

# Service Discovery in Mobile Ad Hoc Networks

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften  
von der Fakultät für Informatik der Universität Karlsruhe

genehmigte  
Dissertation

von  
MSc. Jidong Wu  
aus Zhejiang

Tag der mündlichen Prüfung:	19. 04. 2005
Erster Gutachter:	Prof. Dr. Martina Zitterbart
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr. Adam Wolisz



Berichte aus der Telematik

**Jidong Wu**

**Service Discovery in  
Mobile Ad Hoc Networks**

Shaker Verlag  
Aachen 2005

**Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at <http://dnb.ddb.de>.

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2005

Copyright Shaker Verlag 2005

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-4132-9

ISSN 0948-700X

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Telematik der Universität Karlsruhe (TH). Mein Dank gilt allen, die mich während dieser Zeit in fachlicher, organisatorischer und persönlicher Hinsicht unterstützt haben.

An erster Stelle möchte ich mich bei meiner Betreuerin Frau Prof. Dr. Martina Zitterbart bedanken, die mir die Möglichkeit zur erfolgreichen Promotion in ihrer Forschungsgruppe gab und mich von Beginn an hervorragend gefördert und unterstützt hat. Sowohl bei der Themenfindung als auch bei den darauffolgenden Diskussionen war sie immer offen für neue Ideen und gab wertvolle Kommentare und Anregungen, durch die sie wesentlich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen hat. Während meiner Tätigkeit in ihrer Forschungsgruppe, insbesondere in der Endphase der Arbeit, hat sie mir genügend Freiräume gewährt, um mich angemessen auf die Anfertigung und Abgabe der Arbeit und die Prüfung vorzubereiten. Sie hat meinen wissenschaftlichen Werdegang durch ihr Vorbild sowie durch ihren reichen Erfahrungsschatz in fachlicher und organisatorischer Hinsicht sowie im Umgang mit Menschen entscheidend geprägt.

Bei Herrn Prof. Dr. Adam Wolisz bedanke ich mich recht herzlich für die Übernahme des Korreferats und für wertvolle Anregungen und Kommentare zu meiner Arbeit.

Außerdem möchte ich allen Kollegen am Institut für Telematik für die angenehme Zusammenarbeit und das freundschaftliche Betriebsklima meinen Dank aussprechen. Mein besonderer Dank gilt Oliver Stanze und Dr. Kilian Weniger für die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen im Rahmen des IPonAir-Projektes. Weiterhin möchte ich Dr. Roland Bless, Dr. Jörg Diederich, Mark Doll, Dr. Andreas Fieger, Kai Krasnodembski, Detlev Meier und Leo Petrak für ihre fachliche und organisatorische Hilfe danken.

Ein ganz besonderer Dank geht an dieser Stelle an meine Studenten, die im Rahmen ihrer Diplomarbeiten zu der vorliegenden Arbeit beigetragen haben. Stellvertretend sei Laurent Asselborn genannt, der einen entscheidenden Beitrag zum Entwurf und zur Realisierung eines im Rahmen der Arbeit entwickelten Ansatzes geleistet hat.

Für das Korrekturlesen der Arbeit sei Curt Cramer und Dr. Jie Tao gedankt. Ihre Anregungen und Verbesserungsvorschläge haben die Ausarbeitung wesentlich verbessert.

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie der Hanns-Seidel-Stiftung sei für die anteilige Finanzierung meiner Forschungsarbeiten gedankt.

Des Weiteren möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich zur Promotion ermutigt haben. Namentlich seien an dieser Stelle Prof. Chun Chen, Prof. Yunhe Pan, Prof. Yimin Wang, Prof. Dexin Zhang, Prof. Dongming Lu, Prof. Ping Chen und Zhenggqian Huang genannt.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für die hilfreiche

Unterstützung bedanken. Der größte Dank gilt meiner Frau Lei Lu und meinen Kindern Erik Bowen, Leon Boyu und Luka Borui, die mich unterstützt und motiviert haben, aber auch oft auf meine Anwesenheit verzichten mussten.

## Preface

This thesis is the result of my research when I worked in the research group led by Professor Martina Zitterbart at the Institute of Telematics, University of Karlsruhe, Germany. I am indebted to many people, who have helped me through the journey of pursuing the doctoral degree.

