DISS. ETH NO. 21958
DISS. TIK NO. 145

Delay Tolerant Networks with Heterogeneous Mobility: Models and Implications for Algorithms

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

ANDREEA MARIA HOSSMANN

Ingénieur diplômé in Telecommunications INSA Lyon
Master Recherche in Computer Science INSA Lyon
born August 14, 1983
citizen of Romania

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Bernhard Plattner, examiner
Prof. Dr. Matthias Grossglauser, co-examiner
Prof. Dr. Thrasyvoulos Spyropoulos, co-examiner

2014

Berichte aus der Informatik

Andreea Maria Hossmann-Picu

Delay Tolerant Networks with Heterogeneous Mobility: Models and Implications for Algorithms

Shaker Verlag
Aachen 2014

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at http://dnb.d-nb.de.

Zugl.: Zürich, ETH, Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014
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 978-3-8440-2982-6
ISSN 0945-0807

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Essentially, all models are wrong, but some are useful.
The practical question is how wrong do they have to be to not be useful.

~ George E. P. Box

Acknowledgments

I would like to first express my gratitude to Prof. Bernhard Plattner for making this work possible and for his support throughout the project. He managed to give me the right mix of freedom and direction and motivated me to achieve my potential in my research work. My heartfelt appreciation goes to my advisor Prof. Thrasyvoulos Spyropoulos, for being the dedicated, supportive, and resourceful researcher he is. His guidance made my journey much more enjoyable, even at times of great pressure. I also thank Prof. Matthias Grossglauser for being co-examiner and for his feedback on this dissertation.

Many thanks go to all the people I had the pleasure of collaborating with (in chronological order): Dr. Theus Hossmann, Dr. Domenico Giustiniano, Prof. Albert Banchs, Vincenzo Sciancalepore, Abouzar Noori, Sacha Trifunovic, Dr. Karin Hummel. I would also like to thank all my colleagues from the Communication Systems Group who have not been mentioned so far, for the stimulating discussions as well as the self-deriding, playful, personal, conspiring, and all in all enjoyable chats in the coffee corner, during the shared meals and beyond. In particular (in alphabetical order): Mahdi Asadpour, Udi Ben-Porat, Elisa Boschi, Dr. Daniela Brauckhoff, Dr. Martin Burkhart, David Gugelmann, Dr. Simon Heimlicher, Dr. Merkouris Karaliopoulos, Dr. Maciej Kurant, Dr. Franck Legendre, Dr. Wolfgang Mühlbauer, Dr. Stephan Neuhaus, Elias Raftopoulos, Dr. Dominik Schatzmann, Dr. Paul Smith, Dr. Bernhard Tellenbach, Ariane Trammell, Brian Trammell.

I am extremely grateful to my parents, Elena and Gheorghe, and to my brother Stefan, for their constant and unconditional love and support. I also thank my parents-in-law, Heidi and Karl, for their invaluable help, their warmth and their hospitality. Finally and most importantly, I give my deepest and most special thanks to my beloved husband Theus for his infinite love, understanding, patience and support, and to our wonderful Ivo.

Abstract

Wireless access methods to the Internet infrastructure, followed by the massive popularity of smartphones have given the Internet an utmost place in people's lives and revolutionized how we exchange, create and access information. However, the dependency on infrastructure is both costly and precarious: Mobile network operators must continuously invest in new or upgraded technology, to cope with the exponentially increasing traffic demands. Meanwhile, this expensive infrastructure has proven to be highly vulnerable in the face of ever more frequent calamities, both natural (tsunamis, earthquakes, hurricanes) and human-generated (censorship, war). To top things off, infrastructure developments are still lacking in remote and/or underdeveloped territories, due to very weak prospects for profitability, contributing significantly to maintaining the knowledge gap. In addition to its costliness and precariousness, legacy protocols and assumptions in the current Internet infrastructure may also be unnecessarily constraining for new mobile applications (e.g. location-based services).

In this context, the concept of *Delay Tolerant Networking* (DTN) is increasingly likely to be instrumental both in solving (some of) the above issues, as well as in harnessing the full potential of mobile communication devices (sensors, smartphones, tablets etc) through novel applications, such as floating content for local sharing. Designed to extend the TCP/IP-centered Internet to unreliable physical networks lacking end-to-end connectivity, DTN applies the *store-carry-forward principle* to transport data in a peer-to-peer fashion. Nodes use their capabilities for direct communication (Bluetooth, Wi-Fi Direct etc) to exchange data when they are in each other's proximity (in *contact*), they *store* these data locally and *carry* them through mobility until a new *forward*ing opportunity arises. In this way, an asynchronous communication service is provided, despite the absence of end-to-end paths. While the

service is potentially subject to noticeable delays, this is often acceptable or at least an acceptable compromise for many applications.

