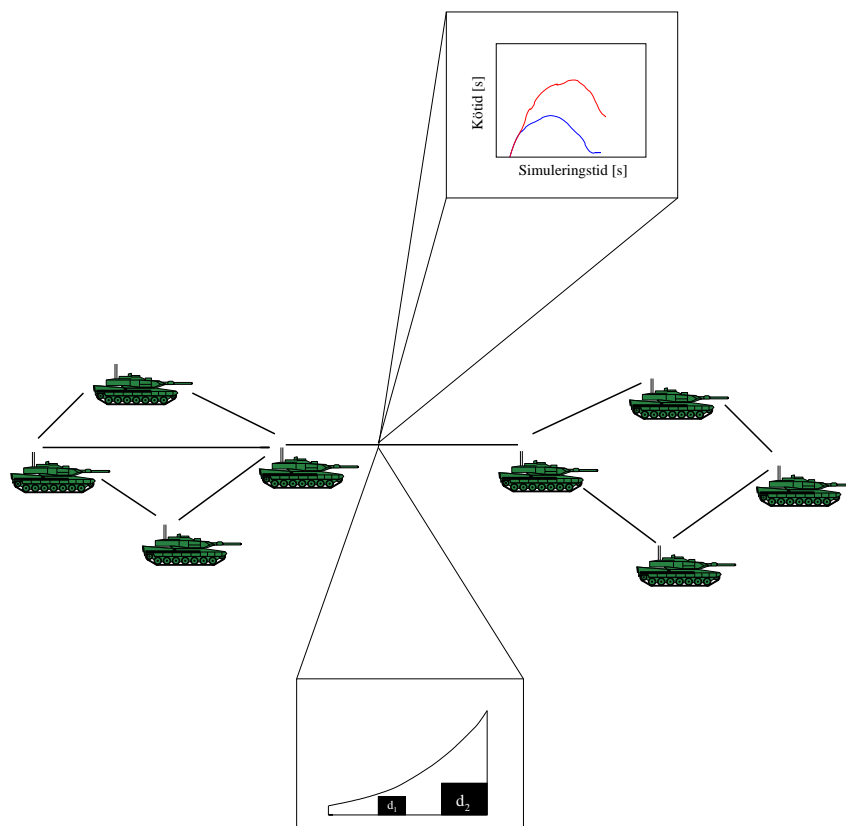


TOMAS HOLMBERG





# Trafikestimering i mobila ad hoc-nät



<b>Utgivare</b> Totalförsvarets Forskningsinstitut Ledningssystem Box 1165 SE-581 11 LINKÖPING	<b>Rapportnummer, ISRN</b> FOI-R-2242-SE	<b>Klassificering</b> Teknisk Rapport
	<b>Forskningsområde</b> 7. Ledning med MSI	
	<b>Månad, år</b> Februari 2007	<b>Projektnummer</b> E7108
	<b>Delområde</b> 71. Ledning	
	<b>Delområde 2</b>	
<b>Författare</b> Tomas Holmberg	<b>Projektledare</b> Mattias Sköld	
	<b>Godkänd av</b> Sören Eriksson	
	<b>Uppdragsgivare/kundbeteckning</b> Försvarmakten	
	<b>Teknisk och/eller vetenskapligt ansvarig</b> Jimmi Grönkvist	
<b>Rapportens titel</b> Trafikestimering i mobila ad hoc-nät		
<b>Sammanfattning</b> <p>För att minska sårbarheten i försvarets kommunikation eftersträvas system utan fast infrastruktur. Ad hoc-nät har en dynamisk struktur och saknar funktionsavgörande enheter. I ad hoc-nät färdas information från startdestination till slutgiltig destination genom att förmedlas via mellanliggande enheter. Ett betydande problem vid användning av ad hoc-nät, i synnerhet mobila, är hur nätets kapacitet ska fördelas. I denna forskningsstudie undersöks möjligheten att utnyttja trafikestimering för att fördela mobila ad hoc-näts resurser.</p> <p>Den introducerade trafikestimatorn uppskattar trafiken över nätets länkar i två steg. Först skapas ett estimat utgående från datasändingarnas storlek och ankomstintensitet. I ett andra steg reduceras estimeringsfelet genom hänsyn till datapaketens kötider.</p> <p>När trafikestimatorns uppskattningar används vid resurstilldelning i TDMA-baserade mobila ad hoc-nät förbättras andelen lyckat genomförda talsessioner betydligt.</p>		
<b>Nyckelord</b> trafikestimering, ad hoc-nät, flerhopp		
<b>Övriga bibliografiska uppgifter</b> Även utgiven av Uppsala Universitet, UPTEC F07 015	<b>Språk</b> Svenska	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Antal sidor:</b> 52 s.	
<b>Distribution enligt missiv</b>	<b>Pris:</b> Enligt prislista	



<b>Issuing organization</b> Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems P.O. Box 1165 SE-581 11 LINKÖPING SWEDEN	<b>Report number, ISRN</b> FOI-R-2242-SE	<b>Report type</b> Technical Report
	<b>Programme areas</b> 7.	
	<b>Month year</b> February 2007	<b>Project No.</b> E7108
	<b>Subcategories</b> 71.	
	<b>Subcategories 2</b>	
<b>Author/s</b> Tomas Holmberg	<b>Project manager</b> Mattias Sköld	
	<b>Approved by</b> Sören Eriksson	
	<b>Sponsoring agency</b> Swedish Armed Forces	
	<b>Scientifically and technically responsible</b> Jimmi Grönkvist	
<b>Report title</b> Traffic estimation in mobile ad hoc networks		
<b>Abstract</b> <p>To avoid vulnerability in military communication systems net structures without pre-existing infrastructure is preferred. Ad hoc networks are a collection of wireless nodes that dynamically form a temporary network without a central administration. Information is transmitted from the source to the destination either directly or via relaying through intermediate nodes. A considerable problem while using ad hoc networks, in particular mobile ones, is how to distribute shared capacity among the nodes. This report investigates the possibility to distribute the shared capacity based on traffic estimation.</p> <p>The introduced traffic estimator uses two steps in order to predict the traffic over the links in ad hoc networks. At first, an estimate is generated based on the size and the intensity of arrival of the transmissions. The estimation error is further reduced by using information of queuing times in the links.</p> <p>Simulation results show that adding traffic estimation in TDMA based mobile ad hoc networks yields a significantly higher ratio of successfully transmitted speech sessions compared to capacity distribution without traffic estimation.</p>		
<b>Keywords</b> traffic estimation, ad hoc networks, multi hop		
<b>Further bibliographic information</b> The report has also been published by	<b>Language</b> Swedish Uppsala University, UPTEC F07 015	
<b>ISSN</b> 1650-1942	<b>Pages</b> 52 p.	
	<b>Price acc. to pricelist</b>	





# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>9</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	9
1.2	Problemställning . . . . .	11
1.3	Syfte och målsättning . . . . .	12
1.4	Avgränsningar . . . . .	13
1.5	Rapportdisposition . . . . .	13
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>14</b>
2.1	Accessprotokoll . . . . .	14
2.1.1	Tidsmultiplex . . . . .	15
2.1.2	Trafikadaptivitet . . . . .	15
2.2	Trafikestimeringsmetoder i tidigare forskning . . . . .	15
2.2.1	Referensmetod baserad på routingvägar per länk . . . . .	16
2.2.2	Metod baserad på ett exponentiellt filter . . . . .	18
2.2.3	Metod baserad på kölängd . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Estimeringsmetod</b>	<b>20</b>
3.1	Trafiklastbidrag från datatrafik . . . . .	20
3.2	Trafiklastbidrag från väntetid i kö . . . . .	22
3.3	Totalt estimat . . . . .	23
3.4	Estimeringsmetodens designparametrar . . . . .	23
3.4.1	Normalisering och tidsfördröjning . . . . .	23
3.4.2	Timer . . . . .	25
3.4.3	Protokollängd . . . . .	26
3.4.4	Väntetid . . . . .	27

---

3.4.5	Kommentar till värderingen av designparametrar . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Förutsättningar för simulering</b>	<b>29</b>
4.1	Länkmodell . . . . .	29
4.2	Trafikadaptivetsalgoritm . . . . .	30
4.3	Routing . . . . .	30
4.4	Mobilitet . . . . .	31
4.5	Scenario . . . . .	31
4.6	Referensprotokoll . . . . .	33
<b>5</b>	<b>Anpassning av designparametrar</b>	<b>35</b>
5.1	Anpassning av $\gamma$ . . . . .	35
5.2	Identifiering av köer . . . . .	36
5.3	Uppdateringsfördröjning . . . . .	38
<b>6</b>	<b>Resultat</b>	<b>40</b>
6.1	Prestandajämförelser . . . . .	40
6.2	Estimering vid flera trafiktyper . . . . .	43
<b>7</b>	<b>Slutsatser</b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b>Förslag för vidare forskning</b>	<b>48</b>
8.1	Tillgänglighetsstyrning . . . . .	48
8.2	Spatiell tidsmultiplex . . . . .	48
8.3	Kända applikationer . . . . .	49
8.4	Optimering av designparametrar . . . . .	49

# Kapitel 1

## Introduktion

I detta kapitel konstateras behovet av en trafikestimator. Examensarbetets syfte presenteras och i kapitlets avslutning beskrivs avgränsningar samt hur rapporten är disponerad.

### 1.1 Bakgrund

I många av dagens trådlösa kommunikationsnätverk finns fasta punkter som har stor betydelse för nätens funktion; det kan vara en basstation i ett mobiltelefonnät eller en relästation i ett radionät. En ickefungerande sådan central enhet kan få förödande konsekvenser i form av att hela nätet blir obrukbart. I många sammanhang, i synnerhet inom försvaret, ställs höga krav på kommunikationssystemen med avseende på robusthet och effektivitet. Med målsättning att försöka uppfylla dessa krav bedrivs forskning på dynamiska nätstrukturer, s.k. *ad hoc-nät*, som saknar centrala funktionsavgörande enheter. Ett *ad hoc-nät* kan förändras över tiden och enheter kan med enkelhet anslutas eller kopplas ur. Nätstrukturen bygger på att information färdas från startdestination till slutgiltig destination genom att förmedlas via mellanliggande enheter. Detta *flerhoppsnät* medför att enheterna kan sända information till varandra genom att använda de olika rutter som uppstår då meddelandet tillåts hoppa mellan nätets enheter. Att det finns alternativa vägar för ett meddelande att nå mottagaren bidrar till att sändningen kan dirigeras till en annan rutt om en enhet blir utslagen. Detta ger en ökad möjlighet att uppfylla kravet på robusthet.

Vägen ett informationspaket tar från startdestination till slutgiltig destination fastställs av ett *routingprotokoll* som efter ett bestämt effektivitetsmått väljer det bästa alternativet. I militära sammanhang där enheterna, de s.k. *noderna*, ofta är under förflyttning skapas ett mobilt ad hoc-nät vilket medför att nya vägar kontinuerligt måste uppdateras. Detta bidrar till ökad *overheadtrafik*, det är den trafik som inte härrör från applikationer utan från data som sänds mellan noderna för att informera om förändrade förhållanden. En annan effekt av mobiliteten är att uppgiften att vidarebefodra, *reläa*, trafik kommer att flyttas mellan noderna över tiden beroende på om noderna har en central placering i nätet eller inte.

