

---

# **Enabling disruption tolerant services**

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und  
Naturwissenschaften der RWTH Aachen University zur Erlangung des  
akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften  
genehmigte Dissertation  
vorgelegt von  
Dipl. inf. (Bioinformatik)  
**Jó Ágila Bitsch**

aus Lagos, Portugal

Berichter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Wehrle  
Prof. Dr.-Ing. Lars Wolf

Tag der Mündlichen Prüfung: 19.01.2017



# **Reports on Communications and Distributed Systems**

edited by  
Prof. Dr.-Ing. Klaus Wehrle  
Communication and Distributed Systems,  
RWTH Aachen University

Volume 14

**Jó Ágila Bitsch**

**Enabling disruption tolerant services**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Copyright Shaker Verlag 2017

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 978-3-8440-5164-3

ISSN 2191-0863

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) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Abstract

---

Disruption tolerant networking allows us to provide communication and information services in low connectivity and challenged network scenarios. These range from previously underserved rural areas to highly energy constrained special purpose sensor networks. Compared to wired-to-the-last-hop, infrastructure-based networks, infrastructure-less networks face a number of additional challenges, the fundamental one being varying connectivity over time. Building successful services for disruption tolerant networking requires three different key steps: (1) identification and characterization of possible applications and services, (2) optimization of neighbor discovery, and (3) efficient routing of data bundles.

We developed an initial model for users and services in the context of disruption tolerant networks that combines the service communication structure, with user experience and user expectations to predict a user's Quality of Experience. For this, we identify key characteristics of services and networks that make them suitable for challenged scenarios. These characteristics include: (1) Data Prefetching and Bundling, (2) Bursty Communication Style, (3) Soft Time Constraints, (4) Lenient Delivery Order Constraints, (5) One-Way Communication, and (6) Hop-to-Hop Usability. We propose initial quantitative metrics that may capture the user perceived quality. These metrics are: (1) Speed of Interaction, (2) Comfort and Frustration Level, (3) Delivery Effectiveness, and (4) Intercontact Times / Idle Period.

Overall, we argue that there is no particular *killer app* for DTNs, but rather, we show how considering these challenges to network communication in the design of an application can lead to a universally better experience for all users. In this context, we develop a set of sample applications particularly well-suited for challenging network environments, which are a collaborative event scheduling and a Wikipedia access application. We further explored map dissemination for indoor navigation and mobile sensor networks for wildlife monitoring.

We propose a new scheme for wireless neighbor discovery between unsynchronized nodes based on perfect difference sets. The construction is a mathematically provable optimal trade-off between the discovery delay and power consumption for discovering the presence of a potential communication partner in range. The application of Perfect Difference Sets (PDS) allows the provable optimal trade-off. Using PDS with a duty cycle of 2 % only has a discovery latency of about 4 min whereas U-Connect, the best related work, has a latency of 9 min, assuming a slot length of 100 ms. We further investigate discovery between devices with differing energy budgets. Through an exhaustive search of all possible combinations of schedule lengths and phase shifts, we show that PDS also performs fair in practice, that is with a duty cycle of greater or equal to 1 %.

To enable efficient routing of messages, we model human mobility in a novel way using only local information. We propose two routing protocols: SimBetAge which bases on the frequency that particular people met in the past, and GeoDTN, which works on the frequency at which certain locations were visited in the past. Instead of modeling the social interactions in a binary graph, in SimBetAge, we capture the temporal change of a social network in a weighted graph. Edges in the graph degrade over time, if not refreshed. In turn, we extend the definition of similarity and

betweenness to capture real-valued edge weights and further propose the directed ego flow betweenness as a novel metric to capture the usefulness of a node as a carrier for data bundles. We evaluated this approach against a number of existing routing schemes, in particular: Direct Delivery, Epidemic Routing, Prophet and the original SimBet. Using the MIT Reality Mining trace, the Haggle imote trace, and the Dartmouth Outdoor Experiment traces, we show that routing performance can be drastically improved when temporal changes are considered.

In GeoDTN, we modeled human mobility as a time dependent probability distribution around known anchor points. Based on this model, we developed a heuristic to predict future connectivity. To be able to evaluate this approach in the absence of widely deployed disruption tolerant consumer applications, we presented traces of self reported global mobility from an online social network website for 221 active users. The evaluation shows that geoDTN works similarly well as algorithms based on social group characteristics such as SimBetAge and outperforms binary movement algorithms as Move. In less periodic networks, geoDTN significantly outperformed the other algorithms in hop count and delivery time. It performs in general 130%, in individual cases even 200%, better in hop count. In terms of delivery time, it outperforms the related work on average by a factor of 3, PRoPHET by factor 6.