Given the above depicted operating principles, the graph representing a DTN's connectivity is expected to be highly dynamic, and only partially connected (if at all). Since any exchange of data or other information can only happen during contacts, understanding the dynamics of this graph and the node contact patterns behind it is key to providing an efficient DTN communication service. While an initially convenient assumption was that all nodes meet each other homogeneously (i.e., at the same average rate), numerous real world experiments have since shown that heterogeneity is a defining feature of node contact patterns and should not be abstracted away. Protocol design has promptly integrated this finding in new, sophisticated DTN solutions, aimed at exploiting heterogeneity. However, the complexity of mobility patterns involved, and often of the algorithms themselves, means that the evaluation of such newer protocols remains purely simulation-based. It is therefore a primary goal of this thesis to advance the analytical and modeling perspectives on DTN, so as to include heterogeneous node meeting patterns.

First, we revisit the analysis of epidemic spreading, a process central to many DTN algorithms, by which a message is replicated and transmitted from node to node, similarly to an infectious disease, eventually flooding the network. We relate in a new way the delay of epidemic spreading to a fundamental property, *conductance*, of an appropriate graph, capturing nodes' mobility processes. Conductance is representative of macroscopic mobility patterns such as community behavior, making it directly interpretable. This result allows us to obtain performance bounds for DTN protocols based on epidemic spreading, and to show that the delay of such protocols has logarithmic scaling properties (with the network size), as the conductance of DTN graphs remains unaltered by increasing network size. While we focus here on understanding the mobility properties themselves, by assuming a very simple, random forwarding protocol, we show in the following that our methodology can be extended to incorporate more complex forwarding protocols, or even algorithms for problems other than routing (e.g. group communication, distributed caching etc).

In a *second* contribution, we propose DTN-Meteo, a two-level modeling framework to analyse and forecast the performance of the newer, more sophisticated protocols, which actively exploit the heterogeneity of node mobility. Decoupling node mobility from algorithmic actions, DTN-Meteo, unlike any previous DTN analytical work, is generic and applies to a variety

of problems, from routing to content placement. Besides the obvious usage for quantitative performance evaluation, DTN-Meteo also offers invaluable insight into a protocol's inner-workings, which simulations alone cannot provide: it can evaluate the correctness of an algorithm and relate it to node mobility properties, it can be used to tune key protocol parameters, and even to tune simulations.

Our *third* contribution is based on an observation corroborated by DTN-Meteo: greedy algorithms (as are most DTN solutions) are not *correct* in many real world mobility scenarios. Taking the example of routing, this means that, even under ideal conditions (i.e. infinite buffer and bandwidth), the protocol is not guaranteed to work (i.e. find an existing path). This is usually due to messages getting stuck at relays who are local maxima of the utility function used for routing (e.g. node centrality). Relying on Markov chain Monte Carlo (MCMC) theory, we propose a simple way to modify such algorithms to make them correct, by applying smart randomization. Unlike greedy algorithms, who deterministically reject lower utility steps, MCMC solutions probabilistically accept lower utility steps, thus avoiding the blockage at local maxima. We show through analysis and simulation that our proposal effectively solves the correctness problem.

All in all, these contributions introduce significantly more realistic models and analyses of various DTN protocols, as well as enabling a more informed and systematic design of new algorithms.

Kurzfassung

Drahtlose Zugriffsmethoden zur Internet Infrastruktur und steigende Popularität von Smartphones haben dem Internet einen wichtigen Platz in unserem Alltag verliehen, und die Art Informationen auszutauschen, zu erzeugen und abzurufen revolutioniert. Diese Abhängigkeit von der Infrastruktur ist kostspielig und bedenklich: Mobilfunkbetreiber müssen ständig in neue und aufgerüstete Technologien investieren um den exponentiell ansteigenden Datenverkehr zu bewältigen. Dabei ist auch die beste und teuerste Infrastruktur fehleranfällig angesichts immer häufiger auftretender Kalamitäten, ob von der Natur (Tsunamis, Erdbeben, Hurrikane) oder von Menschen (Zensur, Krieg) verursacht. Darüber hinaus ist der Betrieb von Infrastruktur in abgelegenen und/oder unterentwickelten Gebieten aufgrund schwacher Rentabilitätsaussichten immer noch mangelhaft – was zur Erhaltung der Wissenskluft zwischen städtischen und abgelegenen Gebieten beiträgt. Ausser ihrer Kostspieligkeit und Anfälligkeit könnten veraltete Protokolle und Annahmen der heutigen Internet Infrastruktur auch unnötig beschränkend wirken für die Innovation neuer mobiler Applikationen (z.B. standortbezogener Dienste).

