

## **Rutemetriker i MANET**

Erlend Larsen

Forsvarets forskningsinstitutt (FFI)

27. september 2012

FFI-rapport 2012/01318

117501

P: ISBN 978-82-464-2135-3

E: ISBN 978-82-464-2136-0

## **Emneord**

MANET

Mobilitet

Ruting

Metrikker

## **Godkjent av**

Torunn Øvreås

Prosjektleder

Anders Eggen

Avdelingssjef

## Sammendrag

Med IP som felles grensesnitt har man i større grad enn tidligere mulighet til å kommunisere ende-til-ende gjennom flere ulike nettverksteknologier, også på taktisk nivå. Ulike radioteknologier gir ulike egenskaper, noe som kan føre til håndteringsutfordringer, men som også kan representere økt fleksibilitet.

Rutingavgjørelser i homogene Mobile Ad hoc NETtverk (MANET) (nettverk basert på én linkbærer) tas i stor grad basert på antall hopp til destinasjon. I trådbaserte nettverk, hvor tjenestekvaliteten gjennomgående er høy, er denne metrikken i mange tilfeller bra nok. I radiobaserte nettverk kan det imidlertid være tilfeller hvor andre metrikker også burde tas hensyn til.

Heterogene MANET søker å utnytte radionettverkene til å gi transparente IP-lagsbaserte kommunikasjonstjenester på tvers av nettverkene. Med heterogene nettverk kommer også sterkere behov for å kunne velge mellom ruter med forskjellige egenskaper. Rutingavgjørelsen må gjøres av rutingprotokollen, for på høyere lag ser man kun de allerede avgjorte rutene til destinasjonen. Rutemetrikker er informasjonsverktøyet rutingprotokollen kan bruke for å vurdere ruter opp mot hverandre.

I denne rapporten går vi gjennom utfordringer med å bruke antall hopp som eneste rutemetrikk, og gir eksempler på andre rutemetrikker som er i bruk i ad hoc nettverk. I rapporten drøftes det også ulike betraktninger rundt bruk av andre rutemetrikker enn antall hopp.

## English summary

Employing IP as a common connecting protocol has enabled end-to-end communication across several different network technologies, even at the tactical level. Different radio technologies have different properties, which can pose challenges, but which can also represent increased flexibility.

The number of hops to the destination is the most common routing decision metric in homogeneous MANETs (networks based on one type of link carrier). In wire-based networks, where the QoS overall is very good, with more than enough capacity, this metric is in most cases acceptable. In radio-based networks, however, there may be cases where other metrics also ought to be employed.

Heterogeneous MANETs seek to exploit the radio networks to provide transparent IP-layer-based communication across networks. The introduction of heterogeneous networks also creates a more pronounced desire to be able to choose between routes with different characteristics. The routing decision must be made by the routing protocol, as higher layers see only the already determined routes to the destination. The routing metric represents the information tool that routing protocols can use to assess routes against each other.

In this report, the challenges of using the number of hops as the only routing metric are addressed, and examples are given of other routing metrics employed in ad hoc networks. Various considerations when using other routing metrics besides the number of hops, are also discussed in the report.

## **Innhold**

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Litteratur</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Hva er rutemetriker?</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Minimum antall hopp</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Tilpasning av rutingprotokollen</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>ETX</b>	<b>18</b>
<b>7</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>20</b>
<b>8</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>21</b>
	<b>Referanser</b>	<b>22</b>
	<b>Forkortelser</b>	<b>25</b>



## 1 Introduksjon

Denne rapporten beskriver studier som er utført som en del av FFI prosjekt 1175, "Gjennomgående kommunikasjon for operative enheter". Et viktig fokusområde i prosjekt 1175 er å studere Mobile Ad hoc NETtverk (MANET)-relaterte problemstillinger for å støtte Quality of Service (QoS) i taktiske militære nettverk.

MANET ansees som godt egnet for militære operasjoner i områder uten eksisterende infrastruktur. Kjøretøysmonterte taktiske rutere (MANET-noder) med både ett og flere radiogrensesnitt har blitt testet gjennom flere eksperimenter [1]. En av de viktigste lærdommene fra disse eksperimentene var at bredbåndsradioser med korttrekkende kommunikasjonslinker (mindre enn 1000 m rekkevidde i åpent terreng) får alvorlige problemer med stabilitet når kjøretøyene beveger seg gjennom skogsterreng. Avhengig av fri sikt brytes linkene hver gang trær eller terreng kommer i mellom, og kommer opp igjen like etterpå. Dette induserer store topologiforandringer som er krevende for rutingprotokollen å arbeide med. Noen rutingprotokoller vil i dette tilfellet svare med høyere trafikkpåtrykk for å forsøke å holde seg oppdaterte. Samtidig vil nyttetraffikken oppleve stor grad av loops, retransmisjoner og tapte pakker. I slike situasjoner kan man tenke seg at linker som opplever stor grad av fluktuering ikke bør benyttes. I stedet bør andre linker foretrekkes, slik som kommunikasjon over HF eller VHF radiolinker/-nett, dersom disse er stabile. Et nettverk som håndterer trådløs multihoppkommunikasjon over mer enn én bærer kan refereres til som et heterogent MANET.

Heterogene MANET søker å utnytte radionettverkene til å gi transparente IP-lagsbaserte kommunikasjons tjenester på tvers av nettverkene. Med heterogene nettverk kommer også sterkere behov for å kunne velge mellom ruter med forskjellige egenskaper. Rutingavgjørelsen må gjøres av rutingprotokollen, for på høyere lag ser man kun de allerede avgjorte rutene til destinasjonen. Rutemetrikker er informasjonsverktøyet rutingprotokollen kan bruke for å vurdere ruter opp mot hverandre. Det er imidlertid en utfordring å gjøre rutingprotokollen i stand til å ta riktige valg i en situasjon som beskrevet ovenfor. Kriteriene som ligger til grunn for hvordan en rutingprotokoll bygger opp rutene sine, kan være flere. Det viktigste av disse kriteriene er rutemetrikk, som brukes for å sammenligne ruter og velge den mest optimale.

I denne rapporten går vi først igjennom en del litteratur som omhandler rutemetrikker i kapittel 2. Deretter presenteres rutemetrikker innledningsvis i kapittel 3. I kapittel 4 diskuteres så utfordringene knyttet opp mot rutevalg basert på minimum antall hopp. Problemstillinger knyttet til bruk av andre metrikker i en proaktiv link-state MANET rutingprotokoll, går igjennom i kapittel 5. En annen populær rutemetrikk, Expected Transmission Count (ETX), presenteres deretter i kapittel 6. Så diskuteres introduksjon av andre rutemetrikker i kapittel 7, før rapporten konkluderes i kapittel 8.

## 2 Litteratur

Det finnes svært mye informasjon i og rundt nettverket som kan bidra til å bestemme om én rute er bedre enn andre, og det er en utfordring å identifisere og klassifisere ulike metrikker. Innenfor ad

hoc nettverksfeltet er det gjort mye metrikk-arbeid innen Wireless Mesh Network (WMN). Grunnen er kanskje fordi man i WMN i hovedsak har mindre mobilitet enn i MANET. Dette gir mindre dynamikk i WMN enn i MANET.

I [2] undersøkes det hvilke rutingprotokoller som passer best for utnyttelse av WMN egenskaper. Det diskuteres grunner for å velge andre metrikker enn Minimum Antall Hopp (MAH), og en taksonomi foreslås.

Yang et al. [3] diskuterer ytelsen til rutingprotokoller i WMN og identifiserer fundamentale krav for å designe rutemetrikker i WMN. Med dette som bakteppe undersøkes fem eksisterende rutemetrikker, blant annet antall hopp og ETX.

Bruk av nodebaserte metrikker, som for eksempel CPU-kraft, belastningsgrad og energireserver, er beskrevet i [4].

