

VU Research Portal

Hierarchical Routing in Low-Power Wireless Networks

Iwanicki, K.S.

2010

document version

Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)

Iwanicki, K. S. (2010). *Hierarchical Routing in Low-Power Wireless Networks*. [PhD-Thesis - Research and graduation internal, Vrije Universiteit Amsterdam].

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:

vuresearchportal.ub@vu.nl

Hierarchische Routing in Draadloze Netwerken met Weinig Vermogen

Draadloze sensornetwerken zijn een recente vorm van netwerken met weinig vermogen die een nieuwe klasse vormen binnen de informatica. Ze bestaan uit talrijke kleine draadloze apparaatjes die, ingebed in de fysieke ruimte, samen verschillende kenmerken van de omgeving kunnen waarnemen en besturen. Hun doel is o.a. het uitbreiden van de digitale wereld van het Internet met de mogelijkheid om op afstand de fysieke ruimte waar te kunnen nemen en te controleren. Om dit doel te bereiken moeten zulke apparaatjes draadloos communiceren met elkaar en met andere apparatuur op het Internet.

De fundamentele functionaliteit die twee Internet apparaten in staat stelt om te communiceren is punt-tot-punt routing. Dit is de enige functionaliteit die geïmplementeerd is door alle Internet apparaten, zij het in de Internet kern of aan zijn randen. Aangezien een apparaat (een knoop) in het Internet alleen direct kan communiceren met een minieme deelverzameling van alle knopen (een netwerkkabel verbindt b.v. slechts twee knopen en een radio heeft slechts beperkt bereik) moet over het algemeen de data die door een knoop verzonden wordt door tussenliggende knopen doorgestuurd worden om de knoop van bestemming te bereiken (mogelijkerwijs aan de andere kant van de aardbol). Deze tussenliggende knopen vormen een pad en het doel van punt-tot-punt routing is het vinden van paden in een netwerk waarover data tussen knopen verzonden worden. Daarom is punt-tot-punt routing cruciaal in het Internet om communicatie mogelijk te maken tussen elk paar knopen, d.w.z., om de illusie van volledige connectiviteit te creëren in een netwerk waarin slechts weinig knopen direct kunnen communiceren.

In het begin werd punt-tot-punt routing niet noodzakelijk geacht voor sensornetwerken. Recent onderzoek heeft die visie veranderd: punt-tot-punt routing is belangrijk voor vele sensornetwerkapplicaties, in het bijzonder als sensorknopen volwaardige Internet apparaten moeten worden. Het doel van deze dissertatie is het ontwikkelen van een punt-tot-punt routingsprotocol dat geschikt is voor sensornetwerken.

Het ontwikkelen van zo'n protocol is zeer uitdagend. Doordat sensorknopen ingebed zijn in de fysieke ruimte zijn ze sterk beperkt in termen van middelen, zoals energie, geheugen, bandbreedte en rekencapaciteit. Verder vertoont draadloze communicatie op laag vermogen verscheidene eigenaardige fenomenen die maken dat het onbetrouwbaar is en moeilijk te realiseren. Tenslotte worden de knopen vaak in grote aantallen toegepast om alle meet -en controlepunten af te dekken.

Behalve wat andere kleine uitdagingen is de grootste uitdaging die deze eigenschappen van sensornetwerken introduceren voor routing het simultaan garanderen van de volgende eigenschappen. Ten eerste, gegeven de beperkte middelen van een sensorknoop moet een routeringsprotocol slechts een kleine *routing state* hebben, wat noodzakelijk is voor schaalbaarheid en efficiëntie. Bovendien moet het protocol een kleine *routing stretch* bieden, d.w.z., de routeringspaden die het vindt moeten dicht bij de optimale paden liggen, wat belangrijk is voor de efficiëntie en betrouwbaarheid. Dit reduceert namelijk de globale consumptie van middelen en verbetert de *end-to-end* datasnelheden. Verder moet het protocol bestand zijn tegen communicatiefouten en het falen van knopen, in het bijzonder gezien de onbetrouwbare aard van draadloze communicatie op laag vermogen en de interactie van de sensorknopen met de omgeving. Tenslotte moet het protocol zich in hoge mate zelf beheren, omdat dit de uitrol en het onderhoud van grote netwerken vereenvoudigt, welke inherent zijn in veel sensornetwerkapplicaties.