First and foremost, I am truly grateful to Professor Martina Zitterbart, who gave me the opportunity to make a deep research in the interesting field of mobile ad hoc networking. For years she has been providing me invaluable support. Actually, I have been so fortunate to have her as my advisor. From forming the research problem, to paper writing, and to presentation skills, she has spent uncountable hours helping develop me as a scientific researcher. She gave me all the freedom of conducting research, offering her keen insight whenever I needed it.

In addition, I thank Professor Adam Wolisz sincerely for his valuable criticism and insightful comments on the thesis.

I thank all the colleagues at the Institute of Telematics because without them I would not have been able to enjoy the working atmosphere with pleasure and friendship all these years. I give my special thanks to Oliver Stanze and Dr. Kilian Weniger, who have brought me fruitful discussions through our team work in the project IPonAir. In addition, I thank Dr. Roland Bless, Dr. Jörg Diederich, Mark Doll, Dr. Andreas Fieger, Kai Krasnodembski, Detlev Meier, and Leo Petrak for their help. I also thank the students who worked with me during the time that they wrote their Diplom-theses. One of them, Laurent Asselborn, has contributed greatly to one of the approaches developed in this thesis.

Curt Cramer and Dr. Jie Tao are acknowledged for the helpful comments and advice on the thesis.

I thank the German Federal Ministry of Education and Research as well as the Hanns-Seidel-Stiftung Foundation for their financial support.

I thank the people who encouraged me to start the journey for a Ph.D many years ago. Among them are Professor Chun Chen, Professor Yunhe Pan, Professor Yimin Wang, Professor Dexin Zhang, Professor Dongming Lu, associate Professor Ping Chen, and Zhengqian Huang.

Lastly, I thank my friends and my family for their support. I give extra special thanks to my wife Lei Lu, who has given me her support and encourage continuously. Especially, it is she and my children Erik Bowen, Leon Boyu, and Luka Borui who have been motivating me.





## Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Lokalisation von Dienstgebern, der so genannten *Dienstsuche*, in mobilen Ad-hoc-Netzen (MANETs). Ein mobiles Ad-hoc-Netz wird von mobilen Knoten, z.B. Laptops und PDAs, die drahtlos miteinander kommunizieren können, spontan aufgebaut. Es existiert keine Infrastruktur in MANETs. Infolgedessen sind MANETs vielfältig und schnell einsetzbar. Dennoch sind Mechanismen zur Dienstsuche erforderlich, weil die Informationen über Dienstgeber selten im Voraus statisch konfiguriert werden können. Außerdem ändert sich die Verfügbarkeit von Diensten in MANETs häufig. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind drei Ansätze vorgestellt: der *Anycast-basierte Ansatz*, der Ansatz *Service Awareness Caching* und der Ansatz *Distributed Service Directory*. Diese drei Ansätze zählen zu unterschiedlichen Kategorien der Dienstsuche.

Der Anycast-basierte Ansatz ermöglicht es, dass Dienstnehmer mit nächsten Dienstgeber kommunizieren, indem sie die Dienstanfragen an eine so genannte Anycast-Adresse senden, die bestimmten Diensten zugewiesen wird. Dafür muss jedoch Anycast vom verwendeten Ad-hoc-Routingprotokoll unterstützt werden. In der vorliegenden Arbeit wurden zwei bekannten Ad-hoc-Routingprotokolle zur Unterstützung von Anycast erweitert. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass diese Anycast-Erweiterungen hinsichtlich der Latenz und des Kontrollaufwands eine effiziente Dienstsuche ermöglichen.

Der Ansatz Service Awareness Caching gehört zu der Kategorie der so genannten unstrukturierten Ansätze. Bei unstrukturierten Ansätzen fluten Dienstnehmer zur Lokalisierung der Dienstgeber ihre Dienstanfragen. Unstrukturierte Ansätze bieten eine robuste Lösung zur Dienstsuche, das ihnen inhärente Fluten führt jedoch zu hohem Aufwand. Bei dem Ansatz Service Awareness Caching werden Dienstinformationen zwischengespeichert. Die so gespeicherten Dienstinformationen können durch Feedback des Routingprotokolls aktualisiert werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass der Aufwand der Dienstsuche dadurch deutlich reduziert werden kann.