N. Z. Ali et al. utforsker linktilgjengelighetsestimering for rutemetrikker i MANET i [5], og Buruhannudeen et al. vurderer eksisterende MANET rutingprotokoller og metrikker som kan brukes for å øke effektiviteten og påliteligheten i [6]. Yawut et al. har undersøkt metrikker i mobilitetsorienterte rutingprotokoller i [7, 8].

En grundig gjennomgang av rutemetrikker er gjort av Baumann et al. i [9], hvor over 50 metrikker vurderes og klassifiseres. Dette arbeidet anbefales for å oppnå økt forståelse for bruk av enkeltmetrikker.

### 3 Hva er rutemetrikker?

I dette kapittelet søker vi å gi en forståelse av hva en rutemetrikk kan være, og hvordan den kan benyttes.

En rutemetrikk kan i utgangspunktet være et hvert tall som benyttes av en rutingprotokoll til å avgjøre om én rute skal foretrekkes foran en annen. Rutingprotokollen lagrer gjerne informasjonen som ligger til grunn for rutevalget, mens operativsystemets rutingtabell, som blir oppdatert med ruter fra rutingprotokollen, kun definerer neste hopp videre langs den beste ruten til hver av de andre nodene i nettverket. En innkommende pakke som skal videresendes, blir kun sjekket mot rutingtabellen, for å se hvilken node som er beste neste hopp langs veien til pakkens destinasjon.<sup>1</sup>

Linkmetrikker og rutemetrikker er til dels to sider av samme sak, men det er forskjell mellom hva som kan utgjøre linkmetrikker og rutemetrikker. En linkmetrikk beskriver en link mellom to direkte kommuniserende grensesnitt. Denne er definert per hopp og kan brukes til mer enn rutemetrikk, for eksempel terskling eller hysteresese.<sup>2</sup> En rutemetrikk representerer en rute sammensatt av en

---

<sup>1</sup>Med multi-topologi ruting [10] opererer man med flere OS rutingtabeller og velger hvilken tabell man bruker avhengig av trafikktypen.

<sup>2</sup>Terskling vil si at man vurderer linkene til å være over eller under et gitt nivå, og man kan for eksempel velge å benytte kun linker over dette nivået til ruting. Hysteresese brukes av OLSR til å forbedre linkhåndtering ved å forlenge tiden det tar å etablere en oppkobling, og forkorte tiden det tar å bryte linken. Dette gir mer robust håndtering av linkstatus.



mengde linker ende-til-ende og krever da samarbeid mellom noder i større grad enn linkmetriker, fordi en rutemetrikk gjerne skal spres til alle rutinginstanser i nettverket. En rutemetrikk gir innsamlingsforsinkelse, krever samsvar mellom linkenes metrikker og støtte for sammensetting av linkmetrikkene.

Blant de viktigste aspektene som metrikkene vurderes utifra av Baumann et al. i [9], er:

- Påvirkningsfaktorer
- Matematiske egenskaper
- Informasjonsuthentingsmetode

Når man evaluerer *påvirkningsfaktorer* skiller man mellom utenforliggende og nettverksinterne faktorer. Utenforliggende faktorer er faktorer som påvirker metrikken, men som ikke er påvirket av nettverkets aktivitet, slik som plassering og mobilitet av noder, nodenes tekniske egenskaper eller ekstern interferens. Nettverksinterne faktorer er faktorer som avhenger direkte eller indirekte av trafikken i nettverket, slik som for eksempel metning, pakkeinterferens og forbruk av energi.

En rutemetrikk har en rekke *matematiske egenskaper*, blant annet hva slags linkkombinasjonsoperator som kan benyttes, metrikkdynamikk, symmetri og dimensjon. Linkmetriker kan kombineres til en rutemetrikk på flere ulike måter. Først og fremst kan linkmetriker enten aggregeres eller konkateneres. Med aggregering mener vi at metrikkene langs hele veien samles opp og evalueres samlet (for eksempel ved et gjennomsnitt av linkmetrikkverdiene). Det er sjelden at linkmetriker benyttes slik. Ved konkatenering kan man addere, multiplisere, finne minimum eller maksimum av linkmetrikkene langs veien. En metrikk er dynamisk dersom verdien til metrikken endres over tid. Dette er tilfellet for de fleste metrikker. Statiske metrikker kan for eksempel være antall nettverksgrensesnitt eller maksimal kapasitet over en link. En linkmetrikk kan være symmetrisk eller asymmetrisk. En symmetrisk linkmetrikk vil være lik for en link i begge retninger, mens en asymmetrisk metrikk vil kunne være forskjellig avhengig av hvilken vei metrikken måles og defineres. Til slutt kan en link være éndimensjonal eller multidimensjonal. Multidimensjonale metrikker kan ikke representeres ved et reelt tall, men som vektorer. For eksempel kan forsinkelse og båndbredde settes sammen til en todimensjonal metrikk, som gjort i [11], hvor de samtidig viser at å finne korteste vei med flerdimensjonale metrikker er Nondeterministic Polynomial time (NP)-komplett. Det er derfor ikke vanlig å bruke multidimensjonale metrikker, og alle metrikker som presenteres i denne rapporten er éndimensjonale metrikker. Man kan imidlertid kombinere flere éndimensjonale metrikker til en ny metrikk, men denne må da kunne representeres som en ny éndimensjonal metrikk.

*Informasjonsuthentingsmetoden* til en metrikk spenner fra node-relatert, via passiv monitorering og piggybacking til aktiv probing. Med node-relatert informasjonsuthenting menes at metrikkinformasjonen hentes fra noden uten stor møyse. Dette kan gjelde for faste verdier slik som antall nettverksgrensesnitt, eller statisk båndbredde. Variable metrikkverdier som bruk av inn- eller ut-kø er også node-relaterte. Ved passiv monitorering innhentes metrikkinformasjon ved å observere innkommende og utgående trafikk gjennom en node. Denne informasjonen kan for eksempel kombineres

med andre målinger til å estimere tilgjengelig båndbredde. Piggybacking er en metode hvor man legger til litt ekstra informasjon i pakker som allerede skal ut i nettverket. Slik slipper man å sende egne pakker med all overhead dette medfører. Forsinkelse kan gjerne måles med denne metoden. Aktiv probing medfører at pakker blir generert spesielt for formålet med å måle en links egenskaper.

For å unngå problemet med beregning av korteste vei ved bruk av multidimensjonale metrikker, må det enten genereres en ny éndimensjonal metrikk, eller så må kun én metrikk brukes til å finne korteste vei, mens annen metrikinformasjon kan definere hvilke veier som korteste vei skal beregnes for. For eksempel kan man dele alle linkene i nettverket inn i tre klasser, avhengig av signal-til-støy forhold. Så kan man beregne korteste vei til alle destinasjoner kun ved bruk av den beste klassen med linker. De destinasjoner det ikke var mulig å finne rute til med dette linkkvalitetsnivået, kan man da beregne rute for ved bruk av de to beste linkklassene. Til slutt kan man også ta med den siste klassen i beregningen av de siste manglende rutene, for å sørge for at man har konnektivitet. Den følgende listen er en svært begrenset oversikt over metrikker som kan brukes til ruting, enten alene eller sammen med andre metrikker:

**Antall hopp** er den mest vanlige rutemetrikken i MANET, fordi den er så enkel. MAH har naturligvis basis i denne metrikken. Metrikken er kun avhengig av topologien og signaldempning, og den gir i utgangspunktet ikke mulighet til å reflektere kost, kun konnektivitet. Derfor er linkmetrikken binær, enten er den 1 eller så eksisterer den ikke. Det er flere fordeler med metrikken. Den kan reflektere flytens selv-interferens, og antallet transmisjoner dersom alle transmisjoner over en sti er suksessfulle. Problemet for antall hopp metrikken beskrives videre i seksjon 4. Imidlertid kan denne metrikken være bedre i mobile scenarioer enn andre metrikker, ettersom andre metrikker må måles over en viss tid før en pålitelig verdi kan fastsettes.