Deze vereisten worden in meer detail uitgelegd in Hoofdstuk 2, gebaseerd op een analyse van een aantal bestaande en een aantal toekomstige sensornetwerkapplicaties. Bovendien bevat deze analyse een sterk argument dat het onwaarschijnlijk is dat deze eisen op de korte termijn zullen veranderen door de voortgang van de technologie. Sensornetwerken zullen gebaseerd moeten zijn op laag vermogen, een kleine vormfactor, en lage prijs per eenheid. Dat betekent dat alle beperkingen en eigenaardigheden van sensornetwerken opgelost zullen moeten worden in software. Derhalve is het erg waarschijnlijk dat de onderzoeksresultaten die in deze dissertatie gepresenteerd worden voor lange tijd relevant zullen blijven.

Een analyse van gerelateerd werk over punt-tot-punt routing, zoals beschreven in het tweede deel van Hoofdstuk 2 levert enkele cruciale observaties op. Aan de ene kant bestaat er een heel spectrum van routingstechnieken die potentieel geschikt zijn voor sensornetwerken, en die robuustheid en zelfbeheer beloven. Aan de andere kant toont de theorie over routing aan dat er een inherente afweging is tussen *routing state* en *routing stretch* die al deze technieken moeten maken. Kortgezegd: hoe kleiner de *state* in een techniek, hoe groter de *stretch* en vice versa. Daardoor kan het spectrum van technieken opgedeeld worden in een paar grote gebieden afhankelijk van de *state-stretch* afweging die zij maken. Vervolgens kan opgemerkt worden dat één van de meest veelbelovende gebieden in het techniekspectrum, corresponderend met hiërarchische routing nog niet veel aandacht gekregen heeft. In het bijzonder is er naar mijn weten nog geen hiërarchisch routeringsprotocol voor sensornetwerken geïmplementeerd en geëvalueerd.

Het belangrijkste idee achter hiërarchische routing is om de knopen in een meerlaagse hiërarchie van clusters te organiseren. Met zo'n structuur kan een knoop, in plaats van *routing state* voor elke knoop in het netwerk bij te houden, slechts de *routing state* van een paar clusters in zijn nabijheid bijhouden. Op deze manier kan de *routing state* enorm gereduceerd worden tot een polylogaritmische functie van de grootte van de knopenpopulatie.

Echter, zo'n reductie in *routing state* wordt afgewogen tegen een toename van *routing stretch*. In theorie kan de toename in *stretch* in hiërarchische routing groot zijn in bepaalde netwerktopologieën. Men kan speculeren dat dit de hoofdreden is waarom hiërarchische routing in sensornetwerken zo weinig onderzocht is.

Een andere plausibele reden is dat, zelfs als we de problemen veroorzaakt door beperkte middelen en de eigenaardigheden van sensornetwerken buiten beschouwing laten, hiërarchische routing vrij moeilijk te implementeren is. In het bijzonder het fundamentele probleem van deze routingstechniek — het organiseren van de knopen in de clusterhiërarchie en het in stand houden van de hiërarchie wanneer knopen falen of de netwerkconnectiviteit verandert — is extreem complex. Deze twee kwesties maken hiërarchische routing onaantrekkelijk voor sensornetwerken, ondanks zijn andere merites.