Die Idee des *Delay Tolerant Networking*s (DTN) kann dazu beitragen (einige) diese(r) Herausforderungen zu lösen, sowie das volle Potenzial mobiler Kommunikationsgeräte (Sensoren, Smartphones, Tablets, etc) durch neuartige Applikationen (z.B. schwebender Inhalt zur lokalen gemeinsamen Nutzung) umfassend zu nutzen. Das DTN – ursprünglich konzipiert zur Erweiterung des TCP/IP-zentrierten Internets auf physikalische Netzwerke ohne durchgehende Konnektivität – verwendet das *store-carry-forward Prinzip* um Daten auf peer-to-peer Weise zu transportieren. Die Netzwerkknoten benutzen ihre Fähigkeiten zur direkten Kommunikation (Bluetooth, Wi-Fi Direct etc) um Daten auszutauschen wenn sie in der unmittelbare Nähe voneinander sind (in *Kontakt*). Sie *speichern* diese Daten lokal auf dem Gerät, und *tragen*

sie durch ihre Mobilität mit sich, bis eine neue Möglichkeit zur *Weiterleitung* entsteht. Auf dieser Weise wird ein asynchroner Kommunikations-service gewährleistet, trotz des Fehlens eines durchgehenden Übertragungspfads. Obwohl der Service möglicherweise mit spürbaren Verzögerungen verbunden ist, ist dies für viele Applikationen oft akzeptabel oder mindestens ein akzeptabler Kompromiss.

Angesichts dieser Funktionsprinzipien muss damit gerechnet werden, dass der Graph, welcher die Konnektivität eines DTNs darstellt, hochdynamisch und nur teilweise (wenn überhaupt) zusammenhängend ist. Da jegliche Übertragung von Daten und anderen Informationen ausschliesslich während Kontakten erfolgen kann, ist das Verständnis der Dynamik dieses Graphen, und der dem Graphen zugrundeliegenden Struktur der Kontakte zwischen Knoten, für die Erbringung eines effizienten DTN Kommunikationsservices entscheidend. Ursprünglich wurde aus praktischen Gründen die Annahme getroffen, dass alle Knoten sich gleichmässig treffen (d.h. mit gleicher durchschnittlicher Häufigkeit). Allerdings haben seither zahlreiche Experimente gezeigt, dass Heterogenität ein bestimmendes Merkmal der Struktur der Kontakten zwischen Knoten ist, und dass diese nicht wegabstrahiert werden sollte. Die Protokollgestaltung hat diesen Befund umgehend in neue, fortgeschrittene DTN Lösungen eingebaut, welche das Ausnutzen der Heterogenität anstreben. Dagegen ist die Evaluation solcher neuer Protokolle aufgrund der Komplexität der Mobilitätsstruktur, und oft auch der Algorithmen selbst, rein simulationsbasiert geblieben. Es ist deshalb das Hauptziel dieser Dissertation die Analyse und die Modellierung von DTNs zu verbessern, indem die Heterogenität der Struktur der Knotenbegegnungen mit einbezogen wird.

Erstens greifen wir auf die Analyse epidemischer Ausbreitung zurück, ein Prozess von zentraler Bedeutung für DTN Algorithmen, mit welchem eine Nachricht repliziert und, ähnlich wie bei ansteckenden Krankheiten, von Knoten zu Knoten übertragen wird, bis das Netzwerk geflutet ist. Wir stellen einen neuen Zusammenhang zwischen der Verzögerung der epidemischen Ausbreitung und einer grundlegenden Eigenschaft, *dem Leitwert* eines angemessenen Graphen, der die Mobilitätsprozesse der Knoten erfasst, her. Der Leitwert ist repräsentativ für makroskopische Mobilitätsstrukturen wie dem Gemeinschaftsverhalten, was ihn direkt interpretierbar macht. Dieses Ergebnis erlaubt uns Leistungsschranken für auf epidemischer Ausbreitung basierende DTN Protokolle zu berechnen, und zu zeigen, dass die Verzögerung solcher Protokolle logarithmische Skalierungseigenschaften (mit der Netzwerkgrösse) hat, da der Leitwert von DTN Graphen bei zunehmender Grös-

se des Netzes unverändert bleibt. Obwohl wir hier unseren Fokus durch die Annahme eines einfachen, wahllosen Übermittlungsprotokolles auf das Verständnis der Mobilitätsprozesse selbst richten, zeigen wir im Folgenden, dass unsere Methodik erweitert werden kann, um auch komplexere Übermittlungsprotokolle, oder sogar Algorithmen für andere Problemen als Routing (z.B. Gruppenkommunikation, verteiltes Caching etc) zu umfassen.