**Antall kanaler** kan gi en indikasjon på kapasitet og redundans over én rute framfor en annen.

**Antall retransmisjoner på linklaget** gir en formening om transmisjonssuksess, ikke så ulik ETX.

**Antall naboer** kan være en indikasjon på om det er mye ledig kapasitet i området.

**Antall stier til en node** forteller om redundansen i antall veier dersom man ønsker å ha alternative veier eller sende over flere veier samtidig.

**Expected Transmission Time (ETT)** er en kombinasjon av ETX og båndbredde, hvor de to er multiplisert.

**ETX** er et mål som angir sannsynlighet for transmisjonssuksess over en link. ETX beskrives i større detalj i kapittel 6.

**Feilretting** gir informasjon om hvor mye feil som rettes ved hjelp av Forward Error Correction (FEC). Dette gir et inntrykk av bitfeil over kanalen.

**Forsinkelse** [12, 13] er en trafikkavhengig metrikk og den måler tiden det tar fra man sender til man mottar en unicast pakke mellom to noder (ikke nødvendigvis nabonoder). Forsinkelsen kan

måles enten ved hjelp av aktiv probing, eller ved piggybacking av informasjon på data- eller rutingkontrollpakker. Forsinkelsen består i flere forsinkelseskomponenter: køing, prosessering, transmisjons- og propagasjonsforsinkelse. Tilpasninger av denne metrikken inkluderer *Forventet Forsinkelse* [14] og *Round Trip Time (RTT)*.

**Forventet Forsinkelse** [14] er en tilpasning av metrikken *Forsinkelse*, hvor forsinkelsen er benyttet sammen med en Exponential Weighting Moving Average (EWMA) for å oppnå en mer stabil verdi.

**Geografisk avstand** kan fortelle om korteste fysiske vei, men gir ingen hjelp dersom terrenget for eksempel hindrer den korteste veien.

**Geografisk avstand til destinasjon** er en avart av geografisk avstand hvor man ser vurderer ende-til-ende avstand.

**Gjenstående energi** kan brukes for å unngå at noder med lite energi må være relé for mye trafikk. Dette kan forlenge tiden hvor alle noder i nettverket fremdeles har energi. Nettverket kan bli partisjonert dersom noen noder går tomme for energi og dermed forsvinner.

**Hastighet** Nodens hastighet kan fortelle om hvor ustabile linkene til denne noden vil være, i form av sannsynlighet for linkbrudd forårsaket av mobilitet.

**Relativ hastighet** Relativ hastighet mellom to noder er en variant av *Hastighet*.

**Jitter**, det vil si forskjell i forsinkelse, kan benyttes til ruting. I valg av rute kan det da tas hensyn til trafikk som er sårbar for jitter. Dette er en nyttig metrikk ved overføring av for eksempel lyd- og videokommunikasjon.

**Kost** er en pseudo-metrikk som enten kan manuelt konfigureres per link eller defineres utifra en reell metrikk. En kost-verdi kan brukes som en representasjon av en hvilken som helst konkatenerbar additativ metrikk.

**Kostnad (Billing)** I noen tilfeller kan det koste penger å overføre datatrafikk over noen linker (for eksempel sat-com). Da kan kostnadsstyrt ruting hjelpe med å holde denne kostnaden nede, for eksempel ved å bruke disse linkene til kun å overføre trafikk som ellers ikke kommer frem.

**Køforsinkelse** forteller om hvor lang tid en pakke bruker i kø mens den avventer utsending fra noden. Dette kan igjen indikere nettverksbelastningen i nodens nabolag.

**Kølengde**, eller antall pakker som er i kø, kan indikere hvor nærme man er metning på det angjeldende nettverksgrensesnittets nettverkskanal.

**Linkkapasitet** er en statisk parameter som forteller om hvor mye total kapasitet linken kan tilby.

**Linkkvalitet** er et begrep brukt om flere ulike metrikker, men alle metrikkene søker å fortelle om linkens kvalitet, i form av pakketap, bitfeilrate eller lignende.

**Linklevetid** kan gi en forventet levetid for linken, og dermed en forventet levetid for ruten. Dersom man ønsker en stabil rute, fremfor den korteste, kan en variant av denne metrikken være gunstig.

**Medium Time Metric** forteller om hva som er forventet tid pakken vil belaste nettverket ved å være i faktisk sending.

**Maximum Transmission Unit (MTU)** forteller om den maksimale størrelsen for en datapakke som kan sendes fra MAC-laget. En større pakke vil måtte bli fragmentert og sendt som flere transmisjoner, noe som reduserer effektiviteten.

**Pakkeredistribusjonsrate** er et mål som indikerer hvor ofte pakker kommer frem i feil rekkefølge. Denne metrikken forteller om reruting eller intern køing. For noen trafikktyper er pakkerot viktig å unngå.

**Pakketap** er et viktig mål for hvor mye trafikk som mistes underveis.

**Ressursbruk på MAC-laget** indikerer fare for metning.

**Signalstyrke** kan være et mål for hvor god linkkvaliteten er.

**Signal-til-støyforhold** er, i likhet med *signalstyrke*, også et mulig mål for kvaliteten på linken.

**Sikkerhet** kan brukes som del av et rutevalg, til for eksempel å foretrekke ruter som går over noder som krypterer data på linknivå.

**Throughput** er et mål for forventet trafikkmengde man kan få igjennom en link eller rute.

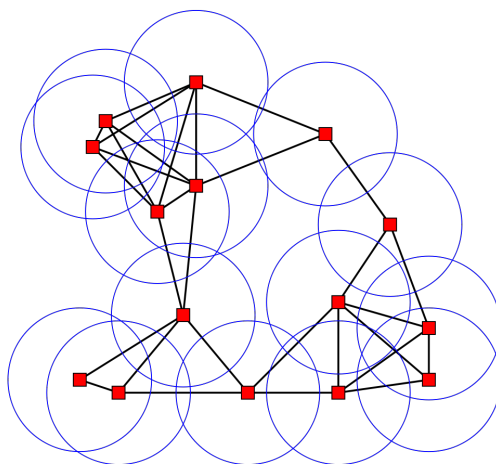
**Tilgjengelig kapasitet** gjør det mulig å velge rute avhengig av hvor det er kapasitet tilgjengelig. Denne metrikken er svært vanskelig å måle i praksis.

Når man ser hvor mange forskjellige metrikker som kan brukes til ruting, kunne det være ønskelig å rute basert med utgangspunkt i mer enn én metrikk. Imidlertid er det beregningsmessig svært krevende å finne korteste vei med flere enn én metrikk samtidig. Dette er i flere arbeider [11, 15, 16] vist å være NP-komplett. Problemet til NP-komplette løsninger er at selv om enhver løsning til et slik problem kan verifiseres raskt, er det ingen kjent effektiv måte å finne en slik løsning i første omgang. Tiden det tar å løse et NP-komplett problem, uansett hvilken algoritme som brukes (som er kjent idag), øker svært raskt når størrelsen på problemet øker. Som et resultat av dette vil tiden som kreves for å løse selv versjoner av mange av disse problemene som er moderate i størrelse, raskt komme opp i milliarder av år ved bruk av dagens regnekraft. Det finnes imidlertid flere forslag [15] til algoritmer som gir omtrentlige løsninger som nærmer seg den optimale løsningen, og som kan kjøres i løpet av mye kortere tid. Man kan lese mer om bakgrunnen for NP-completeness i [17].

## 4 Minimum antall hopp

I dette kapittelet gjennomgås motivasjonen for å undersøke og ta i bruk andre rutemetrikker enn antall hopp. Noe av argumentasjonen er inspirert av [18].