In combinations, these algorithms and methods can contribute to an overall disruption tolerant networking architecture, enabling improved services for all users, but in particular extending data network availability further into areas previously devoid of the otherwise necessary communication infrastructure.

## Kurzfassung

---

Unterbrechungstolerante Kommunikation (Delay Tolerant Networking, DTN) erlaubt die Datenübertragung in Netzwerken mit geringer Konnektivität. Hierzu gehören beispielsweise bisher diesbezüglich unversorgte ländliche Gebiete als auch sehr energiebeschränkte Sensornetze. Im Gegensatz zu vollständig verkabelten, infrastruktur-basierten Netzwerken bringen solche infrastrukturosen Sensornetze eine Reihe von zusätzlichen Problemen mit sich, wobei die sich über die Zeit ändernde Konnektivität die größte Herausforderung darstellt. Für die Entwicklung von unterbrechungstoleranten Netzen und diese Netze nutzende Dienste bedarf es also dreier grundlegender Schritte: (1) die Identifikation sinnvoller Anwendungen und Dienste sowie deren Beschreibung, (2) die effiziente Erkennung von potentiellen Kommunikationspartnern in Funkreichweite und (3) die effiziente Vermittlung von Nachrichten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein initiales Nutzer- und Dienstmodell zur Verwendung in unterbrechungstoleranten Netzen entwickelt. Dieses Modell kombiniert Aspekte der Kommunikationsstruktur eines Dienstes mit dem Nutzerkontext, der aus bisherigen Erfahrungen und Erwartungen des Nutzers an einen Dienst aus besteht. Basierend darauf kann letztlich dessen Zufriedenheit, die „Quality of Experience“, vorausgesagt werden. Hierfür wurden die Kerncharakteristika identifiziert, welche Dienste und Netzen für diese Art von Kommunikation besonders geeignet machen. Die sind (1) „Data Prefetching“ und „Bundling“, (2) stoßweise, diskontinuierliche Kommunikation, (3) weiche Zeitschranken, (4) weiche Schranken zur Auslieferungsreihefolge, (5) Einwegkommunikation und (6) Nützlichkeit von Daten auf jedem Hop. Ergänzend schlagen wir folgende initialen quantitativen Metriken zur Bewertung der Nutzerzufriedenheit vor: (1) die Interaktionsgeschwindigkeit, (2) Komfort- und Frustrationslevel, (3) die Effektivität einer eingegangenen Nachricht im Auslösen von Nutzerreaktionen, sowie (4) die Dauer zwischen technischen Kommunikationsgelegenheiten.

Insgesamt gibt es keine spezielle Killeranwendung für DTNs. Eine bessere Berücksichtigung der begrenzten Netzwerkressourcen kann aber universell zu einer besseren Nutzererfahrung führen. In diesem Kontext wurden eine Reihe von Beispieldienstungen entwickelt, die besonders für DTNs geeignet sind. Hierzu gehören eine kollaborative Terminfindung, der Zugriff auf Wikipedia, die Verteilung von Kartenmaterial zur Gebäudenavigation sowie mobile Sensornetze zur Tierbeobachtung.

Weiterhin wurde ein neues Schema (PDS) zur drahtlosen Erkennung zeitlich nicht synchronisierter Netzknöten in Funkreichweite vorgeschlagen, das auf Differenzenmengen basiert. Mathematisch beweisbar erzeugt diese Konstruktion den optimalen Kompromiss zwischen Erkennungslatenz und Energieverbrauch. PDS erreicht bei einer angenommenen Funkbakenrate von 10 Hz und einem Tastgrad von 2% eine maximale Latenz von 4 min, während U-Connect, die bisher beste verwandte Lösung, unter gleichen Bedingungen auf eine maximale Latenz von 9 min kommt. Weiterhin wurde die Erkennungsrate von Netzknöten mit unterschiedlichen Energiebudgets untersucht. Durch eine vollständige Suche aller Kombinationen von Zykluslängen und Phasenverschiebungen konnte gezeigt werden, dass PDS sich in der Praxis bei allen Tastgraden größer 1% fair verhält.