Deze dissertatie betwist deze visie en promoot hiërarchische routing. Er zijn drie motiverende factoren achter hiërarchische routing. Ten eerste, hiërarchische routing biedt zeer kleine *routing state*. Ten tweede, hoewel de *stretch* in hiërarchische routing theoretisch groot kan zijn als arbitraire topologieën beschouwd worden, zijn de topologieën van sensornetwerken door hun inbedding in de fysieke ruimte over het algemeen “geometrisch”. Dit betekent dat de lengte van een routingspad snel groeit naarmate de knooppopulatie groeit. De theorie heeft bewezen dat in zulke topologieën hiërarchische routing zowel kleine *state* en kleine *stretch* kan bieden. Ten derde, het implementeren van hiërarchische routing hoeft niet noodzakelijkerwijs moeilijker te zijn dan het implementeren van andere technieken. Met name door het afzwakken van sommige van de hiërarchische eigenschappen kan men lokaal-werkende algoritmen ontwerpen waarin knopen zichzelf in een hiërarchie organiseren en deze autonoom onderhouden op een zeer robuuste en efficiënte manier. Derhalve, alles samen nemend, heeft hiërarchische routing de potentie om een overtuigende punt-tot-punt routingstechniek voor sensornetwerken te zijn.

Om het bovenstaande argument te ondersteunen wordt in Hoofdstuk 3 een praktisch hiërarchisch routingsprotocol voor sensornetwerken geïntroduceerd, genaamd *PL-Gossip*. Naar mijn weten is *PL-Gossip* het eerste hiërarchische

routeringsprotocol dat effectief geïmplementeerd is voor sensornetwerken. Het ontleedt hiërarchische routing in drie algemeen erkende beheersbare abstracties die corresponderen met verschillende aspecten van routing in sensornetwerken, te weten het schatten van de verbindingskwaliteit, het onderhoud van de *routing state* en het doorsturen van netwerkpakketen. Het legt uit hoe elk van deze abstracties geïmplementeerd kan worden om hiërarchische routing te ondersteunen.

De meest uitdagende en cruciale routeringsabstractie in hiërarchische routing is onderhoud van de *routing state*, d.w.z., het onderhoud van de clusterhiërarchie zichtbaar in de routingstabellen en routeringsadressen van knopen. Zoals eerder opgemerkt is de complexiteit van dit probleem waarschijnlijk één van de redenen dat hiërarchische routing nog niet geïmplementeerd en geëvalueerd is in sensornetwerken. Daarom legt *PL-Gossip* extra nadruk op het probleem van het onderhouden van de clusterhiërarchie.

Om het probleem praktisch te hanteren te maken richt *PL-Gossip* zich op *best-effort* hiërarchieën in plaats van op optimale hiërarchieën. Met name laat Hoofdstuk 3 zien hoe de eigenschappen van een clusterhiërarchie aangepast kunnen worden zodat bewezen (zie Appendix A) kan worden dat de hiërarchie: ten eerste, geschikt is voor hiërarchische routing, ten tweede, het potentieel heeft om kleine *routing state* te bieden, en ten derde, onderhouden kan worden door echte sensorknopen. Zulke aanpassingen hoeven echter niet altijd dezelfde te zijn als die in Hoofdstuk 3. Ze worden namelijk veranderd in daaropvolgende hoofdstukken van de dissertatie, zelfs om verschillende typen hiërarchieën te beschrijven. Dit is slechts één van de voorbeelden waaruit blijkt dat *PL-Gossip* ideeën introduceert die breder toepasbaar zijn.

Om de eigenschappen van een clusterhiërarchie te onderhouden stelt de variant op *PL-Gossip* gepresenteerd in Hoofdstuk 3 voor om een combinatie van twee simpele concepten te gebruiken: lokale operaties voor het wijzigen van de hiërarchie en asynchroon lokaal roddelen (*gossip*) voor het verspreiden van zulke modificaties naar de betreffende knopen. Dit is voldoende om de knopen die *PL-Gossip* draaien zichzelf te laten organiseren in een clusterhiërarchie, beschreven door een verzameling specifieke eigenschappen (en deze te onderhouden). Echter, al zijn deze twee concepten simpel, het combineren ervan om autonoom onderhoud van de hiërarchie mogelijk te maken creëert een aantal uitdagingen. Zulke uitdagingen zijn verbonden aan, b.v. het consistent toepassen van hiërarchiemodificaties door de betreffende knopen, of het kiezen van clusters op laag niveau die gepromoveerd zullen worden naar een hoger niveau. Veel inspanning is gericht op het bieden van oplossingen voor deze niet-triviale uitdagingen en om de correctheid van de oplossing analytisch te

bewijzen. Deze oplossingen zijn echter simpel waardoor de implementatie van *PL-Gossip* op echte sensorknopen gefaciliteerd wordt. Alles bij elkaar illustreert Hoofdstuk 3 dat men inderdaad een praktisch autonoom-beheerd hiërarchisch routeringsprotocol voor sensornetwerken kan ontwerpen.