Det har vært en vanlig tilnærming for MANET routingprotokoller å ta utgangspunkt i den samme forutsetningen som blir benyttet i kablede nettverk, nemlig at trådløse koblinger er det samme som kablede linker, og at de kan representeres som punkt-til-punkt forbindelser. Dette underbygges av konstruksjonen til mange Medium Access Control (MAC)-protokoller, som for eksempel IEEE 802.11 [19], hvor man skiller mellom kringkastingstransmisjon og punkt-til-punkt transmisjon. Punkt-til-punkt transmisjonen bruker Acknowledgment (ACK)-meldinger for å bekrefte korrekt mottatt pakke, og støtter gjentatte transmisjoner transparent for høyere lag dersom en punkt-til-punkt transmisjon ikke er vellykket. Routingprotokoller for trådbaserte nettverk, slik som Open Shortest Path First (OSPF) [20] og Intermediate System To Intermediate System (IS-IS) [21] bruker link kost sammen med Edsger Dijkstras korteste vei søkealgoritme [22] for å gjøre effektiv routing. Routingprotokollen Routing Information Protocol (RIP) [23] bruker antall hopp direkte. Link-kost er i de fleste tilfeller brukt tilsvarende antall hopp, slik at optimaliseringen ved bruk av Dijkstra resulterer i pakkeflyt korteste vei. Oppførselen til linklagsprotokollen har vært med å understøtte denne funksjonaliteten også i MANET.



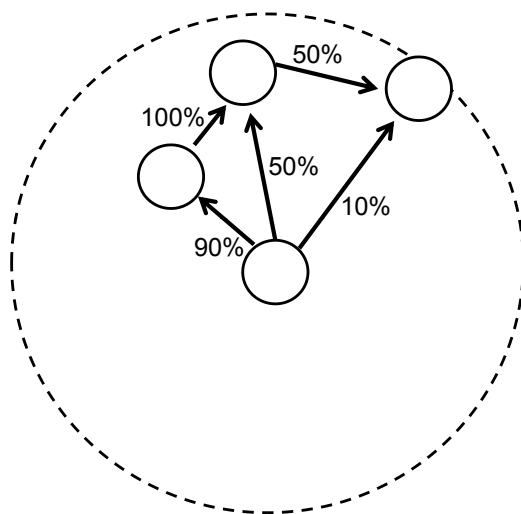
Figur 4.1 Unit disk graph

Kompleksiteten på fysisk nivå er høy, og derfor har det vært krevende å modellere det trådløse mediet i simulatorer. Den mest vanlige propagasjonsmodellen<sup>3</sup> har derfor vært Unit Disk Graph (UDG). UDG gir at to noder kan kommunisere *kun* dersom de er innenfor en definert maksimal transmisjonsradius (Figur 4.1). Innenfor denne maksimale avstanden kan alle transmisjoner mottas med suksess, dersom ikke en kollisjon oppstår. Denne avstanden er i utgangspunktet lik for alle noder, men utsendt effekt og mottakers følsomhet kan justeres. I virkeligheten varierer det mottatte signalet av ulike årsaker, og dette resulterer i en kommunikasjonsdekning som ikke trenger ligne en sirkel som i UDG (Figur 4.1).

<sup>3</sup>Propagasjonsmodellen forteller om hvordan radiosignalene som nodene kommuniserer seg imellom med, brer seg utover i simuleringsverdenen.

Mobilitet og linkfluktueringer skaper topologiendringer som rutingprotokollen må detektere og håndtere, for å vedlikeholde ruter som applikasjoner er avhengige av. Dersom rutingprotokollen er for sen til å handle ved en topologiendring, gir dette uungåelig problemer for transportprotokollen eller applikasjonene i form av pakketap, forsinkelse og/eller omstokking.

De fleste rutingprotokoller for MANET bruker antall hopp som en enkel linkkost-metrikke. Bruk av Dijkstras korteste vei algoritme med hopp-metrikke, heretter kalt MAH, er svært effektiv. Den minimerer antallet transmisjoner per pakke i en flyt, gitt at alle linker er tapsfrie. Slik reduseres påvirkningen hver pakke har på nettverkskapasiteten. I tillegg reduseres i de fleste tilfellene forsinkelse og jitter<sup>4</sup>. I simuleringer med UDG eller ekvivalent, uten varierende linkforhold, fungerer MAH meget godt. Imidlertid møter MAH utfordringer når den benyttes i virkelige systemer, hvor propagasjonsmodellen ikke er slik som UDG. I noen tilfeller kan MAH påvirke nettverksytelsen negativt, dersom den brukes uten noen andre vurderinger. Radiolinker gir gjerne dårligere ytelse med økende avstand. Samtidig sørger MAH for at antallet hopp er lavest mulig, og den vil foretrekke lengre linker, dersom dette gjør ruten kortere. Dette betyr at linker langs stien kan bli strukket så langt at kvaliteten er så redusert at det ville vært bedre å legge veien innom enda en node, og oppnå bedre kvalitet ende-til-ende over ruten. Med andre ord er linkene som har mest sannsynlighet for å fluktuere, også de linkene som foretrekkes av rutingprotokoller som er optimalisert for å velge korteste vei.



Figur 4.2 Sannsynlighet for transmisjonssuksess. Hva er mest optimale vei?

En utfordring med MAH er at den ikke selv kan vurdere om en link skal være med i ruteberegningen. Dersom en link kun klarer å overføre 10% av transmisjonene (Figur 4.2), bør da linken benyttes? Dersom linken er den eneste som sørger for at deler av nettverket ikke er partisjonert bør den være med, men hvis en annen vei hadde gitt større sannsynlighet for å få datapakker frem, bør den kanskje ikke være med. Her kommer MAH til kort.

Å bruke heterogene linker kan også være et problem med MAH, ettersom rutingprotokollen foretrek-

<sup>4</sup>Jitter er variasjon i forsinkelse.

ker å rute pakker over de linkene som gir færrest antall linker. Imidlertid er det de lengste linkene som oftest også er linkene med lavest kapasitet, og dette fører til at nettverksressursene ikke blir optimalisert.

Noen relénoder kan være for privilegerte brukere eller privilegert trafikk. Dette kan være vanskelig å håndtere ved bruk av MAH. Et eksempel er bruk av Unmanned Aerial Vehicle (UAV) som relénode. Linkene til og fra UAV-en er tilgjengelige for de fleste bakkenoder. Dette gjør at rutelengden i de fleste tilfeller vil være lavest dersom UAV-en brukes som relénode. Imidlertid kan UAV-en ha blitt sendt opp for å tilby konnektivitet til deler av nettverket som ellers ikke ville hatt kontakt med resten av nettverket i det hele tatt. Eller den kunne være sendt opp for å tilby redundante veier for høyprioritetstrafikk. Å kun benytte seg av MAH-basert ruting i et slikt tilfelle ville gjøre det vanskelig å reservere bruken av UAV-en som relénode kun for de det var intendert.

MAH er ikke et verktøy for å håndtere metning. Hopp-metrikken kan holde antall transmisjoner lavt for rutene med god link-kvalitet, men hopp-metrikken reflekterer ikke linkenes eller rutenes belastning direkte. Trafikken fra alle noder fortsetter å bruke korteste vei, selv om mange pakker må kastes underveis på grunn av køtap eller kollisjoner. I MAH er det imidlertid en viss ukontrollert lasthåndtering gjennom at også rutepakker vil tapes når nettverket nærmer seg metning. Disse tapte rutepakkene vil gjøre områder av nettverket som er i en metningstilstand utilgjengelige på grunn av manglende ruteoppdateringer, og slik vil trafikkpåtrykket reduseres i disse områdene frem til rutingtrafikken igjen kommer gjennom. I slike tilfeller er det imidlertid også stor risiko for loops, som vil bruke opp mye av en eventuelt gevinst i nettverkskapasitet.