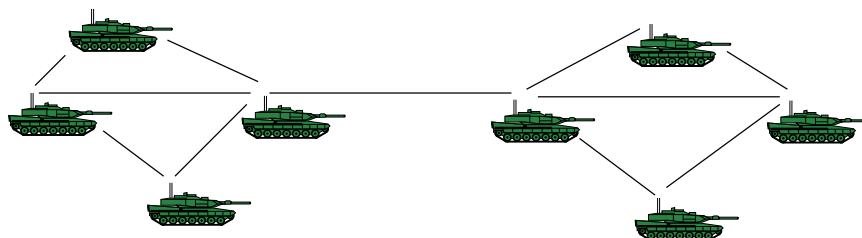
Ett näts förmåga att tillhandahålla olika typer av tjänster, så som taltrafik, filöverföring, nödanrop m.fl., benämns som dess *tjänstekvalitet*. I många fall finns det krav som måste uppfyllas för att överföringen i dessa tjänster ska fungera; det kan t.ex. vara låg fördröjning eller låg informationsförlust vid överföringen. En bidragande orsak till hur väl ett näts tjänstekvalitet kan upprätthållas är hur nätets gemensamma resurser fördelas. Då fler än en nod delar på en resurs, som i fallet för ett mobilt ad hoc-nät, regleras resurstillgängligheten av ett *accessprotokoll*. Beroende på accessprotokollets utformning kan de konflikter som uppstår då noder sänder samtidigt lösas eller förhindras. I ett konfliktlösande accessprotokoll kontrollerar noderna om en annan sändning pågår innan de själva sänder. Om nätet är upptaget avvaktar noden under en slumpmässig tidsintervall innan den kontrollerar igen. Skulle det ändå uppstå kollisioner, vilket exempelvis kan ske till följd av tidsfördröjningar, används återigen en slumpmässig tidsintervall för att hitta ett nytt sändningstillfälle. Kollisioner medför att data måste sändas på nytt och försämrar möjligheten att uppfylla de krav på fördröjning som ställs på militära kommunikationssystem.

För att kunna garantera tjänstekvalitet i ett ad hoc-nät för militärt bruk eftersträvas ett minimum av tillfällen då överföringar misslyckas till följd av att data krockar. Genom användning av kollisionsfria accessprotokoll kan det säkerställas att varje nod får en egen del av eller utrymme ur den gemensamma resursen. Dessa öronmärkta tilldelningar är utformade så att dess utnyttjande ej påverkar varandra och därför omöjliggör kollisioner. Ett av dessa protokoll, *tidsmultiplex* (*Time Division Multiple Access - TDMA*), är implementerat så att varje nod tilldelas, efter ett rullande schema, ett eget intervall, en s.k. *tidlucka*, att sända i.

Denna metod har utvecklats till att också kunna genomföra *spatiellt tidsmultiplex* (*Spatial Time Division Multiple Access - STDMA*) där flera noder med ett stort geografiskt avstånd från varandra tillåts sända i samma tidlucka.

## 1.2 Problemställning

Det nya insatsförsvaret kan med fördel använda sig av ett mobilt ad hoc-nät för sin kommunikation. Att nätet är oberoende av fasta enheter och att enheter med enkelhet kan anslutas innebär att samband snabbt kan upprättas vid ankomst till ett missionsområde. Dock uppstår problem om ad hoc-nätet har centralt placerade reläande noder vilket kan vara fallet t.ex. i ett långsmalt nät eller i ett nät där topologin omöjliggör sändning och mottagning mellan vissa noder. Figur 1.1 exemplifierar två centralt placerade noder i ett smalt nät. De problem som kan uppstå är i form av flaskhalsar som skapas i noder som blir förmedlare av en betydligt större trafikmängd än genomsnittet. Information riskerar att anlända i en större takt än den kan sändas och effekten kan bli att tjänstekvaliteten inte kan garanteras. Applikationer som exempelvis taltrafik kan äventyras eftersom de kräver en förbindelse med låg fördröjning. Detta är inte acceptabelt i ett modernt insatsförsvaret där samband är av yttersta vikt för att åtagna uppgifter ska kunna genomföras.



Figur 1.1: Nät med två centralt placerade reläande noder.

Att förändra resurstilldelningen kontinuerligt under ett näts livslängd kan avsevärt förbättra datagenomströmningen. Om det totala antalet tidluckor per schemacykel är större än nätets nodantal kan noder tillåtas sända i fler än en tidlucka per schemacykel. Eftersom en hårt trafikerad nod då får sända information ofta

re upphör dess påverkan som flaskhals. En styrning mot att optimera nodernas sändningsmöjligheter medför en högre tillförlitlighet i informationsöverföringen och ökad andel fungerande applikationer som följd. För att kunna genomföra en lyckad fördelning av de tillgängliga tidluckorna krävs ett uppskattat mått på trafiken över nätets noder. Med en bra trafikestimator och trafikutjämning kan kommunikationen i ad hoc-nät effektiviseras.

För att skapa en trafikestimator krävs svar på ett flertal frågor. Mellan noderna i ett nät sänds information på länkar, en betydande svårighet är att finna en matematisk modell som estimerar hur stor mängd data en länk behöver sända. Ett bra estimat krävs för att regleringen av resurser ska bli effektiv och beroende på vald modell kan återkopplingen bidra till att nätet reagerar olika snabbt. Vid hög trafiklast eller felaktig reglering uppstår kö av data i noderna. Med ökad väntetid i köer ökar risken för att informationsöverföringen inte uppfyller angiven tjänstekvalitet. I syfte att minimera fördröjningen kan snabbt identifierade köer användas för att ytterligare förbättra estimatet i riktning mot att minimera reglerfelet. Finns det en trafikestimator som skapar en återkoppling som leder till att antalet lyckade applikationer i mobila ad hoc-nät ökar?

### 1.3 Syfte och målsättning

I examensarbetet konstrueras en trafikestimator efter val som besvarar och tar hänsyn till den problematik som presenterats i sektion 1.2. Estimatoern implementeras i C++ och anpassas till en befintlig simuleringsmjukvara för att användas vid simuleringar av mobila ad hoc-nät. Syftet med examensarbetet är:

- Att identifiera hur tidsmultiplexa mobila ad hoc-näts prestanda påverkas av en vald trafikestimator när antalet tidluckor för noderna uppdateras kontinuerligt baserat på estimatorns data.

Vid simuleringar är talöverföring den applikation som studeras; nätets prestanda mäts i hur andelen godkänt genomförda talsessioner förändras till följd av användandet av trafikestimatorn.

---

## 1.4 Avgränsningar

Att ofta uppdatera tilldelningen av tidluckor kommer skapa mer overheadtrafik. Det bidrar till att en större del av nätets resurser används till att förmedla overheadtrafik med en prestandaförsämring i informationsöverföringen som följd. Med simuleringsmjukvaran *Aquarius*<sup>1</sup> som används under studien av trafikestimatoern tas ingen hänsyn till overheadtrafik. Detta medför att prestandaförsämringar till följd av ökad uppdateringstakt inte kommer att kunna presenteras. Uppdateringstakten kommer att bestämmas av förändringar i den estimerade trafiklasten per länk; när ett tröskelvärde mellan gammalt och nytt estimat överskrids uppdateras estimatet. Resurstilldelningen genomförs efter varje schema-cykel.

## 1.5 Rapportdisposition

I kapitel 2 beskrivs examensarbetets bakomliggande teori i form av grundläggande begrepp och tidigare forskningsstudier. Med utgångspunkt från teorin introduceras i kapitel 3 en trafikestimeringmetod som med de förutsättningar som definieras i kapitel 4 används vid simuleringar. De designparametrar som ingår i estimeringsmetoden anpassas i kapitel 5 och i de avslutande tre kapitlen presenteras och diskuteras resultat, slutsatser samt förslag för fortsatta studier.

---

<sup>1</sup>Aquarius har används för att simulera ad hoc-nät vid flertalet tidigare forskningsstudier, se t.ex. [5] [9].

## Kapitel 2

# Teori

I detta kapitel berörs grundläggande teorier för hur resurser fördelas i ett nätverk. Att försöka uppnå prestandaförbättringar till följd av att omfördela resurser i ad hoc-nät har varit ändamål för tidigare forskning. Några av de trafik-estimeringsmetoder som använts i tidigare studier introduceras tillsammans med kommentarer om dess funktion. Med dessa som utgångspunkt kommer en ny trafik-estimeringsmetod presenteras i kapitel 3.

### 2.1 Accessprotokoll

Det utrymme som tillskrivs en bestämd kommunikation betecknas som en *kanal*. Vid de tillfällen en kanal delas av flera användare måste möjligheten att utnyttja kanalens gemensamma resurser fördelas. Detta gäller i enkla vardags-situationer som samtal i en grupp människor men också i mer komplicerade tekniska sammanhang som informationsöverföring i trådlösa nätverk. I fallet med människor undviks att gruppen pratar i munnen på varandra genom att den tysta regeln att inte prata när någon annan redan gör det följs. För att fördela resurser i tekniska kommunikationssystem används accessprotokoll. Det är protokoll som styr hur kanalen ska fördelas. Den stora mängden av valbara protokoll kan delas in i tre klasser beroende på dess metoder att dela ut den gemensamma kapaciteten. De tre klasserna är: kanalpartitionerande protokoll som delar upp resurserna i för varandra icke störande enheter som kanalens noder får utnyttja, slumpmässiga protokoll som låter noderna sända godtyckligt och reserverande



protokoll som tilldelar noderna resurser efter en turordning. I denna studie kommer ett kanalpartitionerande accessprotokoll av typen tidsmultiplex att användas.

### 2.1.1 Tidsmultiplex

Tekniken att dela upp sändningsmöjligheten i tiden, tidsmultiplex (TDMA), innebär att noderna tilldelas öronmärkta intervaller, tidluckor, för utnyttjande av kanalen. Tidluckorna fördelas enligt ett rullande schema och när alla noder har fått en tidlucka börjar tilldelningen om på nytt. Med denna metod garanteras att inga kollisioner uppstår och att varje nod får möjlighet att sända en gång i varje schemacykel. Om kanalens totala datatakt är  $R$  bitar per sekund får en av de  $N$  noderna i medeltal en tilldelad datatakt på  $R/N$ . Nackdelen med TDMA är att noder som inte har något eller har väldigt lite att sända ändå får sin tidlucka med en följd av att kanalen under denna tidlucka helt eller delvis blir outnyttjad. Detta kan inträffa samtidigt som andra noder är i behov av att sända mer data än vad dess tilldelade tidlucka medger.

### 2.1.2 Trafikadaptivitet

De negativa aspekterna med TDMA kan minskas om det finns fler tidluckor än noder och att tidluckorna fördelades efter resursbehovet i nätets noder. Med vetenskap om varje nods önskemål av resurser samt en trafikadaptivetsalgoritm som rättvist fördelar de befintliga tidluckorna kan ett nät trafikutjämnas. Målsättningen är att så mycket som möjligt av kanalresursen ska användas. Att adaptivt förändra tilldelningen över ad hoc-näts livslängd har visat sig leda till prestandaförbättringar [5][11].