De ontwikkeling van *PL-Gossip* maakt het mogelijk om hiërarchische routing experimenteel te evalueren in verscheidene opstellingen van sensornetwerken, wat het onderwerp is van Hoofdstuk 4. De evaluatie gebruikt drie experimentele platformen: een hoog-niveau simulator; TOSSIM, een laag-niveau simulator voor sensornetwerken met realistische modellen van draadloze communicatie op laag vermogen; en een echt *testbed* van meer dan 50 knopen dat ik aan de Vrije Universiteit gebouwd heb (zie Appendix B). Hiërarchische routing wordt geëvalueerd met betrekking tot de eerder genoemde vereisten voor een routeringsprotocol voor sensornetwerken: *routing state*, *routing stretch* en robuustheid.

De evaluatie laat zien dat hoewel het niet gericht is op optimale clusterhiërarchieën het inderdaad zeer kleine *routing state* kan bieden. Bovendien kan *PL-Gossip* ondanks zo'n kleine *state* in de praktijk ook kleine *stretch* bieden, gemiddeld binnen 50% van de optimale waarde, wat het gevolg is van de eerdergenoemde geometrische aard van sensornetwerken. Tenslotte is *PL-Gossip* ook robuust in de zin dat fouten relatief weinig verstoring veroorzaken en dat het protocol hiervan relatief snel herstelt. Deze resultaten suggereren dat hiërarchische routing inderdaad een aantrekkelijke punt-tot-punt routingstechniek is voor sensornetwerken.

Verder beperkt de evaluatie van hiërarchische routing in Hoofdstuk 4 zich niet tot het beschreven *PL-Gossip* protocol. Zoals boven beargumenteerd is *PL-Gossip* geen vastgelegd en monolithisch protocol maar vormt het een basis voor een protocol en introduceert het ideeën die breder toepasbaar zijn en waarmee geëxperimenteerd kan worden. Daarom is er i.p.v. alleen een *PL-Gossip* implementatie een volledige hiërarchische routeringsbibliotheek geïmplementeerd voor de evaluatie. De bibliotheek definieert een gemeenschappelijk raamwerk voor een hiërarchisch routeringsprotocol voor sensornetwerken, gebaseerd op de lessen die geleerd zijn uit *PL-Gossip*. Tegelijkertijd echter identificeert het een aantal ontwerppunten. Door de oplossingen op deze ontwerppunten te variëren kan men verschillende mechanismen (en nieuwe ideeën) voor hiërarchische routing evalueren en vergelijken. De broncode van de bibliotheek is publiek beschikbaar gemaakt (zie Appendix C.1).

De bibliotheek maakt het uitvoeren van diepgaande evaluaties van verschillende ontwerpbeslissingen mogelijk die van invloed zijn op *routing state*,

routing stretch en de robuustheid van hiërarchische routing zelf. Eén van zulke ontwerpapunten die bestudeerd wordt in Hoofdstuk 4 is het type en de eigenschappen van een cluster hiërarchie. In het bijzonder wordt aangetoond dat een *landmark*-hiërarchie normaliter grotere *state* vereist dan een *area*-hiërarchie, maar daar voor in de plaats biedt het kleinere *stretch*, gemiddeld ongeveer binnen 25% van de optimale waarde. Deze kan verder gewijzigd worden door specifieke eigenschappen van de hiërarchie te variëren. Met andere woorden, door het type of de eigenschappen van een clusterhiërarchie te variëren kan men de afweging tussen *state* en *stretch* in hiërarchische routing zelf verder exploreren. Een ander ontwerpapunten dat bestudeerd wordt in Hoofdstuk 4 is de methode voor het propageren van informatie over de hiërarchie. Behalve lokaal asynchroon roddelen zoals gebruikt door de variant van *PL-Gossip* in Hoofdstuk 3, worden een bekende op *flooding* gebaseerde methode en een nieuwe hybride methode bestudeerd. Kortom, er wordt aangetoond dat verschillende methoden verschillende aspecten van robuustheid beïnvloeden, dus wederom: hiërarchische routing kan geoptimaliseerd worden naar een specifieke gekozen metriek. Alles bij elkaar bevestigt de evaluatie van hiërarchische routing uitgevoerd in Hoofdstuk 4 dat hiërarchische routing aantrekkelijk is voor sensornetwerken, maar laat ook zien dat het aangepast kan worden voor specifieke toepassingen.