MAH er ikke i stand til å tilby kvalitetskontrollerte stier i en sikkerhetskontekst. Man kan for eksempel tenke seg at noen nettverksnoder er usikre, men kan allikevel benyttes dersom det er sterke nok grunner for å få trafikken gjennom. Altså, hvis det finnes en rute utenom en usikker node bør slike ruter brukes. Ved bruk av MAH er det ingen kontroll med hvilke noder trafikken rutes gjennom.

Styring av energibruk er også utfordrende med MAH. Selv om korteste vei kan være optimal for nettverkskapasiteten, er det en stor risiko for at noen noder som er mer eller mindre alene i å tilby konnektivitet mellom to deler av nettverket kan gå tomme for energi mye raskere enn de andre nodene. MAH er ikke i stand til å gjøre forskjell mellom noder med høyt energinivå og noder med lite energi igjen. Det er altså en risiko for at nettverket kan bli partisjonert mye tidligere med MAH enn med en metrikk som reflekterer energinivåene til nodene langs forskjellige ruter i nettverket.

I dette kapittelet ble antall hopp brukt som motivasjon for å studere andre metrikker. Antall hopp er svært mye brukt som metrikk i MANET. Imidlertid bruker for eksempel MANET-rutingprotokollen Open Shortest Path First with MANET Designated Routers (OSPF-MDR) [24] *kost* som metrikk. *Kost* er en pseudo-metrikk som enten kan manuelt konfigureres per link eller defineres utifra en reell metrikk. Cisco foreslår å definere *kost* som

$$kost = \frac{B_r}{B_i} \quad (4.1)$$

hvor  $B_r$  er referansebåndbredde (definert som 100 Mb) og  $B_i$  er nettverksgrensesnittets båndbredde.

Dette er en statisk metrikk, men gjør det mulig å gjøre manuell trafikkstyring, og dersom nettverket er heterogent vil smale linker benyttes i mindre grad enn brede, mens partisjonering unngås. Dersom nettverket er homogent, vil imidlertid alle linker ha samme verdi, og korteste vei for kost vil være samme som korteste vei i antall hopp.

Det er ikke slik at man må forvente at en rutemetrikk skal løse alle hensyn man ønsker å ta når man lager ruter, og alle utfordringene ovenfor må ikke nødvendigvis løses av en rutemetrikk. Flere andre metoder kan benyttes, for eksempel mekanismer i tilknytning til rutingprotokollen for å håndtere fluktuerende linker. Dette kan for eksempel være terskling av dårlige linker og linkhysterese [25]. Imidlertid blir løsningene fort kompliserte, proprietære og ikke-optimaliserte med henblikk til ressursbruk. I de fleste tilfeller vil det være nødvendig med spredning av informasjonen som skal være grunnlaget for rutevalg i nettverket, og det er naturlig å bruke rutingprotokollen og rutemetrikker til dette. Dessuten vil det være for sent med mange tiltak når rutingprotokollen har tatt et valg. Det er derfor stor grunn til å vurdere hvilke rutemetrikker som kan tas i bruk, og utfordringer med andre rutemetrikker enn antall hopp.

## 5 Tilpasning av rutingprotokollen

Innenfor forskningsfeltet MANET har det skilt seg ut to hovedgrupper av rutingprotokoller, reaktive og proaktive. IETF arbeidsgruppe MANET arbeider med standardisering av en reaktiv protokoll, Dynamic Manet On-Demand Protocol (DYMO), og en proaktiv link-state, Optimized Link State Routing (OLSR). OLSR har tatt opp i seg elementer fra flere andre rutingprotokoller, for eksempel OSPF, som er en mye brukt rutingprotokoll for trådbaserte nettverk. Problemstillingene rundt tilpasning av OLSR til å bruke andre metrikker enn antall hopp er slik sett relevante for et større antall rutingprotokoller i MANET.

OLSR rutingprotokollen er i ferd med å bli godkjent som en IETF RFC Internet Standard med navnet OLSR versjon 2 (OLSRv2). OLSR versjon 1 (OLSRv1) ble allerede i 2003 godkjent som Experimental Standard RFC3626 [25]. Som del av arbeidet med versjon 2 har det blitt vurdert hvordan man kan bruke andre metrikker enn MAH med OLSR, presentert i [18]. OLSR er en proaktiv link-state rutingprotokoll som er mye brukt i MANET.

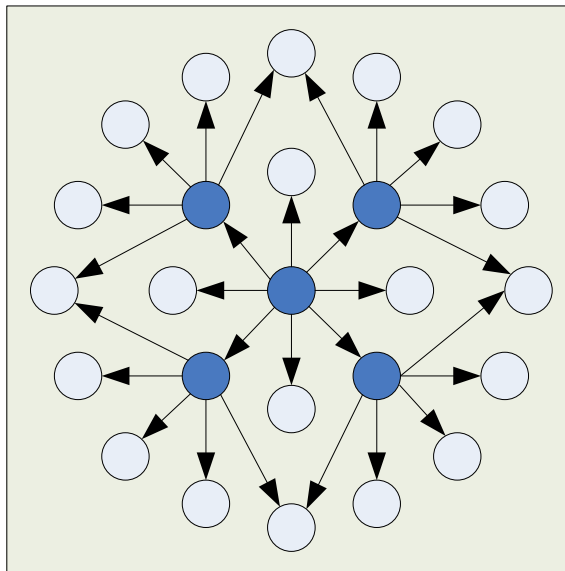
I OLSR kringkaster alle noder HALLO-meldinger med et fast intervall. Kringkastingen av HALLO-meldinger gjør det mulig for naboer å detektere noden som sender HALLO-meldingen. Ved å bruke HALLO-meldinger kan rutingprotokollen utveksle informasjon om sine naboer og motta informasjon om 2-hopps naboer.

Protokollen skiller mellom pakker og meldinger. En OLSR-pakke kan inneholde mer enn en melding, begrenset oppover av nettverkets MTU. Protokollen definerer én pakke type og flere meldinger: HALLO, Topology Control (TC), Multiple Interface Declaration (MID) og Host and Network Association (HNA). HALLO-meldingen er den eneste typen som ikke videresendes av andre noder.

Link-state informasjonen (TC-meldinger) distribueres gjennom hele nettverket ved bruk av Multi-



Point Relay (MPR)-noder [26]. Alle noder velger et utvalg av sine naboer som MPR-er slik at (minst) alle 2-hopp-naboer, det vil si noder som er naboenes naboer, kan nå ved hjelp av disse MPR-ene. Måten MPR-ene velges på, skaper et distribusjonstre som kan brukes til å effektivt spre link-state informasjonspakker til alle noder i nettverket.



Figur 5.1 MPR-videresending av en kringkastet pakke.

For å oppnå enda høyere effektivitet er det kun nodene som er valgt til MPR som genererer TC-meldinger. MPR-videresendingen er illustrert i Figur 5.1, hvor for eksempel en enslig TC-melding kan videresendes i en nodes 2-hopp nabolag ved bare fem transmisjoner<sup>5</sup>.

Ettersom OLSR har egenskaper man finner igjen i flere andre proaktive rutingsprotokoller for MANET, er det relevant å gå gjennom de foreløpige konklusjonene i [18]:

- Idet man skal tilordne metrikker til linker, må man vurdere om man skal ha forskjellige metrikverdier for de to retningene til en link, hvor den mottakende ruter avgjør metrikken fra sender til mottaker (ett hopp). En metrikk som skal brukes av OLSRv2 må enten være en linkmetrikk definert som metrikken til en link fra senderruterens OLSRv2grensesnitt til et OLSRv2 grensesnitt hos mottakende ruter, eller en nabometrikk, som da er minimum av linkmetrikkene mellom to OLSRv2 rutere i den indikerte retningen. HALLO-meldingene kan ta med både linkmetrikkene og nabometrikkene, mens TC-meldingene kun skal inneholde nabometrikkene.
- Metrikker som skal brukes av OLSRv2 må være dimensjonsløse og konkatenerbare additive. Med dimensjonsløse metrikker menes at selv om metrikkene direkte eller indirekte har opphav i spesifikk fysisk informasjon som forsinkelse, tapsrate eller båndbredde, er denne konteksten uinteressant for OLSRv2, og at metrikken for rutingsprotokollens del kun er en tallverdi.