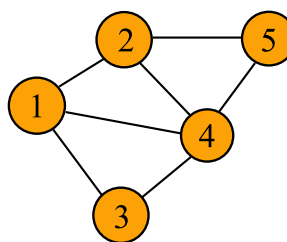
## 2.2 Trafikestimeringsmetoder i tidigare forskning

För att i ett ad hoc-nät kunna skapa ett trafikadaptivt TDMA-protokoll baserat på trafik krävs ett estimat på trafiklasten i varje länk som sedermera kan summeras nodvis. Ett antal olika metoder har tillämpats vid tidigare forskning. Som grund för slutsatser kring sina estimeringsmetoders funktion har författarna i flertalet forskningsstudier jämfört sina estimat med resultat från en trafiklastberäknande metod.

### 2.2.1 Referensmetod baserad på routingvägar per länk

En trafikalgorithm där trafiklasten i en nod beräknas genom att trafiklasterna i nodens sändande länkar summeras har presenterats av Robertazzi och Shore [10]. Metoden har förutom i [10] varit grund för trafikestimering i t.ex. [11] och utgjort referensvärden för [9]. Förutsättningarna för beräkningsmetoden är att trafiklasten i varje länk bedöms efter hur många routingvägar som använder länken. För denna algorithm antas nätets trafik vara likformigt fördelad, alla noder sänder lika ofta och sannolikheten för destinationerna är lika. Sändningar med fler mottagnoder än en existerar inte utan trafiken går från en bestämd sändare till en bestämd destination.

Länken mellan nod  $i$  och nod  $j$  definieras  $link(i, j)$  och dess trafiklast betecknas  $K_{ij}$ . För varje nod kontrolleras de routingvägar enligt valt routingprotokoll för sändningar till samtliga av de övriga noderna i nätet. Varje gång en länk passerar adderas 1 till länkens totala trafiklast.



Figur 2.1: Nät med fem noder.

$$K_{ij} = \sum_{\text{routingvägar som använder } link(i, j)} \quad (2.1)$$

I tabell 2.1 sammanfattas de länkar som används vid sändningar från nod 1 till de övriga noderna i det nät som illustreras av figur 2.1. I exemplet används ett routingprotokoll som minimerar antalet hopp mellan startdestination och slutgiltig destination och i de fall det finns två möjliga routingvägar väljs den med lägst nummer på den reläande noden.

Resultaten av routingvägar mellan noderna sammanställs i en  $N \times N$  matris där  $N$  är antalet noder och matriselementen betecknar de olika länkarna. Genom att summera raderna i matrisen kan ett mått på trafiklasten i varje nod erhållas; ett värde som visar hur tidluckorna kan optimeras. Tabell 2.2 visar  $K_{ij}$ , d.v.s. hur många gånger varje länk används vid sändning till och från alla noder i nätet i figur 2.1.

Routingväg		Använda länkar
Från	Till	
1	1	-
1	2	1 → 2
1	3	1 → 3
1	4	1 → 4
1	5	1 → 2, 2 → 5

Tabell 2.1: Länkar som används av routingvägar från nod 1 till de övriga noderna i nätet som illustreras av figur 2.1.

	Nod 1	Nod 2	Nod 3	Nod 4	Nod 5
Nod 1	-	3	2	1	0
Nod 2	3	-	0	1	2
Nod 3	1	0	-	2	0
Nod 4	1	1	2	-	2
Nod 5	0	1	0	2	-

Tabell 2.2: Antal gånger varje länk används vid sändning till och från alla noder i nätet i figur 2.1.

Eftersom trafiken förutsätts vara likformigt fördelad kan den relativa trafiklasten per länk,  $\lambda_{ij}$ , i ett fullständigt sammanbundet nät beräknas. Den konstanta ankomsthastigheten av data är  $\lambda$ .

$$\lambda_{ij} = \frac{\lambda K_{ij}}{N(N-1)} \quad (2.2)$$

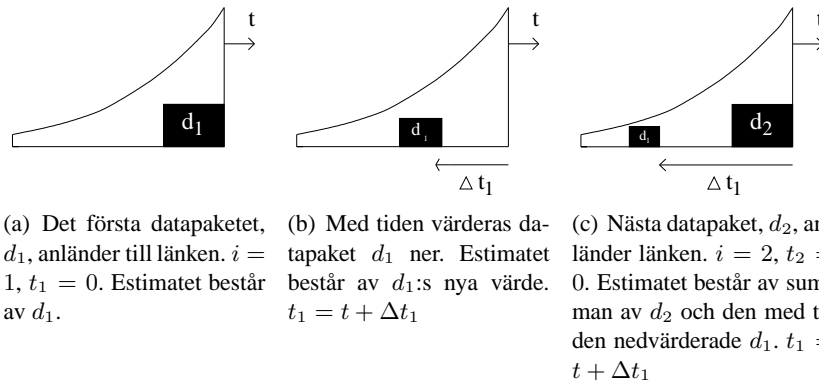
Metoden skulle kunna generaliseras till att även beräkna trafiklast i ett icke likformigt trafikerat nät. En förutsättning är dock att sändnings- och mottagningsfördelningen mellan nätets noder är känd. Detta för att kunna räkna ut hur många gånger varje routingväg passeras och vidare summera användningen av dess länkar enligt ekvation 2.1. Kravet medför att metoden har en betydande svaghet; i ett verkligt scenario medger inte situationen en sådan kännedom. Mängden sändningar, nodernas benägenhet att sända och mottaga samt nodernas positioner varierar då över tiden.

### 2.2.2 Metod baserad på ett exponentiellt filter

För att kunna genomföra trafikestimering oberoende av kravet på information om noders trafikfördelning konstaterar Mushabbar Sadiq att ett exponentiellt filter kan användas för att estimerar en nods trafiklast [9]. Estimatet baserar på ankomstintensiteten för *datapaket* till noden, d.v.s. hur lång tid som passerar mellan varje anländande datasändning. Att en nod tar emot ett datapaket definieras av att ett datapaket anländer från en annan nod eller att ett datapaket skapas i den egna noden för att i båda fallen sändas vidare via någon av nodens länkar. I måttet på trafiklast värderas alla datapaket från det första till det senast anlända. När ett nytt datapaket anländer skapas ett nytt estimat genom att det gamla värderas ner efter hänsyn till hur lång tid som passerat; hur mycket en tidsskillnad ska påverka estimatet beror på filtrets lutning,  $\gamma$ . Ett lågt  $\gamma$  medför att alla datapaket värderas lika oberoende när i tiden de ankommit. Vid höga  $\gamma$ -värden får tidsskillnader större verkan på estimatet; filtret värderar nyanlända datapaket högt för att sedan snabbt låta dem förlora i värde med tiden. Designparametern  $c$  är en normaliseringsfaktor,  $E$  är länkens trafikestimat och  $t_i$  är tiden som passerat sedan datapaket  $i$  anlände till länken. Tidsintervallet som krävs för att  $n$  datapaket ska bli mottagna i länken definieras av  $T_w$ .

$$E = c \sum_{i=1}^n e^{-\gamma t_i} \quad t_i \in T_w \quad (2.3)$$

Värdering med tid som faktor,  $\gamma > 0$ , bidrar till att händelser i närtid får mer genomslag i ett estimat. Om många datapaket anländer under en kort tidsperiod blir estimatet högt medan långa mottagningsmellanrum skapar ett lägre estimat. Denna metod kräver bara hantering av två värden, det nya estimatet samt det gamla där alla tidigare estimat finns invärderade. Figur 2.2 exemplifierar estimering av trafiklasten i en länk efter att två datapaket mottagits enligt metoden med ett exponentiellt filter. Metodens funktion har bekräftats via estimering på ett nät med likformigt fördelad trafik. De resultat som erhöles sammanföll med resultat från beräkningar enligt metoden i 2.2.1 [9].



Figur 2.2: (a-c) Estimering av trafiklasten i en länk efter att de två första datapaketerna anlänt till länken. Aktuell tid definieras  $t$  och följer filtrets framkant.

### 2.2.3 Metod baserad på kölängd

När en nod blir överbelastad, vilket inträffar då mer data anländer än sänds, uppstår kö i noden. I [3] introducerar Blomgren en estimeringsmetod som baseras på att noderna rankas efter dess kölängd. Resursfördelningen sker genom att noderna tilldelas tidluckor efter fallande ranking. Som utgångspunkt för att sätta ranking på varje nod används ett estimat på kölängd. Estimatet erhålls från summan av nodens kö, den mängd data som enligt ett trafikestimater förväntas lämna noden samt hur många tidluckor noden för närvarande är tilldelad. Blomgren framhäver i sina slutsatser att den studerade resurstilldelningsalgoritmen bidrar till att fördröjningen i ad hoc-nät minskar men att de trafikestimateringsmetoder som tillämpats inte uppfyller algoritmens noggrannhetskrav [3].

## Kapitel 3

# Estimeringsmetod

För att kunna estimerera trafiklasten i verkliga ad hoc-nät krävs en estimator som kan hantera trafik som ej är likformigt fördelad mellan noderna. Metoden med ett exponentiellt filter i sektion 2.2.2 har konstaterats användbar för olika trafiksituationer [9]. Metoden har däremot inte använts för att fördela ett ad hoc-näts resurser. För att uppnå positiva effekter av en återkoppling är estimeringsmetoden i behov av förbättringar. Förutom den direkta trafiken ska trafikestimatet kompletteras med ytterligare en estimeringsparameter; väntetid för datapaket i länkarna. Till skillnad från metoden i sektion 2.2.3 där kölängden estimerades ska den tid varje datapaket spenderar i kö i väntan på att bli sänd användas. Med en utökning till två estimeringsparametrar förväntas det totala estimatet förbättras med prestandaökningar i ad hoc-nätet som följd. I detta kapitel presenteras en ny metod för estimering av trafiklast i ad hoc-nät.

### 3.1 Trafiklastbidrag från datatrafik

För att bedöma trafiklasten som uppkommer i ett ad hoc-nät betraktas hur ankomsten av datapaket fördelas över nätets länkar. För att skapa ett trafikestimat används i den nya estimeringsmetoden det exponentiella filtret [9] som presenterades i sektion 2.2.2. Filtret utvecklas så att det kan hantera datapaket med olika storlek;  $M_i$  är storleken i bitar för datapaketet  $i$ . Estimaten på trafik i en länk anges av  $E^T$  och variabeln  $n(t)$  anger hur många datapaket som är inräknade i estimatet t.o.m. tiden  $t$ .

$$E^T(t) = c \sum_{i=1}^{n(t)} M_i e^{-\gamma(t-t_i)} \quad (3.1)$$

Trafiklast anges i bitar per sekund och bygger på händelser som inträffar över tiden. Ekvation 3.1 används för att beräkna ett estimat varje gång ett nytt datapaket anländer länken. Metoden förutsätter antagandet att datapaketerna anländer i ordningsföljd. Ett nytt datapaket,  $i$ , anländer vid  $t_i = t$ . Konstanterna  $c$  och  $\gamma$  är designparametrar som representerar normalisering respektive hur mycket en tidsenhet ska påverka värderingen av data, d.v.s. hur brant det exponentiella filtret är. Estimering genomförs på samtliga sändande länkar baserat på antalet anlända datapaket på aktuell länk.