Zur effizienten Weiterleitung von Nachrichten wurden menschliche Bewegungsmuster auf eine neue Art modelliert, welche nur lokale Daten in einem Netzknoten benötigt. Hierbei werden zwei neue Routingprotokolle vorgeschlagen: SimBetAge basiert auf der bisherigen Häufigkeit des Treffens von Personenpaaren während GeoDTN auf den bisherigen geographischen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Personen basiert. So wird in SimBetAge eine soziale Beziehung nicht als binärer, sondern als gewichteter Graph modelliert, was es erlaubt, zeitliche Veränderungen zu erfassen. Entsprechend werden die Definitionen von Ähnlichkeit und Intermediationszentralität auf reellwertig-gewichtete Graphen erweitert. Außerdem wird eine Metrik der gerichteten Egozentralität vorgeschlagen, welche die Eignung eines Netzknottens zur Weiterleitung von Nachrichten abbildet. Der Ansatz wurde mit einer Reihe von Routingsalgorithmen verglichen, insbesondere mit „Direct Delivery“, epidemisches Fluten, PRoPHET und dem originalen SimBet. Unter Verwendung der Datensätze „Reality Mining“, „Haggle iMote“ und „Dartmouth Outdoor Experiment“ wurde gezeigt, dass die Berücksichtigung der zeitlichen Veränderlichkeit von sozialen Beziehungen die Performanz drastisch verbessern kann.

In GeoDTN wird menschliche Mobilität als eine zeitabhängige Aufenthaltswahrscheinlichkeit um Ankerpunkte modelliert. Dies erlaubt die Entwicklung einer Heuristik zur Vorhersage der zukünftigen Konnektivität. Da bisher noch keine weitverbreiteten DTN Anwendungen existieren, wurde als Datenbasis zur Bewertung des Ansatzes die selbstdeklarierte Mobilität von 221 sehr aktiven Nutzern aus einem sozialen Online-Netzwerk verwendet. Die Evaluation zeigt, dass geoDTN eine ähnliche Performanz aufweist wie Algorithmen auf der Basis sozialer Charakteristika, wie etwa SimBet-Age, und Algorithmen wie Move deutlich übertrifft. In Netzwerken mit weniger periodischer Mobilität übertrifft geoDTN andere Algorithmen in seiner Performanz deutlich in Bezug auf Hop-Anzahl; im Durchschnitt um 130% und in Einzelfällen um bis zu 200%. Beziiglich der Zustellungsgeschwindigkeit ist geoDTN im Schnitt um einen Faktor 3, gegenüber PRoPHET sogar um den Faktor 6, performanter.

In Kombination tragen diese Algorithmen und Methoden zu einer übergeordneten DTN Architektur dabei, erlauben verbesserte Dienste für Nutzer und verbessern den Zugang zu Datennetzen insbesondere in Gebiete, in denen die sonst nötige Kommunikationsinfrastruktur fehlt.

# Acknowledgments

For Roann.

For Migi.

For Jami.

For Angel Bear.

For Mama.

For Oma.

For Maomé.

For my family.

For my students.

For my colleagues.

For my friends.

Finally!

Thank you!



# Contents

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Problem Statement . . . . .	2
1.2	Identification and Characterization of Services . . . . .	2
1.2.1	Observation: There is no singular Killer App for DTNs . . . . .	3
1.2.2	Contribution: User and Service Models for DTNs . . . . .	3
1.3	Neighbor Discovery with Minimal Latency . . . . .	4
1.3.1	Observation: Cyclic Block Designs Fit Requirements . . . . .	4
1.3.2	Contribution: Perfect Difference Sets for Discovery . . . . .	4
1.4	Routing with minimal delay and overhead . . . . .	5
1.4.1	Observation: People Meet People They Met Before . . . . .	6
1.4.2	Contribution: Human Mobility Based Forwarding . . . . .	6
1.4.2.1	Social Network Based Forwarding . . . . .	6
1.4.2.2	Geography Based Forwarding . . . . .	6
1.5	Structure . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Background</b>	<b>9</b>
2.1	Challenges to Setting Up Mobile Networks . . . . .	9
2.2	Challenged Networks as a Solution Approach . . . . .	10
2.3	Delay and Disruption Tolerant Networks . . . . .	11
2.3.1	DTN Use Cases . . . . .	12
2.3.1.1	Space Systems Communications . . . . .	12
2.3.1.2	Unmanned Air Systems in Integrated Air Space . . . . .	13
2.3.1.3	Unmanned Underwater Vehicles (UUV) . . . . .	14
2.3.1.4	Civil Aviation . . . . .	14
2.3.1.5	Vehicular Delay Tolerant Networks . . . . .	14
2.3.1.6	Disaster Response and Humanitarian Aid . . . . .	15