<sup>5</sup>Én transmisjon av kilden, og én av hver av de fire MPR-nodene valgt av kilden.

Generering av metrikkverdien må gjøres utenfor OLSRv2. Valg av metrikk er også utenfor OLSRv2 sitt område, men rutingprotokollen må kunne bruke metrikkene konsistent. Dette betyr at *alle rutere i nettverket må bruke den samme metrikktypen og forstå metrikken på samme måte*. Dersom noen rutere har en annen forståelse av metrikken kan dette føre til at to rutere har motsatt forståelse av hvilken vei en pakke skal videresendes, og loops oppstår. Resultatet blir at nettverket slutter å fungere og pakkene kommer ikke frem til destinasjonen.

- Det er nødvendig å dele opp de to funksjonene *optimalisert flooding* og *reduisert topologiannonsering* i to separate sett av MPR-er i OLSRv2 kalt “flooding MPRs” og “routing MPRs”. “Flooding MPRs” kan regnes ut slik som i OLSRv1 [25], eventuelt med bruk av andre linkmetrikker for å forbedre valget av MPR-er. “Routing MPRs” må bruke en metrikkbasert utvelgelsesalgoritme. Valg av ruting-MPR-er garanterer rutevalg optimalisert for minimum avstand med valgte metrikk, samtidig som man bruker kun symmetrisk 2-hopp naboskapsinformasjon fra HALLO-meldinger og ruting-MPR-velger informasjon fra TC-meldinger.

## 6 ETX

Expected Transmission Count (ETX) [27] er en mye omtalt metrikk i forbindelse med bruk av alternative rutemetrikker. ETX er det *forventede* antall transmisjoner en pakke må gjennom for å bli mottatt feilfritt hos destinasjonen. Dette er et tall som varierer fra én til uendelig. En ETX lik én indikerer en tapsfri link, mens en ETX som går mot uendelig indikerer en ubrukelig link. Metrikkens overordnede mål er å velge ruter med høy ende-til-ende throughput.

ETX tar utgangspunkt i “beacon”-pakker som kringkastes innenfor nodens transmisjonsrekkevidde. Det er ingen videresending av disse pakkene. ETX for en link kalkuleres ved å bruke fremover- og bakover-retningenes leveringsrate for linken. Den forventede sannsynligheten for at en transmisjon er vellykket mottatt og gitt ACK for, er

$$d_f \times d_r \tag{6.1}$$

hvor fremoverleveringsraten,  $d_f$ , er den målte sannsynligheten for at en datapakke mottas med suksess hos mottakeren. Bakoverleveringsraten,  $d_r$ , er sannsynligheten for at ACK pakken mottas vellykket. Dersom en sender ikke mottar ACK for en pakke, vil en MAC-lags retransmisjonsmekanisme sende denne pakken om igjen.<sup>6</sup> Det forventede antall transmisjoner,  $ETX$ , blir derfor

$$ETX = \frac{1}{d_f \times d_r}. \tag{6.2}$$

Leveringsratene  $d_f$  og  $d_r$  blir målt ved hjelp av “beacon”-pakkene, som er dedikerte probepakker. Disse kringkastes av hver node, og da sender ikke MAC-protokollen (IEEE 802.11) ACK. Leveringsraten fra senderen til enhver tid  $t$ , er

$$r(t) = \frac{\text{count}(t - w, t)}{w/\tau}. \tag{6.3}$$

<sup>6</sup>MAC-lags retransmisjonsmekanismer ved manglende ACK er svært vanlig i CSMA-baserte MAC-protokoller (for eksempel IEEE 802.11) som er vanlige i ad hoc nettverk. MAC-lags retransmisjoner er en mekanisme for å unngå svært mye pakketap forårsaket av bitfeil, over linken.

Probepakkene har en bestemt størrelse og en gjennomsnittlig periode på  $\tau$ .  $Count(t - w, t)$  er antallet prober mottatt i løpet av vinduet  $w$ , og  $w/\tau$  er antallet prober som skulle vært mottatt.

I et tenkt tilfelle hvor X sender til Y, gir denne teknikken node X mulighet til å måle  $d_r$  og Y mulighet til å måle  $d_f$ . Ettersom Y vet at den skal motta en probe fra X hvert  $\tau$  sekund, kan Y korrekt beregne den gjeldende tapsraten selv om ingen prober mottas fra X. Utregning av en links ETX krever både  $d_f$  og  $d_r$ . Hver probe sendt fra X inneholder antallet probepakker mottatt av X fra hver av dens naboer de siste  $w$  sekunder. Dette gjør hver nabo i stand til å regne ut  $d_f$  til X hver gang den mottar en probe fra X. Rutens ETX er summen av alle linkmetrikkene over ruten.

Beskrivelsen over er fra originalartikkelen av De Couto et al. [27] fra 2003. Imidlertid kan begrepet ETX også omhandle andre implementasjoner som ikke er bokstavtro mot De Couto et al. For eksempel kan man benytte datatrafikken som korreksjon til informasjon dedusert fra “beacon”-pakkene<sup>7</sup>. Det er også naturlig å koble sammen ETX med proaktive rutingprotokoller som også har et behov for å sende probepakker og gjøre nabodeteksjon. Da kan man bruke rutingprotokollens HALLO-pakker for nabodeteksjon til å måle ETX, og man trenger ikke sende egne ETX probepakker. ETX brukes blant annet av Collection Tree Protocol (CTP) [28], en sensornettverksprotokoll. En videreutvikling av ETX er ETT (forventet forsinkelse) [14] og Weighted Cumulative ETT (WCETT) [29], som egner seg bedre ved kjøring over heterogene linker med forskjellige kapasiteter.

Observasjon av ETX-basert ruting i CTP [30] gjennom arbeid i FFI-prosjekt 1141 SASS har gitt noen interessante lærdommer:

- Når rutingprotokollen har stabilisert seg, er det sjelden de mest optimale rutene som brukes. For å unngå oscilleringer, har man valgt å la være å skifte til en bedre rute med mindre forbedringen overstiger en og en halv transmisjon (forskjell i ETX på minst 1,5). Dette vil for eksempel si at en node som er ett hopp unna destinasjonen, kun vil velge direkteruten dersom den først identifiserer denne og ikke får problemer med den. Dersom den velger en to-hopps rute til destinasjonen, vil den kun ha mulighet til å bytte rute dersom to-hoppsruten blir betydelig dårligere enn ett-hoppsruten.
- Dersom en midlertidig feil gjør at ruten til en destinasjon går ned, fører dette til flere reaksjoner i noden. Først gjør MAC-lagsretransmisjoner at sendernoden forsøker å sende 30 ganger til samme link-destinasjon. Deretter sender den en annen vei som den tror virker. Dersom noden er utilgjengelig også fra denne retningen, fortsetter rutingprotokollen likedan videre.
- Når en link går ned, resettes hele nabolagets rutinginstansers “beacon”-pakker intervall til minimum. Dette gjør rutingprotokollen i stand til raskt å skaffe seg fersk ETX-informasjon, men øker samtidig sannsynligheten for kollisjoner mellom disse “beacon”-pakkene.

---

<sup>7</sup>Antallet MAC retransmisjoner før pakken kommer gjennom kan gi tilnærmet ETX-metrikk fra avsender til mottaker. Imidlertid kan dette virke negativt, ettersom det gir forskjell i grunnlaget for å vurdere mellom stiene der det går data og der hvor data ikke går.