I ekvationerna 3.2 och 3.3 demonstreras hur estimatet i en länk förändras när två på varandra följande datapaket anländer. I estimeringen anger  $k$  antalet datapaket som anlänt vid  $t_k$ , d.v.s.  $n(t_k) = k$ . I ekvation 3.2 anländer det första datapaketet,  $p_{k-1}$ , vid  $t_i = t_{k-1}$  och ett första estimat genereras. Estimatet bygger på storleken av  $p_{k-1}$ . Vid  $t_i = t_k$  anländer nästa datapaket,  $p_k$ , och ekvation 3.3 visar att det nya estimatet består av summan av  $p_k$ :s storlek och ett med tiden minskat värde av det tidigare estimatet. Förändringen av det tidigare estimatet avgörs i ekvation 3.3 av faktorn  $e^{-\gamma(t_k-t_{k-1})}$  som tar hänsyn till skillnaden i de båda paketens ankomsttider.

$$E^T(t_{k-1}) = c \sum_{i=1}^{k-1} M_i e^{-\gamma(t_{k-1}-t_i)} \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} E^T(t_k) &= c \sum_{i=1}^k M_i e^{-\gamma(t_k-t_i)} = \\ &= cM_k + c \sum_{i=1}^{k-1} M_i e^{-\gamma(t_{k-1}-t_i)} e^{-\gamma(t_k-t_{k-1})} = \\ &= cM_k + E^T(t_{k-1}) e^{-\gamma(t_k-t_{k-1})} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Exemplet med ekvationerna 3.2 och 3.3 redogör hur det exponentiella filtret, ekvation 3.1, beräknar ett nytt estimat genom att addera en nedvärderad version av det tidigare kända estimatet med det nyinkomna datapaketets storlek. För nästa inkommande datapaket genomförs estimeringen på samma sätt; en minskning av det tidigare estimatet adderas med inkommande pakets storlek.

## 3.2 Trafiklastbidrag från väntetid i kö

Nätet kan betraktas som ett återkopplat reglersystem som bygger på trafikestimaten. Om trafikestimaten inte överensstämmer med den verkliga trafiklasten kommer återkopplingen att bidra till felaktiga förändringar i resursfördelningen. I det fall trafikestimaten missbedömer en ökning i trafik får noden för lite sändningsmöjligheter och vid en missbedömning om en minskning delas för många tidluckor ut. Liknande problematik uppstår om regleringen sker för långsamt. Om en nod får för lite sändningsresurser kommer det att bildas en kö av icke sända datapaket i dess länkar. Med kunskap om hur snabbt datapaketet betjänas i länkarna och lämnar kön kan resursbehovet identifieras. Genom att införa ett kötidsestimat,  $E^Q$ , som multipliceras med trafikestimaten från det exponentiella filtret kan kompensation för tidigare felestimering av trafiken genomföras. Om kötiden är 0 finns ingen kö i länken och ett anländande datapaket kan omedelbart sändas vidare. I det fallet behövs ingen kompensering varvid trafikestimaten lämnas okorrigerat genom att kötidsestimaten sätts till 1. För övriga fall, då kötiden är större än 0, ska kötidsestimaten bidra till ett högre totalestimat d.v.s.  $E^Q > 1$ . Hur stor vikt kötiden inverkar på ett totalt estimat styrs av designparametern  $\alpha$ . Väntetiden innan sändning, kötiden, för det över länken senast sända datapaket är  $T_{last}^Q$ .

$$E^Q = 1 + \alpha T_{last}^Q \quad (3.4)$$

Beroende på valet av designparametern  $\alpha$  skapas en återkoppling som reagerar olika snabbt på kötidförändringar. Att använda ett stort  $\alpha$  gör det möjligt att snabbt sätta in resurser för att dämpa köbildningar men kan skapa nackdelar i form av att det återkopplade systemet blir instabilt.



### 3.3 Totalt estimat

Det totala estimatet för trafiklast i varje länk efter att  $n$  datapaket mottagits i länken är produkten av trafikbidraget och kötidsbidraget.

$$E = E^Q E^T(t) = \left(1 + \alpha T_{last}^Q\right) c \sum_{i=1}^{n(t)} M_i e^{-\gamma(t-t_i)} \quad (3.5)$$

Med en ökande kö ökar skillnaden mellan ankommet paket och senast sända paket. Skillnaden når sitt minimum när applikationen över en nod är avslutad och ingen kö finns kvar; då är senast sända paket också det senast mottagna.

### 3.4 Estimeringsmetodens designparametrar

Vid simuleringar på mobila ad hoc-nät används ett antal designparametrar. I kapitel 4 kommer en presentation av de de parametrar som styr det simulerade nätets egenskaper och i ekvation 3.5 introducerades  $\alpha$ ,  $c$  samt  $\gamma$  som avgör estimeringsmetodens agerande. Beroende på värderingsmetoderna som används vid anpassningen av estimeringsmetodens designparametrar kommer estimatet att variera med avseende på bl.a. reaktionstid och noggranhet.

#### 3.4.1 Normalisering och tidsfördröjning

För att generera ett relevant värde på trafiklasten som härrör från den direkta trafiken av data i en länk måste designparametrarna  $\gamma$  och  $c$  väljas. Parametern  $c$  är en normaliseringsfaktor som möjliggör en likvärdig skala för enheterna på var sin sida av likhetstecknet i ekvation 3.1. Förhållandet mellan designparametrarna  $c$  och  $\gamma$  kan åskådliggöras genom att utgå från en förenklad form av ekvationen för det exponentiella filtret. För lika stora datapaket,  $M$ , som ankommer i jämn takt med mellanrum  $\Delta t$  beräknas estimatet  $\lambda^*$ .

$$\lambda^* = c \sum_{i=1}^{\infty} M e^{-\gamma \Delta t i} = c \frac{M}{1 - e^{-\gamma \Delta t}} \quad (\Delta t > 0) \quad (3.6)$$

Målsättningen med estimeringen är att estimatet,  $\lambda^*$ , ska sammanfalla med den

verkliga trafiklasten,  $\lambda$ .

$$\lambda = \frac{M}{\Delta t} \quad (3.7)$$

$$\lambda^* = \lambda \quad (3.8)$$

Under förutsättning att sambandet 3.9 gäller kan  $c$  och  $\gamma$  beräknas genom insättning av ekvationerna 3.7 och 3.8 i ekvation 3.6.

$$1 - e^{-\frac{\gamma M}{\lambda}} \rightarrow \frac{\gamma M}{\lambda} \quad \text{då} \quad \frac{M}{\lambda} \rightarrow 0 \quad (3.9)$$

$$\lambda = c \frac{M}{\gamma \frac{M}{\lambda}} \quad (3.10)$$

$$\gamma = c \quad (3.11)$$

Uträkningarna 3.6-3.10 med resultatet i 3.11 är väl anpassat för applikationer med en kontinuerlig ström av datapaket, t.ex. taltrafik, medan metoden riskerar övervärdera applikationer med skurar av data, t.ex. filöverföring. Eftersom fokus under denna studie kommer att riktas mot talöverföring väljs fortsättningsvis ett värde på  $c$  som sammanfaller med  $\gamma$ .

Parametern  $\gamma$  påverkar hur mycket trafikestimatet i en länk ska värderas ner till följd av tidsfördröjning mellan två till länken inkommande datapaket. Att låta  $\gamma$  vara 0 innebär att alla datapaket värderas lika oberoende av när i tiden de anlät till länken. För  $\gamma = 0$  lämpar sig estimeringsmetoden bra för en konstant trafiklast men reagerar däremot mycket långsamt för varierad last. När  $\gamma$  är nollskiljt kommer datapaket som passerat länken med tiden att minska i värde och fokus för estimering kommer att ligga på i närtid anlända datapaket. Vid val av ett högt  $\gamma$  kommer estimatet att snabbt följa den verkliga trafiklasten men

riskerar att skapa en instabil återkoppling, i synnerhet vid kraftigt varierande trafiklast. En ytterligare nackdel med ett högt  $\gamma$ -värde är vid betraktande av nät som hanterar flera olika applikationer. För en betraktad applikation med låg utdatatakt i ett nät med andra applikationer med högre utdatatakt kan ett högt  $\gamma$ -värde skapa dåliga estimat. Detta till följd av att omgivande applikationer med hög utdatatakt driver upp den totala trafiklasten och höjer estimatet hastigt. Ett motiverat värde på designparametern  $\gamma$  kan erhållas efter simuleringar på ett nät som trafikeras av två typer av applikationer. Genom att låta de båda applikationerna vara olika till karaktären, t.ex. taltrafik och filöverföring, kan den ena betraktas som en störning för att den andra ska lyckas upprätthålla sin tjänstekvalitet. Ur resultatet av andelen lyckat genomförda talsessioner för varierande värden på  $\gamma$  i ett nät som även trafikeras av filöverföringar med hög utdatatakt under korta tidsintervaller kan ett bra  $\gamma$ -värde att väljas.

### 3.4.2 Timer

Eftersom estimeringsmetoden bara genomför estimering vid de tillfällen datapaket anländer till en länk kommer estimatören inte att upptäcka om trafiken på en länk upphör. Estimatoren kommer i detta skede att fortsätta returnera det senast kända estimatet vilket medför en felaktig resursfördelning. När trafiken på en länk upphör ska länkens estimat värderas ner exponentiellt enligt det angivna filtret. Hastigheten för minskningen av estimatet styrs av filtrets lutning, d.v.s. designparametern  $\gamma$ . För att utveckla estimeringsmetoden till att även identifiera när en trafikbelastning över en länk upphör införs en timer. Timerfunktionen bygger på att när inget datapaket har ankommit efter ett angivet tidsintervall,  $T_t$ , genomförs en estimering på trafiken i berörd länk. Även vid detta estimeringstillfälle används det exponentiella filtret enligt ekvation 3.1 med undantag från att inget datapaket ankommer d.v.s.  $M = 0$ . Det nya estimatet avtar med tiden enligt en exponentiell kurva. Estimeringen fortsätter stegvis enligt  $E_{t_n}^T$ ,  $n = \{1, 2, 3, \dots\}$ , med tidsmellanrummet  $T_t$ , så länge  $E^T > 0$  samt att inget nytt inkommet datapaket har detekterats.

$$\begin{aligned} E_{t_1}^T &= E^T e^{-\gamma(T_t)} \\ E_{t_2}^T &= E_{t_1}^T e^{-\gamma(T_t)} \\ &\vdots \end{aligned} \tag{3.12}$$

Beroende på tidsintervallet  $T_t$ :s värde kan en avslutad trafikbelastning upptäckas olika fort. Fördelen med en kort tidsintervall är möjligheten att snabbt identifiera förändringar i trafikbelastning och därmed snabbt påbörja exponentiell minskning av estimatet för att flytta resurser från ofrafikerade noder till mer trafikerade. Nackdelen med ett kort tidsintervall är risken att påbörja minskning av estimatet för tidigt, vilket kan inträffa om  $T_t$  är mindre än den över länken passerande applikationens utdatatakt. I denna studie kommer tidsintervallet för nedvärderingstimern anpassas efter antalet tidluckor per schemacykel, *protokollängden*, d.v.s. periodtiden för varje schemacykel.

