOC-NOW eller till Med-Hoc-Net, 2012.
- [11] G. Velizar. TCP Performance in Tactical Ad-Hoc Networks. Examensarbete DAV C-19, Karlstads Universitet, Karlstad, 2011. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kau:diva-8703>.
- [12] T.R. Thomas R. Halford and Keith M. K.M. Chugg. Barrage relay networks. In *2010 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, pages 1–8. IEEE, January 2010.

- [13] A. Hansson, J. Nilsson, and Å. Waern, et.al. Wireless rObust Link for urban Force operations; WOLF Project keynotes. In *NATO RTO-MP-IST-92 Military Communications and Networks*, Wroclaw, Poland, september 2010.