In einem *zweiten* Beitrag schlagen wir DTN-Meteo vor, ein zweistufiges Modellierungssystem zur Analyse und Vorhersage der Leistung der neuen, fortgeschritteneren Protokolle, welche aktiv die Heterogenität der Knotenmobilität ausnutzen. Durch die Entkopplung der Knotenmobilität von algorithmischen Massnahmen, ist DTN-Meteo, im Gegensatz zu jeglichen vorherigen analytischen Arbeiten über DTNs, generisch und auf eine Vielfalt von Problemen anwendbar, von Routing bis zur Platzierung von Inhalten. Nebst der naheliegenden Verwendung für quantitative Leistungsbewertung, bietet DTN-Meteo auch unschätzbare Einblicke in das Innenleben eines Protokolls, welche Simulationen alleine nicht liefern können: es kann die Korrektheit eines Algorithmus bewerten und diese in Zusammenhang mit Eigenschaften der Knotenmobilität bringen, es kann verwendet werden, um zentrale Parameter eines Protokolls anzupassen, und sogar um Simulationen abzustimmen.

Unser *dritter* Beitrag basiert auf einer mit DTN-Meteo gemachten Beobachtung: Greedy-Algorithmen (wie dies die meisten DTN Lösungen sind) sind in vielen realen Mobilitätsszenarien nicht *korrekt*. Das bedeutet, am Beispiel von Routing, dass sogar unter idealen Bedingungen (d.h. unbegrenzter Zwischenspeicher und Bandbreite) das Protokoll nicht garantiert funktioniert (d.h. einen bestehenden Pfad findet). Dies liegt meist an Nachrichten, die sich in Relaisknoten festgefahren haben, welche lokale Maxima der für Routing eingesetzer Nutzenfunktion (z.B. Zentralität eines Knotens) darstellen. Basierend auf der Markov chain Monte Carlo (MCMC) Theorie schlagen wir eine einfache Umgestaltung solcher Algorithmen vor, die diese, durch die Anwendung von bewusster Randomisierung, korrekt macht. Im Gegensatz zu Greedy-Algorithmen, welche Schritte zu einem geringerem Nutzen deterministisch ablehnen, akzeptieren MCMC Lösungen probabilistisch auch Schritte hin zu geringerem Nutzen, und vermeiden somit eine Blockierung in lokalen Maxima. Durch Analyse und Simulationen zeigen wir, dass unser Vorschlag das Korrektheits-Problem effektiv löst.

Zusammengenommen führen diese Beiträge viel realistischere Modelle und Analysen verschiedener DTN Protokolle ein und ermöglichen ein fundierteres und systematischeres Design neuer Algorithmen.

Table of Contents

Acknowledgments **v**

Abstract **vii**

Kurzfassung **xi**

Table of Contents **xv**

List of Figures **xix**

List of Tables **xxi**

1 Introduction **1**

1.1 Use Cases for Delay Tolerant Networking 4

1.1.1 Cellular-assisted Peer-to-peer Communication 5

1.1.2 Ad hoc Peer-to-peer Communication 6

1.1.3 Vehicular Communication 6

1.1.4 Deep Space Communication 7

1.2 Research in Delay Tolerant Networking 8

1.2.1 Applications, Prototypes, and Case Studies 9

1.2.2 Understanding and Modelling Contacts/Mobility . . . 10

1.2.3 Algorithm Design and Analysis 15

1.3 A Contact Model for Analyses under Heterogeneous Mobility 21

1.3.1 The Bare Bones of Heterogeneous Contact Models . . 21

1.3.2 The Meat of Heterogeneous Contact Models 23

1.3.3 The Challenge of Heterogeneous Contact Models . . . 25

1.4 Contributions and Outline 26
1.4.1 Epidemic Spreading and Conductance 27
1.4.2 DTN-Meteo Performance Forecasting 27
1.4.3 Distributed Stochastic Optimization 28
Bibliography 28

2 An Analysis of the Information Spreading Delay in Heterogeneous Mobility DTNs 37
Abstract 38
2.1 Introduction 38
2.2 Related Work and Challenges 40
2.3 Problem Statement and Model 42
2.3.1 Network and Time Model 43
2.3.2 Information Spreading Delay 44
2.4 Theoretical Delay Analysis 45
2.4.1 A Markovian Model for Information Spreading 45
2.4.2 Expected Delay Analysis through Absorption 47
2.4.3 Bounding the Delay's Distribution 50
2.5 Empirical Analysis 52
2.5.1 The Accuracy of the Bounds 52
2.5.2 The Scaling Behavior of the Conductance 56
2.6 Applications 58
2.7 Conclusion and Future Work 60
Bibliography 60