### 3.4.3 Protokollängd

Valet av protokollängd avgör hur många tidluckor som totalt finns till förfogande för noderna under en schemacykel. För ett protokoll som ej tillämpar trafikutjämnning sammanfaller protokollängden med nodantalet. Vid målsättning att förändra resurstilldelningen kontinuerligt under nätets livslängd för att trafikutjämna krävs en protokollängd som är längre än nätets nodantal. Att använda långa protokollängder öppnar möjligheter för en noggrann fördelning av resurser mellan noder med varierande trafiklast. En ökning av protokollängden medför inte enbart fördelar. Protokollängden får ej bli längre än att en nod som enbart behöver en tidlucka per schemacykel ändå ska ha möjlighet att sända i nästföljande cykel utan att dess applikations tidsfördröjningskrav riskerar att överskridas. En ytterligare begränsning med långa protokollängder är att det blir en fördröjning mellan trafikestimeringens genomförande och användningen av dess information. Detta eftersom omallokeringen av tidluckor genomförs efter varje schemacykel. En stor tidsfördröjning innebär att inaktuell trafikinformation används vid resurstilldelning med dålig trafikutjämnning som följd.

Vid användning av en protokollängd som är fyra gånger nodantalet erbjuds protokollet tilldela ett flertal tidluckor till noder med högt trafikestimat; detta samtidigt som tidsintervallen mellan enstaka sändningar i varje schemacykel samt fördröjningen mellan estimering och uppdatering bedöms vara acceptabla.

### 3.4.4 Väntetid

Designparametern  $\alpha$  styr hur mycket en väntetid för datapaketet i länkarna ska påverka det totala estimatet. I sektion 3.2 konstaterades att alla väntetider  $T_{last}^Q > 0$  ska påverka trafikbidraget med en faktor större än 1. Ett rimligt tillvägagångssätt för att hitta det värde som ska summeras till 1, d.v.s.  $\alpha T_{last}^Q$ -värdet, är att använda den betraktade applikationens övre gräns för fördröjning,  $T_{Max}$ . Den övre tidsgränsen måste understigas för samtliga av applikationens datapaket på vägen från startnod till destinationsnod för att applikationen ska bedömas som godkänt genomförd. Genom att beräkna hur stor andel av den totalt tillåtna tidsfördröjningen som förbrukas i kö i en länk kan ett värde på ökningsfaktorn erhållas.

$$\alpha = \frac{1}{T_{Max}} \quad (3.13)$$

I ett kraftigt överbelastat nät kan det uppstå situationer där köerna i samtliga länkar växer, i händelse av detta kommer kötidbidragen i nätets länkar att skjuta i höjden. För att undvika den instabilitet som skapas av att kötidbidragen okontrollerat ökar det totala estimatet begränsas  $\alpha T_{last}^Q$ , vilket i sin tur bidrar till en begränsning av  $E^Q$ .

$$0 \leq \alpha T_{last}^Q \leq 1 \quad (3.14)$$

$$1 \leq E^Q \leq 2 \quad (3.15)$$

Begränsningarna i ekvationerna 3.14 och 3.15 är anpassade så att väntetiden maximalt kan uppvärdera trafikbidraget till det dubbla. Detta inträffar om kötiden för ett datapaket i en länk är likvärdig med  $T_{Max}$  och innebär att talöverföringen är misslyckad. Att tillåta en höjning av estimatet med mer än en fördubbling och därmed styra mer resurser till länkens nod bedöms olämpligt. Detta dels eftersom en av länkens talöverföringar är misslyckad och resurserna därmed kan användas bättre av andra noder, dels p.g.a. att en ytterligare ökning riskerar skapa instabiliteter i nätet.

### **3.4.5 Kommentar till värderingen av designparametrar**

De val av värderingsmetoder för att anpassa designparametrarna som använts under examensarbetet ska ingalunda betraktas som optimala. Det kommer dock konstateras att de är rimliga med avseende på att uppfylla studiens syfte; att identifiera prestandaförändringar i tidsmultiplext baserade mobila ad hoc-nät som återkopplas adaptivt med trafikestimatorn. I ett nästa steg, för vidare utveckling av trafikestimatorn, kan fokus riktas mot mer avancerade optimeringsmetoder för att identifiera de bästa värderingsmetoderna för de använda designparametrarna.

## Kapitel 4

# Förutsättningar för simulering

Detta kapitel syftar till att presentera simuleringsmjukvaran samt de förutsättningar och antaganden som skapar det simuleringsscenario som används för att konstatera trafikestimatores funktion. De referensprotokoll som tillämpas för jämförelser kommenteras kortfattat i kapitlets avslutning.

### 4.1 Länkmodell

Det simulerade nätet består av ett antal noder där varje nod kan upprätta samband med de övriga noderna via länkar. En länk existerar om den mottagna signaleffekten i en mottagande nod är tillräckligt stark i förhållande till nodens bruseffekt. Signalbrusförhållandet  $\Gamma_{ij}$  i noden  $v_j$  på länken  $link(i, j)$  från den sändande noden  $v_i$ , förutsatt att  $i \neq j$ , kan beräknas enligt ekvation 4.1 [1].

$$\Gamma_{ij} = \frac{PG_s G_m}{N_m L_{b_{ij}} R} \quad (4.1)$$

I ekvation 4.1 anger  $P$  den sändande nodens effekt; under simuleringarna antas samma effekt användas av alla noder. För nodernas isotropa antennförstärkning gäller att  $G_s$  är sändarnodens antennvinst och  $G_m$  är mottagarnodens antennvinst. Nämnarens variabler identifierar mottagarens bruseffekt, utbredningsdämpningen från sändare till mottagare och datatakt. Utbredningsdämpningen,  $L_{b_{ij}}$ , i en marknära terräng estimeras med vågutbredningsverktyget DetVag-90<sup>®</sup> [2].

## 4.2 Trafikadaptivitetsalgoritm

Totalestimatet på trafiklasten i varje länk hanteras av en i simuleringsmjukvaran implementerad trafikadaptivitetsalgoritm [5]. Genom att för samtliga noders utgående  $m$  länkar summera trafikestimatorns värden,  $E$ , erhålls ett värde som avspeglar nodens resursbehov.

$$\sigma = \sum_{i=0}^m E_i \quad (4.2)$$

Informationen om nodernas resursbehov används för tilldelning av tidluckor. Antalet tidluckor per schemacykel, protokollängden, begränsar intervallet mellan resursomfördelningar. Med ambition att undvika krav på orealistiskt långa uppdateringsmellanrum normaliseras nodernas resursbehov genom att identifiera den nod med det minsta resursbehovet,  $\sigma_{min} = \min\{\sigma_0, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_k\}$ . Det normaliserade resursbehovet,  $\hat{t}_j$ , för nod  $j$  kan beräknas enligt ekvation 4.3.

$$\hat{t}_j = \frac{\sigma_j}{\sigma_{min}} \quad (4.3)$$

För att omvandla nodernas beräknade resursbehov, som inte är heltal, till tidluckor används en tilldelningsalgoritm. I ett första steg beviljas varje nod en tidlucka. Fortsättningsvis stegas den resterande protokollängden igenom och varje tidlucka tilldelas den nod för vilken  $(\hat{t}_j - t_j)/\hat{t}_j$  är störst. Variabeln  $t_j$  anger det antal tidluckor nod  $j$  redan förvärvat. Trafikadaptivitetsalgoritmen utnyttjar protokollängden som en övre gräns för antalet tillgängliga tidluckor under förutsättning att protokollängden inte överstiger en för algoritmen angiven maxlängd. Om önskemålet av tidluckor är uppfyllt för alla noder, d.v.s.  $(\hat{t}_j - t_j) < 0,5 \forall j$ , avbryts schemacykeln och en ny tar vid.

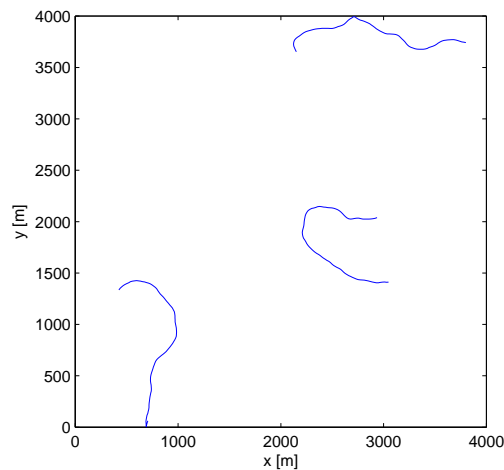
## 4.3 Routing

Det routingprotokoll som används under simuleringarna väljer det alternativ som minimerar antalet hopp mellan startnod och destinationsnod. I ett fall där flera möjliga vägar med likvärdigt antal hopp finns kan valet av alternativen betraktas som slumpmässigt.



## 4.4 Mobilitet

För att generera nodernas rörelse används en modell där noderna förflyttas slumpvis i en kvadratisk låda. I det första tidssteget tilldelas varje nod slumpvisa x- och y-koordinater i en begränsad låda samt en rörelseriktning. Rörelsen är markbunden och medför att nodernas z-koordinat sammanfaller med topologin för en i lådan underliggande kartbild. Med tiden förändras nodernas riktning i nätet oberoende av varandra och med konstant hastighet [12]. Om en nod krockar med lådans rand returneras den som en boll i en oelastisk stöt. Figur 4.1 illustrerar rörelsen för tre noder i ett mobilt ad hoc-nät.

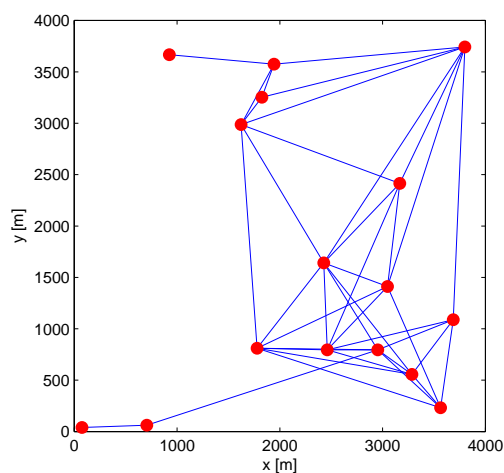


Figur 4.1: Rörelser för tre noder under en 100 s lång simulering.