Der Ansatz Distributed Service Directory gehört zur Kategorie der so genannten strukturierten Ansätzen. Bei solchen Ansätzen wird eine Kontrollstruktur in MANETs zwecks Dienstsuche aufgebaut. Dienstnehmer können Dienstanfragen an die Kontrollstruktur senden, um Dienstgeber zu lokalisieren. Strukturierte Ansätze vermeiden die Verwendung von Fluten bei Dienstanfragen, aber dafür sind komplexe Mechanismen zum Aufrechterhalten der Struktur notwendig. Bei dem Ansatz Distributed Service Directory wird eine Menge von Knoten dynamisch gewählt. Diese Knoten halten durch die Verwendung einer Hash-Funktion ein dezentralisiertes Verzeichnis aufrecht, in dem Dienstinformationen gespeichert werden. Die Simulationsergebnisse zeigen die Leistungsfähigkeit von dem Ansatz Distributed Service Directory.



## Abstract

This thesis studies service discovery in mobile ad hoc networks (MANETs): the problem of locating service providers in MANETs. A mobile ad hoc network (MANET) is a collection of mobile nodes, e.g., laptops and PDAs, which communicate over wireless connections and create a network “on the fly”. Not depending on a fixed infrastructure, MANETs can be quickly deployed. Nevertheless, service discovery mechanisms are needed for dynamically locating services available in MANETs, since the location of services is hardly known a priori and the availability of services may change unexpectedly due to mobility. In this thesis the following three methods are proposed and evaluated: anycast-based service discovery, service awareness caching, and the distributed service directory. These three methods apply completely different approaches to service discovery, and have their own advantages and disadvantages.

With anycast-based service discovery, service clients are able to communicate with the closest provider of a service by sending service requests to a special type of addresses (i.e., anycast addresses). Nevertheless, anycast-based service discovery requires that anycast routing is supported by ad hoc routing protocols. Therefore, support for anycast routing for well-known ad hoc unicast routing protocols has been developed. Simulations show that these enhanced ad hoc routing protocols provide a very efficient solution to service discovery in terms of latency and control overhead.

Service awareness caching applies the so-called unstructured approach to service discovery. With unstructured approaches, service clients flood their service search messages in order to locate services. Although such approaches provide robust solutions to service discovery, flooding could produce excessive overhead. With service awareness caching, service information is cached by service clients and updated not only by new service discovery messages but also by the information leveraged from routing functions. Simulations show that the method of service awareness caching helps keep the service information up-to-date and reduces overhead significantly.

The distributed service directory applies the so-called structured approach to service discovery, in which some form of control structure is built in MANETs for the purpose of service discovery. Service clients send service search messages to this structure in order to locate services. Compared with unstructured approaches, structured approaches avoid flooding service search messages, but require complex mechanisms in order to maintain the control structure. With the distributed service directory, a set of nodes is dynamically selected. These nodes use a hash function to maintain a distributed service directory, which stores service information. Simulations show the applicability and the performance of the distributed service directory.



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Problem statement . . . . .	2
1.3	Goals of the dissertation . . . . .	3
1.4	Overview of approaches . . . . .	3
1.5	Contributions and outline . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Background</b>	<b>7</b>
2.1	Unicast routing in ad hoc networks . . . . .	8
2.1.1	Routing approaches . . . . .	8
2.1.2	Proactive routing protocols . . . . .	14
2.1.3	Reactive routing protocols . . . . .	22
2.1.4	The Zone Routing Protocol (ZRP): a hybrid routing protocol . . . . .	28
2.1.5	Discussion . . . . .	29
2.2	Approaches to service discovery . . . . .	30
2.2.1	Existing service discovery protocols . . . . .	31
2.2.2	Service discovery in mobile ad hoc networks . . . . .	35
2.3	IP anycast . . . . .	43
2.3.1	Basic concept of anycast . . . . .	43
2.3.2	Anycast routing . . . . .	44
2.3.3	Discussion . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Anycast routing in mobile ad hoc networks</b>	<b>47</b>
3.1	Introduction . . . . .	47
3.2	Anycast routing for on-demand routing protocols . . . . .	49
3.2.1	Anycast peer . . . . .	49
3.2.2	Anycast route discovery and maintenance . . . . .	51
3.2.3	Anycast echo procedure . . . . .	53
3.3	Loop-freedom of AODVA . . . . .	56
3.3.1	Notation and proposition . . . . .	56
3.3.2	Proof of loop-freedom of AODVA . . . . .	58
3.4	Simulative analysis of on-demand anycast routing . . . . .	59
3.4.1	Implementation of AODVA for simulation . . . . .	59
3.4.2	Simulation configurations . . . . .	62