2.3.2	Contact opportunity . . . . .	15
2.3.2.1	Successful neighbor discovery . . . . .	16
2.3.2.2	Data freshness . . . . .	16
2.3.2.3	Exchange of routing information . . . . .	17
2.3.2.4	Message carrier selection and prioritization . . . . .	17
2.3.2.5	Message transfer . . . . .	18
2.3.3	Routing Metrics . . . . .	18
2.4	Connectivity Traces . . . . .	19
2.4.1	MIT Reality Mining . . . . .	20
2.4.2	Human interaction in the Haggle Project . . . . .	20
2.4.3	Dartmouth Outdoor Experiment . . . . .	21
2.4.4	UMass DieselNet . . . . .	21
2.4.5	Self-reported global mobility in Brightkite . . . . .	22
2.4.6	N4C trials mobility data . . . . .	23
2.4.7	Underground radio propagation in RatPack . . . . .	23
2.5	Acknowledgments . . . . .	24
<b>3</b>	<b>Predicting Experience in Disruption Tolerant Networks</b>	<b>27</b>
3.1	Our Contributions to QoE Prediction in DTNs . . . . .	28
3.2	Service Differentiation . . . . .	28
3.2.1	Browsing and Web Surfing on Wikipedia.org . . . . .	28
3.2.1.1	Data Prefetching and Bundling . . . . .	29
3.2.1.2	Bursty Communication Style . . . . .	29
3.2.2	Collaborative Event Scheduling . . . . .	30
3.2.2.1	Soft Time Constraints . . . . .	30
3.2.2.2	Lenient Delivery Order Constraints . . . . .	30
3.2.3	Web Syndication of Blogs and Media Files . . . . .	31
3.2.3.1	One-Way Communication . . . . .	32
3.2.3.2	Hop-to-Hop Usability . . . . .	32
3.2.4	DTN Antipatterns for a Service . . . . .	33
3.2.4.1	High Interactivity Pace/Chattiness . . . . .	33
3.2.4.2	High Demands on Delivery Rate . . . . .	34
3.3	Network Differentiation . . . . .	34

3.3.1	Bursty Networks . . . . .	35
3.3.2	User-Controlled Connectivity Networks . . . . .	36
3.3.3	High Delay Networks . . . . .	37
3.4	User Characteristics . . . . .	38
3.4.1	Laymen . . . . .	38
3.4.2	Moderately Informed Users . . . . .	39
3.4.3	Expert Users . . . . .	39
3.5	Situational Influences . . . . .	40
3.6	QoE Metrics . . . . .	40
3.6.1	Speed of Interaction . . . . .	41
3.6.2	Comfort and Frustration Level . . . . .	41
3.6.3	Delivery Effectiveness . . . . .	41
3.6.4	Intercontact Times / Idle Period . . . . .	41
3.7	Evaluation of DTN Services . . . . .	42
3.7.1	Unspecified More General Scenarios . . . . .	42
3.7.2	Specific Scenarios . . . . .	43
3.7.3	Prediction Analysis . . . . .	43
3.8	Related Work . . . . .	43
3.9	Conclusion . . . . .	44
3.10	Acknowledgements . . . . .	44
<b>4</b>	<b>Neighbor Discovery</b> . . . . .	<b>45</b>
4.1	Contributions . . . . .	46
4.2	Existing Neighbor discovery schemes . . . . .	46
4.3	Symmetric Neighbor Discovery . . . . .	47
4.3.1	Theoretic Formulation . . . . .	48
4.3.2	Perfect Difference Sets . . . . .	49
4.4	Asymmetric Neighbor Discovery . . . . .	51
4.4.1	Fairness in Neighbor Discovery . . . . .	51
4.4.2	Fairness of Grid-based Neighbor Discovery . . . . .	52
4.4.3	Fairness of Perfect Difference Sets-based Discovery . . . . .	52
4.5	Implementation of Neighbor Discovery Schemes . . . . .	53
4.5.1	Simulations . . . . .	53

4.5.2	TinyOS . . . . .	53
4.5.3	Wi-Fi . . . . .	54
4.6	Experimental Results . . . . .	54
4.6.1	Motelab . . . . .	55
4.6.2	WiFi Tests . . . . .	56
4.6.3	Asymmetric Discovery of Perfect Difference Sets . . . . .	56
4.7	Conclusions . . . . .	58
4.8	Acknowledgments . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Social Network Based Forwarding</b>	<b>61</b>
5.1	Background and Related Work . . . . .	61
5.1.1	Background on SimBet Routing . . . . .	62
5.1.2	Shortcomings on SimBet . . . . .	63
5.2	SimBetAge . . . . .	64
5.2.1	Modelling the dynamics in relations . . . . .	65
5.2.2	Similarity for Aged Graphs . . . . .	66
5.2.3	Betweenness for Aged Graphs . . . . .	66
5.2.4	Flow Betweenness . . . . .	66
5.2.5	Directed Betweenness . . . . .	67
5.2.6	Defining an Utility . . . . .	68
5.2.7	Update Messages . . . . .	68
5.3	Evaluation . . . . .	69
5.3.1	Metrics . . . . .	69
5.3.2	Traces . . . . .	69
5.3.3	Results . . . . .	70
5.4	Conclusions and Outlook . . . . .	71
5.5	Acknowledgments . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Geography Based Forwarding</b>	<b>75</b>
6.1	Related Work . . . . .	76
6.2	Design of GeoDTN . . . . .	77
6.2.1	Mobility Representation . . . . .	77
6.2.2	Neighbor Score . . . . .	78