## 4.5 Scenario

Det simulerade mobila ad hoc-nätet består av 16 noder som rör sig med hastigheten 20 m/s i ett 4 x 4 km stort område med en rörelse enligt beskrivningen i sektion 4.4. Två värden på nätets konnektivitet används: 95% och 100%. Detta innebär i det första fallet att varje nod har samband med de övriga noderna, direkt eller via hopp, under minst 95% av nätets simuleringstid. En konnektivitet

på 100% medför att noderna alltid har samband med varandra. Figur 4.2 visar ett exempel på hur noderna kan vara placerade i ett mobilt ad hoc-nät med 95% konnektivitet vid en tidpunkt under nätets livslängd. Befintliga länkar är i figuren markerade med blått.



Figur 4.2: Positioner för noderna samt dess länkar i ett nät med 95% konnektivitet.

Varje simulering varar under 3600 s. Den applikation som betraktas är utformad så att den överensstämmer med fördröjningskraven för talöverföring,  $T_{Max} = 0.15$  s, enligt International Telecommunication Union [7]. Talkommunikationen förmedlas från en sändande nod till en mottagande nod. Vägen mellan startnod och destinationsnod kan vara direkt eller via reläande mellanliggande noder och styrs av det i sektion 4.3 angivna routingprotokollet. Ankomstintensiteten för talsessionerna i nätet styrs av en poissonprocess och talsessionernas varaktighet är exponentialfördelade med väntevärde 10 s. Det är samma sannolikhet för nätets noder att bli start- eller destinationsnod. En högre trafikbelastning i nätet erhålls genom att medelantalet av pågående talsessioner/s ökas, d.v.s. ankomstintensiteten ökas. Den korta sessionslängden, 10 s, beror på att en talsession inte får uppta för stor del av den totala simuleringslängden. Genom att

använda en kort sessionslängd i förhållande till simuleringstiden reduceras korrelationen. För att använda längre talsessioner krävs längre simuleringar vilket innebär orimligt långa simuleringstider.

Datatakten över nätets länkar är 1 Mbps. Storleken på ett datapaket antas vara 256 bitar och applikationens utdatatak 12.2 kbps; värden som är i samma storleksordning som talöverföring i GSM-standard [4]. Längden på en tidlucka har anpassats så att den rymmer ett datapaket samt ett avslutande kort säkerhetsintervall på  $1 \cdot 10^{-5}$  s som lämnas tomt för att förhindra kollisioner. Dessa förutsättningar bidrar till att tiden för en tidlucka är  $T_s = 2.66 \cdot 10^{-4}$  s.

$$\frac{256}{1 \cdot 10^6} + 1 \cdot 10^{-5} = 2.66 \cdot 10^{-4}[\text{s}] \quad (4.4)$$

Uppdateringstakten för resurstilldelningen är begränsad till att genomföras en gång per protokollängd och tröskelvärdet mellan nytt och gammalt estimat är 0, d.v.s. alla estimatförändringar utgör grund för resurstilldelning. Tiden för  $T_t$  är ansatt till tiden för en protokollängd; inkommer inget datapaket under en protokollängd påbörjas minskning av estimatet.

Vid simulering av blandad trafik införs en störande applikation som sänder stora mängder data skurvis. Detta sker med hög utdatatak och skapar momentana dataskurar om 122000 bitar, och kan väl identifieras med filöverföringar. Ankomstintensiteten av de störande applikationerna styrs likt talapplikationerna av en poissonprocess.

## 4.6 Referensprotokoll

För att kunna identifiera prestandaförändringar för mobila ad hoc-nät som tilldelas sändningsmöjligheter enligt estimatorprotokollet, d.v.s. efter de data som trafikestimatorn genererat, används två andra TDMA-protokoll som referenser. Det ena är ett traditionellt TDMA-protokoll där alla noder tilldelas en tidlucka att sända i för varje schemacykel. I detta protokoll genomförs ingen trafikadaptering; ingen hänsyn tas till eventuellt centralt placerade noder. Det andra protokollet som betraktas är ett teoretiskt TDMA-protokoll av optimal, med avseende på väntetider, karaktär. Protokollet tilldelar alltid den kommande tidluckan till

den nod som har det datapaket som väntat längst tid på att få bli sänt. Det bästa möjliga resultatet genereras men metoden kan ej tillämpas i praktiken eftersom den kräver en central sammanställning av nodernas köer för att identifiera den nod med längst kötid.

En prestandaförbättring definieras av att andelen godkänt genomförda talsessioner för estimatorprotokollet överstiger andelen godkända för det traditionella TDMA-protokollet. Det optimala TDMA-protokollet används för att simulera den teoretiska övre gräns för den andel godkänt genomförda talsessioner ett TDMA-protokoll kan uppnå när antalet pågående talsessioner ökas.

## Kapitel 5

# Anpassning av designparametrar

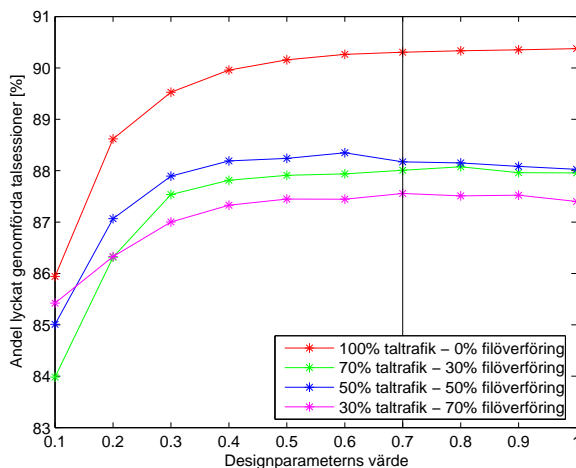
För att returnera relevanta värden på ett ad hoc-näts trafiklast krävs numeriska värden på estimeringsmetodens designparametrar. Med utgångspunkt från de värderingsmetoder som presenterades i sektion 3.4 används i detta kapitel simuleringar för att anpassa designparametrarna.

### 5.1 Anpassning av $\gamma$

I syfte att motivera värdet på designparametern  $\gamma$  simuleras stigande  $\gamma$ -värde för fyra olika trafiksituationer enligt tillvägagångssättet som föreslogs i sektion 3.4.1. De trafiksituationer som används är trafik enbart bestående av talsessioner, talsessioner i 70% av trafikmängden, talsessioner i hälften av all trafik samt talsessioner i 30% av nätets trafikmängd. Trafiksituationerna skapas genom att hålla det totala antalet överförda bitar konstant men variera den inbördes fördelningen mellan tal- och filöverföring. Eftersom fokus riktas mot talsessionerna tilldelas de en högre prioritet än filöverföringen; detta innebär att datapaket som ingår i talsessioner betjänas före datapaket från filöverföringar i noderna.

I figur 5.1 presenteras hur stor andel av de startade talsessionerna som genomfördes med lyckat resultat för de olika trafiksituationerna givet ett ökat värde på  $\gamma$ . Ur resultatet framkommer några intressanta tendenser. Förutom för myc-

ket låga värden på  $\gamma$  är skillnaderna små mellan designparameterns värde inom intervallet  $0.1 \leq \gamma \leq 1$ . I de fall där taltrafik dominerar stiger andelen godkänt genomförda talsessioner med ökat  $\gamma$ -värde för att plana ut vid  $\gamma = 0.5-0.8$ . Maxvärdet för trafiksituationer med lägre andel talapplikationer inträffar för lägre  $\gamma$  än i trafiksituationer med högre andel talapplikationer. Avslutningsvis kan det konstateras att andelen godkänt genomförda talsessioner blir lägre när båda trafiktyperna förmedlas i nätet. Försämringen kan antas vara en följd av att filöverföringens höga utdatatakt har en störande effekt på trafikestimatören. Utifrån dessa resultat samt valet att betrakta nät med kommunikation som domineras av talapplikationer fastställs värdet på  $\gamma$  till 0.7 inför vidare simuleringar.



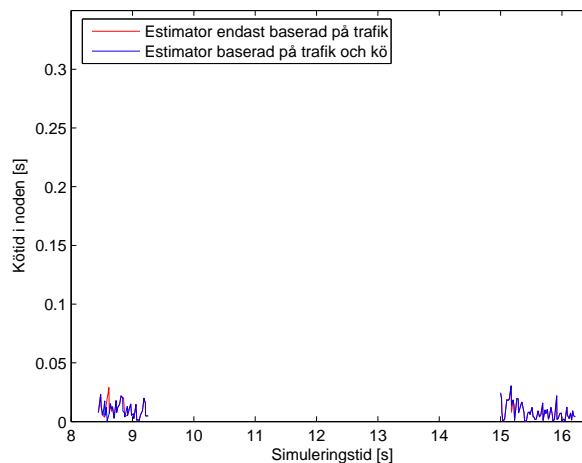
Figur 5.1: Andelen lyckat genomförda talsessioner för olika trafiksituationer och varierande  $\gamma$ .

## 5.2 Identifiering av köer

För att åskådliggöra lämpligheten i valet av metod för att värdera in väntetider i det totala estimatet visas i figurerna 5.2 och 5.3 hur kötiderna förändras med och utan hänsyn till väntetidsmetoden. Metoden, som beskrevs i detalj i sektion 3.4.4, grundar designparametern  $\alpha$ :s värde på hur stor del av den tillåtna

tidsfördröjningen som förbrukats. Förutom värdet på designparametern säkerställer metoden att väntetiden maximalt kan värdera upp trafiklastbidraget till det dubbla.

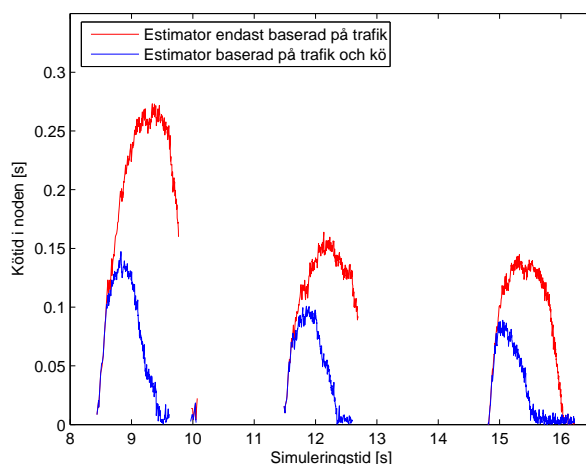
Figur 5.2 visar kösituationen i en betraktad nod i ett mobilt ad hoc-nät som i medeltal belastas med 20 talsessioner/s. Den korta tiden, ungefär 1 s per belastningstillfälle, indikerar på att noden inte överför en hel talsession utan stundtals intar en reläande funktion. Vid denna trafikbelastning uppstår få köer och den tid som datapaket väntar i kö är kort. För de över noden passerande talsessionerna erhålls endast små förbättringar av köväntetiderna när metoden för invägning av väntetid används.



Figur 5.2: Kötid för datapaketerna i en nod när nätet belastas med 20 talsessioner/s.