3.4.3	Discussion of results . . . . .	64
3.4.4	Impact of anycast group size . . . . .	66
3.4.5	Impact of offered load . . . . .	70
3.5	Prototype implementation of AODVA-based service discovery . . . . .	73
3.5.1	AODV anycast routing implementation . . . . .	73
3.5.2	Application software: webcam server/client . . . . .	75
3.5.3	Topology controller . . . . .	76
3.5.4	Demonstration setup . . . . .	77
3.6	Simulative comparison of anycast-based and multicast-based service discovery . . . . .	78
3.6.1	Simulation setup . . . . .	78
3.6.2	Performance metrics . . . . .	80
3.6.3	Service provision through single service provider . . . . .	81
3.6.4	Service provision through multiple service providers . . . . .	82
3.7	Anycast routing for proactive routing protocols . . . . .	85
3.7.1	Anycast routing for OLSR . . . . .	85
3.7.2	Performance evaluation of service discovery with AOLSR . . . . .	90
3.8	Summary . . . . .	93
<b>4</b>	<b>Service awareness caching</b>	<b>97</b>
4.1	Introduction . . . . .	98
4.1.1	Caching service information . . . . .	98
4.1.2	Cross-layer interaction for service awareness caching . . . . .	100
4.1.3	APIs for service discovery . . . . .	101
4.2	Data structures for service awareness caching . . . . .	102
4.2.1	Service awareness cache . . . . .	102
4.2.2	Local service table . . . . .	103
4.2.3	Duplication table . . . . .	103
4.3	Maintenance of the service awareness cache . . . . .	104
4.3.1	Service search . . . . .	104
4.3.2	Cache update . . . . .	105
4.3.3	Service advertisement . . . . .	109
4.3.4	Neighbor solicitation . . . . .	109
4.4	Setup of simulative analysis . . . . .	110
4.4.1	Simulation environment . . . . .	110
4.4.2	Simulation setup . . . . .	110
4.4.3	Performance metrics . . . . .	112
4.5	Discussion of simulation results for SAHOC with AODV . . . . .	114
4.5.1	Result in the environments with single service provision . . . . .	114
4.5.2	Service provision with multiple service providers . . . . .	122
4.6	Discussion of simulation results for SAHOC with OLSR . . . . .	128
4.6.1	Service provision with single service provision . . . . .	128
4.6.2	Service provision with multiple service providers . . . . .	135
4.7	Comparison of performance . . . . .	141
4.7.1	Impact of routing protocols . . . . .	141

4.7.2	Comparison of SAHOC and anycast-based service discovery . . . . .	142
4.8	Summary . . . . .	143
<b>5</b>	<b>Structured service discovery</b>	<b>145</b>
5.1	Design space for structured service discovery . . . . .	145
5.1.1	Formation of a service location overlay network . . . . .	146
5.1.2	Access to the service location network . . . . .	147
5.1.3	Distribution of service information on the service location network . . . . .	148
5.1.4	Summary . . . . .	148
5.2	Distributed service directory . . . . .	149
5.2.1	Formation and maintenance of service location zones . . . . .	151
5.2.2	Service registration and search . . . . .	152
5.3	Formation and maintenance of the distributed service directory . . . . .	153
5.3.1	Integrating of a new SLN-node . . . . .	154
5.3.2	Periodic exchange of the ID-table . . . . .	155
5.3.3	Recovery of SLN-nodes' failure . . . . .	156
5.3.4	Replication of service records . . . . .	156
5.3.5	Merging multiple service directories . . . . .	157
5.4	Simulative analysis of DSD . . . . .	157
5.4.1	Simulation environment . . . . .	158
5.4.2	Simulation setup . . . . .	158
5.4.3	Performance metrics . . . . .	159
5.4.4	Simulation results for DSD with AODV . . . . .	161
5.4.5	Simulation results for DSD with OLSR . . . . .	162
5.4.6	Comparison of control overhead . . . . .	162
5.5	Summary . . . . .	163
<b>6</b>	<b>Conclusions and future work</b>	<b>165</b>
6.1	Summary . . . . .	165
6.2	Future directions . . . . .	167