6.2.3	Routing . . . . .	78
6.2.3.1	Distance mode . . . . .	79
6.2.3.2	Rescue mode . . . . .	79
6.2.3.3	Scoring mode . . . . .	80
6.3	Evaluation . . . . .	80
6.3.1	Traffic Model . . . . .	81
6.3.2	Simulation and Metrics . . . . .	81
6.3.3	Performance in DieselNet . . . . .	82
6.3.4	Performance in BrightKite . . . . .	83
6.3.5	Overall Energy Consumption . . . . .	85
6.3.6	Fairness . . . . .	85
6.4	Conclusion . . . . .	85
6.5	Acknowledgments . . . . .	86
<b>7</b>	<b>DTN Applications</b>	<b>87</b>
7.1	Previous File Sharing Approaches . . . . .	87
7.2	DTN Service Architecture . . . . .	88
7.2.1	Design of a DTN API . . . . .	89
7.2.2	Doodle . . . . .	90
7.2.3	Wikipedia . . . . .	91
7.3	FootPath . . . . .	92
7.3.1	System Design . . . . .	93
7.3.1.1	Generating Maps . . . . .	94
7.3.1.2	Step Detection . . . . .	94
7.3.1.3	Path Matching . . . . .	94
7.3.2	Map Dissemination . . . . .	95
7.4	RatPack Project . . . . .	95
7.4.1	Related Work . . . . .	96
7.4.2	Requirements and Environmental Constraints . . . . .	97
7.4.3	Routing . . . . .	97
7.4.3.1	Utility Based Forwarding to Base Station . . . . .	97
7.4.3.2	Social Network Based Forwarding . . . . .	98
7.4.3.3	Data Reduction . . . . .	98

7.4.4	Laboratory Prototype . . . . .	98
7.4.4.1	Updated hardware . . . . .	99
7.4.5	RatPack Results . . . . .	100
7.4.6	Lessons learned . . . . .	101
7.5	Acknowledgments . . . . .	102
<b>8</b>	<b>Conclusions and Outlook</b>	<b>103</b>
8.1	Summary . . . . .	103
8.1.1	Identification and Characterization of Services . . . . .	104
8.1.2	Neighbor Discovery . . . . .	104
8.1.3	Routing . . . . .	105
8.1.3.1	Social Network Based Forwarding . . . . .	105
8.1.3.2	Geography Based Forwarding . . . . .	105
8.2	Lessons Learnt . . . . .	106
8.2.1	There is no singular Killer App for DTNs . . . . .	106
8.2.2	Cyclic Block Designs are Useful for Neighbor Discovery . . . . .	107
8.2.3	People Meet People They Met Before . . . . .	107
8.3	Future Work . . . . .	107
8.3.1	Quality of Experience . . . . .	107
8.3.1.1	Larger QoE User Studies . . . . .	108
8.3.1.2	Better QoE Metrics and Thresholds . . . . .	108
8.3.2	Neighbor Discovery . . . . .	108
8.3.2.1	Synchronous neighbor discovery . . . . .	108
8.3.2.2	Discovery on Multiple Frequencies . . . . .	109
8.3.2.3	Discovery using Multiple Radios . . . . .	109
8.3.2.4	Application Programming Interfaces for Neighbor Discovery . . . . .	109
8.3.3	DTN Routing . . . . .	109
8.3.3.1	Privacy in DTN Routing . . . . .	110
8.3.3.2	Reputation and Micropayments for DTN Services . . . . .	110
8.3.3.3	Name Resolution in DTNs . . . . .	110
8.3.4	DTN Aware Applications and Services . . . . .	110
8.3.4.1	Context Awareness in Services . . . . .	111
8.3.4.2	Context Prediction for DTN Aware Services . . . . .	111
8.3.4.3	Disruption Tolerant Security . . . . .	111

<b>Bibliography</b>	<b>113</b>
Coauthored publications . . . . .	113
Coadvised Theses . . . . .	117
General Bibliography . . . . .	119
Online Resources . . . . .	126