Kösituationen i samma nod när nätet i medeltal belastas med 40 talsessioner/s är annorlunda; flera talsessioner pågår samtidigt och köer uppstår med väntetider för datapaketerna som följd. Ur figur 5.3 framgår tydligt att metoden för att väga in väntetider i totalestimatet ger en sänkning av kötiden i den betraktade noden. De talsessioner som varar mellan 11.5-13 s existerade inte i figur 5.2 och uppkommer p.g.a. den ökade trafikbelastningen. Av resultatet från simuleringar

med två olika trafikbelastningar kan det konstateras att köer uppstår i mobila ad hoc-näts noder när antalet samtidigt pågående talsessioner/s ökar från 20 till 40. Vidare framgår att köväntetiden i nätets noder vid högre trafikbelastningar effektivt kan minskas med den föreslagna metoden.



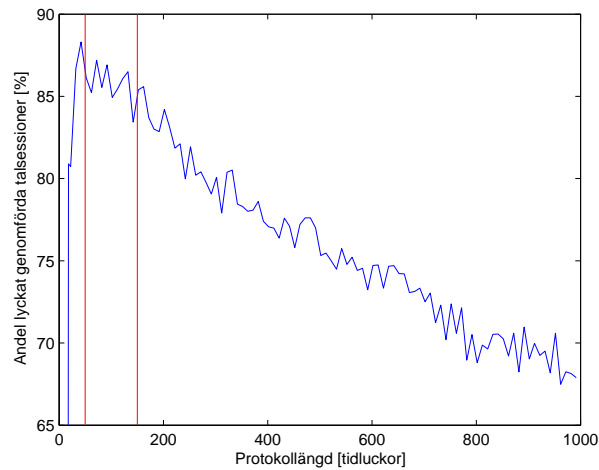
Figur 5.3: Kötid för datapaketet i de talsessioner som passerar en nod när det mobila ad hoc-nätet belastas med 40 talsessioner/s. Samma nod betraktas som i fallet med lägre trafikbelastning.

### 5.3 Uppdateringsfördröjning

I sektion 3.4.3 uppmärksammades risken att långa protokollängder kan leda till resultatförsämringar p.g.a. långa sändningsmellanrum och fördröjningar i uppdatering. Figur 5.4 visar hur andelen lyckat genomförda talsessioner påverkas när protokollängden för estimatorprotokollet ökas i ett nät med ett medeltal av 20 talsessioner/s. Ur figuren framgår tydligt att det är befogat att undvika långa protokollängder. Det bästa resultatet uppnås för en protokollängd med 42 tidluckor men undviks med fördel ty maxpunkten ligger mycket nära det område där resultatet hastigt försämras. För att minimera risken att använda en för kort protokollängd och samtidigt inte skapa för långa fördröjningar är en protokollängd



## 5.3. Uppdateringsfördröjning



Figur 5.4: Andelen lyckat genomförda talsessioner vid varierande protokollängder

i intervallet 50-150 tidluckor lämplig. De båda vertikala linjerna i figur 5.4 markerar intervallet. Förslaget från sektion 3.4.3 med en protokollängd fyra gånger större än det betraktade nätets nodantal, som i angivet scenario blir  $4 \cdot 16 = 64$ , förefaller i resonemanget kring figur 5.4 motiverat. För 64 tidluckor blir tiden för en protokollängd  $T_p = 64 \cdot 2.66 \cdot 10^{-4} = 0.017$  s.

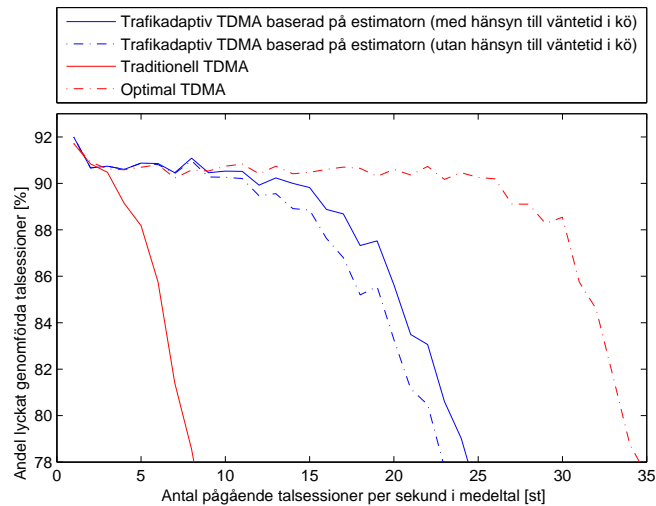
## Kapitel 6

# Resultat

Detta kapitel presenterar resultat från simuleringar på mobila ad hoc-nät med 16 noder. Kapitlet avser besvara frågan om trafikestimatorn kan skapa en återkoppling som bidrar till att antalet lyckade applikationer i mobila ad hoc-nät ökar.

### 6.1 Prestandajämförelser

Efter konfirmering av numeriska värden på designparametrarna  $\gamma$ ,  $\alpha$  samt protokollängden kan trafikestimators data användas för trafikutjämning av TDMA-baserade mobila ad hoc-nät. I figur 6.1 demonstreras resultatet från simuleringar på ett nät med 95% konnektivitet för estimatorprotokollet jämfört med traditionell TDMA. I figuren finns även resultatet från det optimala TDMA-protokollet som visar en simulerad teoretisk övre gräns för andelen godkända talsessioner för ett TDMA-protokoll. Resultatet av simuleringarna påvisar en tydlig prestandaförbättring när estimatorprotokollet används i förhållande till när ett traditionellt TDMA-protokoll används.



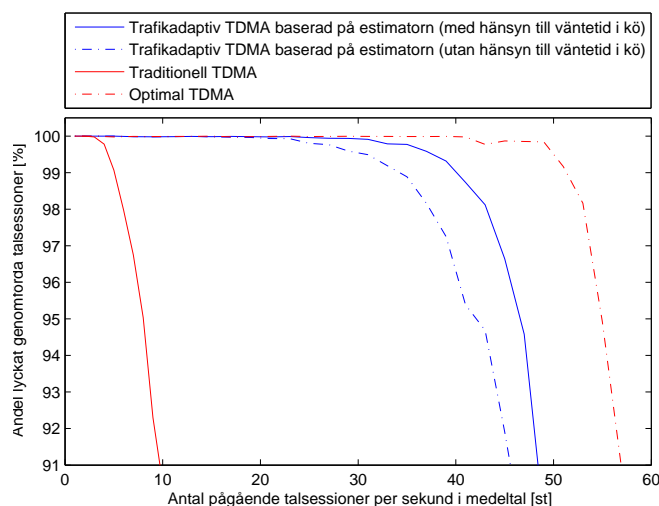
Figur 6.1: Prestandajämförelse. Mobilt ad hoc-nät, 95% konnektivitet, 16 noder.

Den stora prestandaförbättringen till trots finns det anledning att reflektera över skillnaden mellan estimatorprotokollet och den optimala resursfördelningen. Anledningen till att estimatorprotokollet inte ytterligare närmar sig det optimala TDMA-protokollet finns i de båda protokollens implementation. Estimatorprotokollet sänder i upp till en protokollängd innan resurstilldelningen förhandlas om. I det optimala fallet finns ingen protokollängd utan en förhandling om resurserna genomförs innan varje tidlucka. Genom att ständigt omförhandla blir protokollet optimalt med avseende på väntetider eftersom det alltid tilldelar kommande tidlucka till den nod med det datapaket som väntat längst. Till följd av denna resursfördelning minimerar det optimala protokollet antalet misslyckade talsessioner. Anledningen till att estimatorprotokollet inte är implementerat enligt samma modell och således inte heller på ett rättvist sätt kan jämföras med det optimala TDMA-protokollet är att varje förhandlingstillfälle i ett verkligt nät förbrukar resurser. Simuleringsmjukvaran tar, som nämndes i sektion 1.4, ej hänsyn till denna resursåtgång. I ett verkligt nät skulle det inte finnas tillräckligt med resurser för att ofta genomföra förhandling vilket innebär att användning av det optimala protokollet är praktiskt ogenomförbart.

Ingen av protokollen uppnår till 95% genomförda talsessioner som är maxvärdet

i ett nät med 95% sammanbundenhet. Anledningen till detta är att det krävs sammanbundenhet mellan startnod och destinationsnod under hela den pågående talsessionen; eftersom sessionernas längd i medeltal är 10 s och inget avbrott tillåts under denna tid är det svårt att upprätthålla 95%-kravet för de startade talsessionerna trots att nätet under simuleringstiden är sammanbundet till 95%.

I figur 6.2 redogörs samma prestandajämförelse för ett nät med 100% konnektivitet. Även i detta fall erhålls en tydlig prestandaförbättring.



Figur 6.2: Prestandajämförelse. Mobilt ad hoc-nät, 100% konnektivitet, 16 noder.

När nätet är sammanbundet under hela simuleringens längd finns det alltid en väg mellan startnod och destinationsnod. Eftersom det aldrig uppstår avbrott i kommunikationen kan maxvärdet 100% godkänt genomförda talsessioner upprätthållas för låga trafikbelastningar. I ett sammanbundet nät beror samtliga misslyckade talsessioner på att tidsfördröjningskravet inte upprätthålls. Tidsfördröjning orsakas av tiden det tar för datapaketet att transporteras mellan startnod och destinationsnod och är direkt kopplad till hur många omsändningar som krävs för att datapaketet ska nå sitt slutgiltiga mål. I sammanbundna nät finns under den största delen av nätets livslängd länkar mellan samtliga noder och

## 6.2. Estimering vid flera trafiktyper

---

nätstrukturen blir av enhoppsmodell. Innebörden av detta är att endast en sändning krävs för att ett datapaket ska nå sin slutgiltiga destination. Att antalet omsändningar i reläande noder minimeras och oftast är obefintliga medför att antalet samtidigt pågående talsessioner kan vara betydligt fler än för nät med lägre konnektivitet. I fallet med 95% konnektivitet bildas flerhopsnät med omsändningar för datapaketerna. Färre möjliga simultana talsessioner blir en följd. Skillnaden mellan de båda nätkonnektiviteterna åskådliggörs vid jämförelse av figur 6.1 och figur 6.2.

Noterbart är att förbättringen till följd av hänsyn till väntetid i kö är större när nätets sammanbundenhet ökar. En förklaring till detta kan diskuteras utifrån att återigen använda resonemanget med omsändningar i flerhopsnät. När andelen godkänt genomförda talsessioner för nätet med 95% sammanbundenhet tydligt börjar minska, vid 20 sessioner/s, uppstår köer i de mest trafikerade noderna. Estimaterna på trafiklast i noderna ökar och trafikutjämning påbörjas i riktning mot att tilldela de mest trafikerade noderna ytterligare resurser till pris av att mindre trafikerade noders resurser minskas. De längsta köerna dämpas och de talsessioner som har en rutt som passerar dessa noder får kortare tidsfördröjning. Eftersom flertalet talsessioner har rutter med fler än ett hopp riskerar dess datapaket ändå att bli placerad i kö i en annan nod, t.ex. i en nod vars resurser minskats i förmån för en mer belastad. Nettoeffekterna av kötidförändringarna för talsessioner med många hopp riskerar därför att bli små. I enhoppsnätet börjar andelen godkänt genomförda talsessioner minska drastiskt vid 40 sessioner/s; trafikutjämning i detta läge medför kortare väntetider i de noder med längst kötider. Eftersom enhoppsnät inte kräver omsändningar kan förbättringen i enskilda noder synas tydligare i resultatet.