## 7 Diskusjon

Link- og rutemetrikker representerer informasjon man kan benytte i arbeidet med å forbedre nettverksytelsen, naturligvis spesielt for nettverkslaget, hvor ruting foregår. Mer informasjon gjør at man kan ta bedre funderte valg. Samtidig er det viktig at ikke informasjonen er utdatert og feil.

Asymmetriske linker er vanlig i trådløse nettverk, og måling av en link gjøres gjerne fra mottakersiden. Dette er tilfelle for mange metrikker, slik som signalstyrke, pakketap, throughput etc. Dette betyr at brukeren av linken, altså senderen, må bli fortalt av mottakeren hva som er ytelsen over linken, med mindre dette er implisitt i protokollen, gjennom for eksempel MAC-lags ACK.

MAH er en binær metrikk som kun viser eksistensen til en link. Enten er den der, eller så er den det ikke. En metrikk som er mer nyansert vil variere mer innenfor dette rommet, og det vil kanskje være ønskelig eller nødvendig med en høyere oppdateringsrate for å utnytte effektene. Dette må avveies mot negative effekter ved økt rutingtrafikk, slik som større sannsynlighet for kollisjoner og metning.

Man bør også ha i mente at mange metrikker krever overvåkning av linken i lengre tid for å finne en nøyaktig verdi, mens antall hopp i utgangspunktet er en binær tilstand som lar seg måle med én HALLO-pakke. Dette gjør at tilstandsinformasjonen som må lagres hos hver node, øker med antall linker noden må holde oversikt over.

Draves et al. har gjort arbeid [12] som indikerer at andre metrikker enn antall hopp kan være ubrukelige i høy-mobile scenarier. Draves et al. undersøker ETX og andre linkkvalitetsmetrikker i en testbed i [12], og konkluderer med at selv om linkkvalitetsmetrikker gir bedre ytelse enn MAH i statiske topologier, gir MAH best ytelse i testene der de bruker mobil topologi.

Rutingtrafikk kan få annerledes behandling på lavere lag enn datatrafikken. Dette gjelder uansett om man bruker MAH eller andre metrikker som benytter probing. Dette er gjennomgått bra i Lundgren et al. sitt arbeid med “gray zones”, eller gråsoner [31]. Her påvises det at rutemeldinger sendes med lengre rekkevidde enn datapakkene, noe som skaper linker hvor rutingtrafikk kan gå, men ikke datatrafikk.

Rutingtrafikkbaserte målinger gjør at man ikke belaster nettverket unødige, men dette gir ikke nødvendigvis korrekte resultater når datatrafikken skal gå. Datatrafikkbaserte målinger gir flere pakker å måle på, så nøyaktigheten blir bedre. Samtidig har ikke alle stier datatrafikk til enhver tid, så sammenligningsgrunnlaget blir feil mellom ruter som har datatrafikk og ruter som ikke har det.

Dersom man velger en annen metrikk som basis for rutevalg i nettet enn MAH, må man ha oppmerksomhet mot at veiene som trafikkflytene går over kan endre seg slik at det er vanskeligere å holde oversikt. MAH velger den stien som har kortest lengde, og valg av en annen rutingmekanisme vil føre til at enten den samme stien blir valgt, en annen sti med samme lengde, eller en lengre sti. En sti som er valgt med MAH vil kunne ha færre, men lengre, linker. Lengre linker vil ha høyere sannsynlighet for å brytes i scenarier med mobilitet, men samtidig vil ruter som er lengre enn MAH-valgte ruter ha flere hopp, noe som øker sannsynligheten for pakketap langs veien. Særlig

kringkastingstransmisjoner er utsatt for dette, ettersom de ikke støttes av MAC ACK.

Bruk av UDG i simulatorer har forfordelt protokoller som er raske til å detektere og håndtere linkendringer, ettersom de fleste linkbrudd da har vært forårsaket av mobilitet. Metodene for å detektere linkbrudd kan imidlertid bli lurt av fluktuerende linker. I kort tid kan disse gi lignende oppførsel som linkbrudd forårsaket av mobilitet. Slike brudd bør imidlertid ikke håndteres likt, altså ved å anta at linkene er tapt i det øyeblikket symptomene begynner å opptre.

Nettverksstabilitet og effektiv utnyttelse av nettverksressursene er viktig i MANET som skal brukes i militær sammenheng. Et problem er at disse to parameterene ofte jobber mot hverandre. Et stabilt nettverk impliserer både at man bruker mye ressurser på ruting, og i tillegg begrenser trafikken i nettverket, slik at man kan opprettholde stabiliteten. En høy trafikklast kan utløse ustabilitet, både gjennom selv-interferens og gjennom å ødelegge for rutingtrafikken.

Et dilemma med rutemetriker er hvorvidt informasjonen fremdeles er gyldig når den benyttes. En rutemetrikk som er dynamisk vil nødvendigvis variere over tid. Noen metrikker kan det være hensiktsmessig å overvåke over en periode, slik at man kan identifisere et gjennomsnitt som kan være mer stabilt over tid enn en øyeblikksmåling. Når målingen er utført, må informasjonen spres i nettet, slik at andre noder kan benytte den til ruting. Denne prosessen gir en viss forsinkelse. I tillegg går det tid mellom hver gang en node kan sende ut informasjonen, for ikke å belaste nettverket unødvendig mye. Resultatet er at informasjonen må forventes brukt en stund etter at målingen er utført. Dette åpner for å forsøke å estimere hvordan metrikken vil bli i fremtiden. Imidlertid kan dette være svært vanskelig for nettverk av typen MANET, fordi fremtidige hendelser kan være uforutsigbare.

## 8 Konklusjon

I denne rapporten er det argumentert for hvorfor det kan være ønskelig å støtte bruk av andre metrikker enn antall hopp i mobile ad hoc nettverk. MAH har klare fordeler i noen scenarier, men handlingsrommet for trafikkstyring av ulike årsaker blir mye større dersom man kan benytte andre metrikker. Spesielt i heterogene nettverk blir muligheten til å gjøre ruting med utgangspunkt i flere kriterier enn antall hopp viktig, samtidig som grad av mobilitet kan påvirke nytten av andre metrikker i negativ retning.

Antallet forskjellige metrikker som er tilgjengelige er svært stort. Samtidig kan man ikke optimalisere for mer enn én av gangen. Antall hopp er en standardisert metrikk. Skal man benytte en eller flere metrikker må det innføres et system for å håndtere dette, gjennom for eksempel multitopologiruting i et kontrollert nettverk.

Arbeidet med denne rapporten har vært en innledende studie på rutemetrikker for MANET. Ettersom ønske og behov for interoperabilitet blir sterkere, blir også behovet for standardisering av ruting og rutemetrikker en viktig del av dette. Det er god grunn til å ta med seg fokuset på rutemetrikker og QoS-ruting videre i arbeidet med heterogene MANET.