3 DTN-Meteo: Forecasting the Performance of DTN Protocols under Heterogeneous Mobility 65
Abstract 66
3.1 Introduction 66
3.2 Preliminaries 69
3.3 DTN-Meteo: A Generic Model for DTN Problems 71
3.3.1 Solution Space 72
3.3.2 Exploring the Solution Space 74
3.3.3 Modeling a Local Optimization Algorithm 75
3.3.4 Modeling Heterogeneous Node Mixing/Mobility . . . 77
3.3.5 A Markov Chain Model for Distributed Optimization . 82

3.3.6 DTN-Meteo's Realism-Tractability Trade Off 82
3.4 Analyzing DTN Optimization Algorithms 86
3.4.1 DTN-Meteo for Greedy Algorithms 86
3.4.2 DTN-Meteo for Randomized Local Search 90
3.5 Applications to Communication Algorithms 94
3.5.1 Utilities for Routing and Content Placement 95
3.5.2 Traces and Mobility Models 97
3.5.3 Measuring the Accuracy of DTN-Meteo 99
3.5.4 What Influences the Accuracy of DTN-Meteo? 101
3.5.5 The Practical Value of DTN-Meteo 105
3.6 Related Work 106
3.7 Conclusion and Future Work 107
Bibliography 108

4 Distributed Stochastic Optimization in Opportunistic Networks: The Case of Optimal Relay Selection 115
Abstract 116
4.1 Introduction 116
4.2 Related Work 118
4.3 Problem and Network Model 119
4.3.1 Network Model 120
4.3.2 Optimal Relay Selection 121
4.3.3 Utility Functions 123
4.4 Distributed Optimization Algorithms 123
4.4.1 The Greedy Algorithm 124
4.4.2 Markov Chain Monte Carlo Methods 128
4.5 Performance Evaluation 132
4.5.1 Contact Generators 132
4.5.2 Simulation Results 133
4.6 Conclusion 136
Bibliography 136

5 Conclusions 141
5.1 Remaining Issues and Future Work 146
Bibliography 149

A Additional Publications **153**

B Full List of Publications **157**

Curriculum Vitae **161**

List of Figures

1.1 Contact model for a toy network with $N = 4$ nodes and $E = 4$ out of 6 node pairs contacting each other. 22
1.2 Markov chain from [42] 26

2.1 Markov chain from [4] 41
2.2 The $(2^N - 1) \times (2^N - 1)$ transition matrix **P** for the SSS task . . 46
2.3 The bounding pure-birth Markov chain 50
2.4 Prediction accuracy and concentration for the delay of the SSS task 54
2.5 Evolution of the graph conductance Φ with network size . . . 57

3.1 Markov chain from [6] 70
3.2 Example state transitions in two 6-node DTNs. 75
3.3 Contact model for a toy network with $N = 4$ nodes and $E = 4$ out of 6 node pairs contacting each other. 79
3.4 Summary of the necessary steps when building a DTN-Meteo model. 83
3.5 Results of the χ^2 goodness-of-fit test for exponentiality 98
3.6 Predictions and measurements for **purely greedy** content placement and routing 100
3.7 Predictions and meas. for **randomized** content placement and routing 101
3.8 Effect of (non-)exponentiality on relative errors of predicted delays 104

4.1 Worst case scenario 128
4.2 Average convergence over the duration of a TTL in the TVC Model 133
4.3 Convergence average and distribution for the MIT trace using U_2 135
4.4 Comparison between coverages achieved by the MCMC algorithm with utilities U_1 and U_2 136

5.1 Comparison of epidemic delay bounds 143
5.2 Predicted and measured delays for greedy content placement and SimBet routing 144

List of Tables

1.1 Delay-Throughput Tradeoffs for the i.i.d. mobility model . . . 16

2.1 Mobility traces characteristics. 53

3.1 Important notation in Section 3.3. 71
3.2 Modeling replication with Eq. (3.3) 73
3.3 Important notation in Section 3.4. 87
3.4 Mobility traces characteristics. 97
3.5 Absorption probabilities 99
3.6 Minimum L to achieve expected delay in ETH with SimBet . . 105

4.1 Final convergence (% of N) in function of the number of carriers 134

5.1 Probabilities of convergence to optimum for greedy content placement 145