## 6.2 Estimering vid flera trafiktyper

Estimatorns förmåga att klara resursfördelning i nät med fler applikationer än enbart talöverföring kan undersökas genom att variera trafiksituationen i det simulerade nätet. En varierad trafiksituation kan bestå av en andel talöverföring och en andel störande filöverföring liknande den trafiksituation som användes för anpassning av  $\gamma$  i sektion 5.1. Även i detta fall tilldelas talöverföring högre prioritet än den störande filöverföringen. De trafiksituationer som används är:

enbart talöverföring, två tredjedelar talöverföring tillsammans med en tredjedel filöverföring samt likförmigt fördelad trafik mellan de båda applikationerna. Genom att öka totaltrafiken för de olika trafiksituationerna kan jämförelser av när andelen lyckat genomförda talsessioner understiger 85% användas för att åskådliggöra effekten av störande applikationer. I de blandade trafiksituationerna startas inte lika många talsessioner som i fallet med enbart talöverföring; antalet startade är två tredjedelar respektive hälften i jämförelse med antalet startade för enbart talöverföring. Som utgångspunkt för jämförelser används antalet samtidigt pågående talsessioner/s som uppfyller 85%-kravet för enbart talöverföring. Om filöverföringen inte har en negativ inverkan på trafikestimeringen ska antalet samtidigt pågående talsessioner/s som uppfyller 85%-kravet för de blandade trafiksituationerna minska till 66% respektive 50% av antalet uppfyllda samtidigt pågående talsessioner/s för enbart talöverföring. En minskning under dessa värden tyder på att trafikestimern påverkas negativt av filöverföringarna.

Tabell 6.1 visar de effekter som uppstår p.g.a. störande filöverföringar. Ur tabellen framgår tydligt att en störande applikation försämrar nätets möjlighet att upprätthålla hög tjänstekvalitet för talöverföring. Orsaken till försämringen uppstår som en följd av att trafikestimern, som är utformad för att passa talöverföringens villkor, uppskattar den totala trafiken i nätets noder oberoende av applikationstyp. För en filöverföring är utdatatakten hög när en skur av data transporteras mellan nätets noder. Estimern upptäcker då en stor förändring av trafiken i de berörda länkarna och höjer estimaten hastigt. Eftersom estimaterns trafikuppskattningar utgör grund för resurstilldelning medför denna höjning av estimaten att de noder som passeras av filöverföringen får ökade resurser. När filöverföringen avslutas upptäcker estimern att trafikförhållandet har förändrats och påbörjar en minskning av estimaten enligt timerfunktionen; dock passerar lång tid innan noder med avslutad filöverföring estimeras som ofrafikerade till följd av den föregående dataskurens höga utdatatakt. Dessa noder, som inte längre trafikeras, estimeras därför fortfarande högt och blir tilldelade resurser som inte kommer att användas. Detta till ett pris av andra noder i nätet, som förmedlar taltrafik med lägre utdatatakt, får minskade resurser.

Trafiksituation	Pågående talesessioner/s [st]	%
Enbart tal	20.3	100
Två tredjedelar tal	9.6	47.1
Hälften tal	7.0	34.6

Tabell 6.1: Minskning av antalet talesessioner/s som samtidigt kan pågå i ett mobilt ad hoc-nät med en bibehållen godkändnivå över 85% när störande filöverföringar sänds i nätet.

Det kan konstateras att trafikestimeringssmetoden som används ämnar sig bra för trafikestimering i mobila ad hoc-nät som trafikeras av enbart en applikation. Däremot uppstår försämringar när estimering genomförs på nät med olika applikationer. Genom att vidareutveckla trafikestimern till att identifiera olika applikationstyper skulle problematiken med störningar i estimeringen kunna minskas. Om trafikestimern kan anpassa sitt agerande beroende på vilken applikation som detekterats kan varierande applikationers trafik viktas olika i det totala trafikestimern. Exempelvis skulle trafikestimern kunna tillämpa två varianter av timerfunktionen; en betydligt snabbare minskning av filöverföring i förhållande till den minskning som används för talöverföring. Med dessa förändringar i trafikestimeringssmetoden skulle resurserna i högre grad kunna tilldelas de mest prioriterade applikationerna.

## Kapitel 7

# Slutsatser

Examensarbetet visar att en trafikestimator med två estimeringsparametrar, exponentiellt filter och väntetider i kö, kan generera relevanta värden på trafikbelastningen i mobila ad hoc-nät. Det exponentiella filtret skapar ett trafikestimat genom att länkvis addera nyligen inkomna datapaket till det med tiden nedvärderade tidigare kända estimatet. Det estimeringsfel som uppstår i filtret motverkas effektivt av att datapaketens kötider i nätets länkar används för att höja trafikestimatet.

I en jämförelse mellan ett traditionellt TDMA-protokoll och ett TDMA-baserat protokoll som fördelar de tillgängliga nätresurserna enligt trafikestimatorns värden uppstår prestandaförbättringar. Med prestandaförbättringar avses andel godkänt genomförda talsessioner i mobila ad hoc-nät. Vid en kravnivå på att upprätthålla 85% av talsessionerna i ett mobilt ad hoc-nät med 95% konnektivitet mer än tredubblas antalet talsessioner som samtidigt kan pågå i nätet vid användande av återkoppling med trafikestimatorn. Vid liknande jämförelser i ett fullständigt sammanbundet mobilt ad hoc-nät uppvisas nästan fem gångers förbättring.

I studien har den negativa påverkan från overheadtrafik inte kunnat betraktas. Detta innebär att förväntningarna på resultatet i ett verkligt scenario inte kan ställas lika högt.

De positiva effekterna av att trafikutjämna mobila ad hoc-nät baserat på trafik-



estimatorns uppskattningar minskas om fler än en applikationstyp tillåts i det betraktade nätet. Försämringarna beror på att de estimat som genereras avspeglar nätets noders totala trafikbelastning, värden som till stor del avgörs av applikationernas utdatatakter.

## Kapitel 8

# Förslag för vidare forskning

I detta kapitel föreslås några forskningsområden som dels kan förbättra den trafikestimater som arbetats fram under detta examensarbete samt dels bredda kunskaperna om trafikhantering i ad hoc-nät.

### 8.1 Tillgänglighetsstyrning

För att på ett effektivt sätt hantera flera olika tjänster krävs reglering av tillgängligheten i nätet. Genom att införa en *tillgänglighetsstyrning* kan de begränsade nätresurserna tilldelas tjänster efter prioritetsordning. Finns kunskap om ett näts lediga kapacitet samt dess trafiklast kan beslut fattas om en ny session ska tillåtas i nätet eller ej. Om en högt prioriterad tjänst avser använda nätet när tillräckliga resurser saknas bör en lägre prioriterad tjänst avbrytas. Genom att införa estimering på kvarvarande resurser i syfte att bara tillåta det antal sessioner som kan förmedlas utan att nätet blir överbelastat finns möjligheter till prestandaförbättringar.

### 8.2 Spatiell tidsmultiplex

Spatiell tidsmultiplex (STDMA) är en generalisering av ett tidsmultiplext protokoll för nät med reläande noder. Till skillnad från det klassiska TDMA-protokollet där enbart en nod åt gången tilldelas sändningsmöjligheter tillåter STDMA-protokollet att flera noder sänder samtidigt [8]. För att säkerställa att även detta

protokoll är kollisionsfritt, d.v.s. att sänd data inte kan kollidera och samman-smälta till en oanvändbar kombination i den mottagande noden, tillåts bara noder med stort inbördes geografiskt mellanrum sända under samma tidlucka. Vid användning av STDMA har prestandaförbättringar påvisats för vissa strukturer av ad hoc-nät [6].

### **8.3 Kända applikationer**

För att fördela resurserna på bästa sätt eftersträvas ett så bra trafikestimat som möjligt. Genom att identifiera kända applikationer som t.ex. taltrafik och fil-överföring kan dessa applikationers kända utdatatacter användas för att beräkna trafiklasten i en länk som passeras av överföringen. Estimering behöver då bara göras för okända applikationer vilket bidrar till att minska felkällan i de värden som utgör grund för resurstilldelning. Genom att utnyttja kända applikationer kan dessutom de störande effekter som presenterades i sektion 6.2 minskas.

### **8.4 Optimering av designparametrar**

För att uppnå större prestandaförbättringar med estimatorprotokollet kan mer avancerade optimeringsmetoder användas för att anpassa trafikestimatorns designparametrar.

# Litteraturförteckning

- [1] L Ahlin, C Frank och J Zander. *Mobil radio kommunikation*, sida 122–131. Studentlitteratur, 1995.
- [2] B Asp, G Eriksson och P Holm. DetVag90<sup>®</sup> - Final report. Försvarets Forskningsanstalt, Avdelningen för Ledningssystemteknik, Linköping, Vetenskaplig rapport, FOA-R-97-00566-504-SE, 1997.
- [3] M Blomgren. Scheduling for TDMA ad hoc networks based on traffic estimation and queue length reports. Examensarbete, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, ISRN KTH/RST/R-05/07-SE, 2005.
- [4] European Telecommunication Standards Institute. *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Enhanced Full Rate (EFR) speech transcoding; (GSM 06.60 version 8.0.1 Release 1999)*. ETSI EN 300 726 v8.0.1, Nov 2000.
- [5] L Farman, U Sterner och O Tronarp. Analysis of capacity in ad hoc networks with variable data rates. Teknisk rapport, Totalförsvarets Forskningsinstitut, Avdelningen för Ledningssystem, Linköping, FOI-R-0928-SE, 2003.
- [6] J Grönkvist. Spatiell tidsmultiplex - algoritmer och utvärdering. Teknisk rapport, Försvarets Forskningsanstalt, Avdelningen för Ledningssystemteknik, Linköping, FOA-R-98-00781-504-SE, 1998.
- [7] International Telecommunication Union. *One-way transmission time*, 2003. ITU-T G.114.

- 
- [8] L Kleinrock och R Nelson. Spatial TDMA: A collision-free multi-hop channel access protocol. *IEEE Transactions on Communications*, 33(9):934–944, 1985.
  - [9] S Mushabbar Sadiq. Traffic estimation in mobile ad-hoc networks. Examensarbete, Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, 2004.
  - [10] T Robertazzi och J Shore. Traffic sensitive algorithms and performance measures for the generation of self-organizing radio network schedules. *IEEE Transactions on Communications*, 41(1):16–19, 1993.
  - [11] O Somarriba. Analysis of capacity for spatial TDMA in wireless ad hoc networks with variable power and rate control. I *Vehicular Technology Conferance*, årgång 2, sida 906–910, 2006.
  - [12] U Sterner och E Johansson. Reactive routing in tactical radio networks. Teknisk rapport, Försvarets Forskningsanstalt, Avdelningen för Lednings-systemteknik, Linköping, 2000. Sida 17-18.





FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1350 anställda varav ungefär 950 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    Tel: 013-37 80 00    [www.foi.se](http://www.foi.se)  
Box 1165    Fax: 013-37 81 00  
581 11 LINKÖPING