## Referanser

- [1] M. Hauge and S. Haavik, “Intelligent Tactical IP Router,” FFI, FFI-rapport 2009/01708, 2009.
- [2] J. Núñez-Martínez and J. Manges-Bafalluy, “A Survey on Routing Protocols that really Exploit Wireless Mesh Network Features,” *Journal of Communications*, vol. 5, no. 3, 2010. [Online]. Available: <http://www.academypublisher.com/ojs/index.php/jcm/article/view/0503211231>
- [3] Y. Yang, J. Wang, and R. H. Kravets, “Designing routing metrics for mesh networks,” in *In proc. of the First IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks (WiMesh)*, 2005.
- [4] N. Migas and W. Buchanan, “Ad-hoc Routing Metrics and Applied Weighting for QoS support,” in *Parallel and Distributed Processing, 2008. IPDPS 2008. IEEE International Symposium on*, april 2008, pp. 1–8.
- [5] N. Z. Ali, R. B. Ahmad, and S. A. Aljunid, “Link availability estimation for routing metrics in MANETs : An overview,” in *Electronic Design, 2008. ICED 2008. International Conference on*, Dec. 2008, pp. 1–3.
- [6] S. Buruhanudeen, M. Othman, and B. M. Ali, “Existing MANET routing protocols and metrics used towards the efficiency and reliability- an overview,” in *Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications, 2007. ICT-MICC 2007. IEEE International Conference on*, May 2007, pp. 231–236.
- [7] C. Yawut, B. Paillassa, and R. Dhaou, “On Metrics for Mobility Oriented Self Adaptive Protocols,” in *Wireless and Mobile Communications, 2007. ICWMC '07. Third International Conference on*, march 2007, p. 11.
- [8] —, “Mobility Metrics Evaluation for Self-Adaptive Protocols,” *JNW*, vol. 3, no. 1, pp. 53–64, 2008. [Online]. Available: <http://dblp.uni-trier.de/db/journals/jnw/jnw3.html#YawutPD08>
- [9] R. Baumann, S. Heimlicher, M. Strasser, and A. Weibel, “A Suvey on Routing Metrics,” Computer Engineering and Networks Laboratory, ETH-Zentrum, Switzerland, TIK Report 262, February 2007.
- [10] P. Psenak, S. Mirtorabi, A. Roy, L. Nguyen, and P. Pillay-Esnault, *RFC 4915: Multi-Topology (MT) Routing in OSPF*, IETF Internet Standard, June 2007.
- [11] Z. Wang and J. Crowcroft, “Quality-of-service routing for supporting multimedia applications,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 14, no. 7, pp. 1228–1234, sep 1996.
- [12] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, “Comparison of routing metrics for static multi-hop wireless networks,” in *SIGCOMM '04: Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, vol. 34, no. 4. New York, NY, USA: ACM, October 2004, pp. 133–144. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1145/1015467.1015483>

- [13] A. Khanna and J. Zinky, "The revised ARPANET routing metric," *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 19, no. 4, pp. 45–56, 1989.
- [14] P. Gupta and P. Kumar, "A system and traffic dependent adaptive routing algorithm for ad hoc networks," in *Decision and Control, 1997., Proceedings of the 36th IEEE Conference on*, vol. 3, 10-12 1997, pp. 2375 –2380 vol.3.
- [15] F. Kuipers, P. Van Mieghem, T. Korkmaz, and M. Krunz, "An overview of constraint-based path selection algorithms for QoS routing," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 40, no. 12, pp. 50–55, dec 2002.
- [16] H. Badis and K. Al Agha, "Qolsr multi-path routing for mobile ad hoc networks based on multiple metrics: bandwidth and delay," in *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC 2004-Spring. 2004 IEEE 59th*, vol. 4, may 2004, pp. 2181 – 2184 Vol.4.
- [17] M. Garey and D. S. Johnson, *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*, ser. A Series of Books in the Mathematical Sciences, V. Klee, Ed. W. H. Freeman and Company, 1979.
- [18] C. Dearlove, T. Clausen, and P. Jacquet, "Link Metrics for the Mobile Ad Hoc Network (MANET) Routing Protocol OLSRv2 - Rationale," IETF Internet-Draft, MANET WG, draft-ietf-manet-olsrv2-metrics-rationale-00, August 2012, work in progress. Intended status: Informational, Expires: February 2, 2013. [Online]. Available: <http://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-olsrv2-metrics-rationale-00>
- [19] IEEE, "Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specification," IEEE standard 802.11-2007, June 2007.
- [20] J. Moy, *RFC 2328: OSPF Version 2*, IETF Standards Track, April 1998.
- [21] H. Gredler and W. Goralski, *The Complete IS-IS Routing Protocol*. Springer, 2005. [Online]. Available: <http://books.google.no/books?id=NxIadsCKZxMC>
- [22] E. W. Dijkstra, "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs," *NUMERISCHE MATHEMATIK*, vol. 1, no. 1, pp. 269–271, 1959.
- [23] G. Malkin, *RFC 2453: RIP Version 2*, IETF Standards Track, November 1998.
- [24] R. Ogier and P. Spagnolo, *RFC 5614: Mobile Ad Hoc Network (MANET) Extension of OSPF Using Connected Dominating Set (CDS) Flooding*, IETF Experimental, August 2009.
- [25] T. Clausen, P. Jacquet (editors), C. Adjih, A. Laouiti, P. Minet, P. Muhlethaler, A. Qayyum, and L. Viennot, "RFC 3626: Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)," RFC 3626, pages 1–75, pp. 1–75, October 2003, network Working Group.
- [26] A. Qayyum, L. Viennot, and A. Laouiti, "Multipoint Relaying: An Efficient Technique for flooding in Mobile Wireless Networks," INRIA, Tech. Rep. RR-3898, February 2000. [Online]. Available: <http://en.scientificcommons.org/304504>

- [27] D. S. J. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket, and R. Morris, "A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing," in *Proceedings of the 9th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '03)*, San Diego, California, September 2003.
- [28] O. Gnawali, R. Fonseca, K. Jamieson, D. Moss, and P. Levis, "Collection Tree Protocol," in *Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, ser. SenSys '09. New York, NY, USA: ACM, 2009, pp. 1–14. [Online]. Available: <http://doi.acm.org/10.1145/1644038.1644040>
- [29] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks," in *MobiCom '04: Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking*. New York, NY, USA: ACM, 2004, pp. 114–128.
- [30] R. Fonseca, O. Gnawali, K. Jamieson, and P. Levis, "Four bit wireless link estimation," in *In Proceedings of the Sixth Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets VI)*, November 2007.
- [31] H. Lundgren, E. Nordström, and C. Tschudin, "Coping with communication gray zones in IEEE 802.11b based ad hoc networks," in *Proceedings of the 5th ACM international workshop on Wireless mobile multimedia (WOWMOM)*. New York, NY, USA: ACM, 2002, pp. 49–55.



## Forkortelser

<b>ACK</b>	Acknowledgment
<b>CPU</b>	Central Processing Unit
<b>CSMA</b>	Carrier Sense Multiple Access
<b>CTP</b>	Collection Tree Protocol
<b>DYMO</b>	Dynamic Manet On-Demand Protocol
<b>ETT</b>	Expected Transmission Time
<b>ETX</b>	Expected Transmission Count
<b>EWMA</b>	Exponential Weighting Moving Average
<b>FEC</b>	Forward Error Correction
<b>FFI</b>	Forsvarets forskningsinstitutt
<b>HF</b>	High Frequency
<b>HNA</b>	Host and Network Association
<b>IETF</b>	Internet Engineering Task Force
<b>IS-IS</b>	Intermediate System To Intermediate System
<b>MAC</b>	Medium Access Control
<b>MAH</b>	Minimum Antall Hopp
<b>MANET</b>	Mobile Ad hoc NETtverk
<b>MID</b>	Multiple Interface Declaration
<b>MPR</b>	MultiPoint Relay
<b>MTU</b>	Maximum Transmission Unit
<b>NP</b>	Nondeterministic Polynomial time
<b>OLSR</b>	Optimized Link State Routing
<b>OLSRv1</b>	OLSR versjon 1
<b>OLSRv2</b>	OLSR versjon 2
<b>OS</b>	OperativSystem
<b>OSPF</b>	Open Shortest Path First

<b>OSPF-MDR</b>	Open Shortest Path First with MANET Designated Routers
<b>QoS</b>	Quality of Service
<b>RFC</b>	Request For Comments
<b>RIP</b>	Routing Information Protocol
<b>RTT</b>	Round Trip Time
<b>TC</b>	Topology Control
<b>UAV</b>	Unmanned Aerial Vehicle
<b>UDG</b>	Unit Disk Graph
<b>VHF</b>	Very High Frequency
<b>WCETT</b>	Weighted Cumulative ETT
<b>WMN</b>	Wireless Mesh Network