Aangezien het onderzoek in Hoofdstuk 3 en Hoofdstuk 4 het bovengenoemde gat vult in het spectrum van routingstechnieken maakt dit het mogelijk om representatieve technieken uit het gehele spectrum experimenteel te vergelijken. Zo'n initiële vergelijking is het onderwerp van Hoofdstuk 5.

Om deze vergelijking uit te voeren is er een andere bibliotheek geïmplementeerd, die deze keer verschillende technieken omvat, zoals beschreven in Hoofdstuk 5. De bibliotheek omvat vier van deze technieken, die samen het hele spectrum van *state-stretch* afwegingen representeren: *shortest-path* routing, welke de grootste *state* vereist maar minimale *stretch* biedt, compacte en hiërarchische routing, die met verschillende granulariteit *state* reduceren ten koste van *stretch*, en *constant-state* routing, welke de kleinste *state* nodig heeft maar de grootste *stretch* oplevert. Het grootste deel van de code wordt gedeeld door alle technieken, wat de implementatie van deze technieken voor een groot deel uniform maakt. De bibliotheek is geëvalueerd in TOSSIM en met de twee *testbeds*: een *testbed* van 50⁺ knopen en van 100⁺ knopen. De evaluatie richt zich op de afweging *state/stretch*.

Naast wat kleine resultaten levert de evaluatie twee grote bijdragen. Ten eerste, het illustreert een algemene eigenschap van *sublinear-state* routingstechnieken. Specifieker gezegd, door de geometrische aard van

sensornetwerkinstallaties bieden de meeste technieken met *sublinear-state* een *routing stretch* welke dicht bij de optimale ligt. Met andere woorden, in sensornetwerken houdt een grote reductie in *routing state* normaliter slechts een kleine toename van *routing stretch* in. Dit leidt tot de tweede bijdrage, welke direct gerelateerd is aan hiërarchische routing. Specifieker gezegd, hiërarchische routing biedt een grote reductie in *state* met slechts een kleine toename in *stretch* in vergelijking met de andere representatieve technieken. In het bijzonder biedt hiërarchische routing, in vergelijking met compacte routing, een *state* die ten minste een orde van grootte betere schaalbaarheid toestaat, terwijl de *stretch* maar weinig beïnvloed wordt met minder dan 10–15% gemiddeld, wat voor sensornetwerktoeepassingen de prestaties niet significant zal verslechteren. Alles bij elkaar suggereert Hoofdstuk 5 (behalve dat het ook het argument dat hiërarchische routing een aantrekkelijke techniek voor sensornetwerken is versterkt) dat vanuit het perspectief van het spectrum van *state/stretch* afwegingen, hiërarchische routing een afweging biedt die aantoonbaar het meest aantrekkelijk is voor vele sensornetwerktoeepassingen.

Samenvattend, de conclusie die getrokken kan worden uit alle onderzoeksresultaten is dat de these zoals geformuleerd in deze dissertatie geldig is.

Hiërarchische routing is een overtuigende punt-tot-punt routingstechniek voor grote sensornetwerken. In de praktijk biedt het niet alleen kleine routing state, maar ook kleine routing stretch. Bovendien is het mogelijk om robuuste, efficiënte, autonome hiërarchische routingsprotocollen aan te bieden die in de praktijk werken.