

Lehrstuhl für Kommunikationsnetze  
Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

# **Context-Aware Power Consumption Modeling for Energy Efficient Mobile Communication Services**

**Genehmigte Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Dortmund**

**von  
Dipl.-Ing. Björn Dusza**

Hauptreferent : Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld  
Korreferent : Prof. Dr. Peter Marwedel  
Dissertation eingereicht am : 2. Dezember 2013  
Tag der mündlichen Prüfung : 28. Februar 2014



Dortmunder Beiträge zu Kommunikationsnetzen und -systemen

Band 8

**Björn Dusza**

**Context-Aware Power Consumption Modeling for  
Energy Efficient Mobile Communication Services**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

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.: Dortmund, Technische Univ., 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 978-3-8440-2683-2

ISSN 1867-4879

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)

# Kurzfassung

Die Verbesserung der Energieeffizienz von Mobilfunkendgeräten rückt zunehmend in den Fokus der Mobilfunknetzbetreiber. Dies ist bedingt durch die Tatsache, dass der Faktor Batterielaufzeit in zunehmendem Ausmaß die Zufriedenheit der Kunden mit ihrem Smartphone beeinflusst. Für die Forschung und Entwicklung bedeutet dies, dass der durchschnittlichen Leistungsaufnahme eines Endgerätes sowie der damit verbundenen Batterielaufzeit besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden muss. Bevor neue, energieeffiziente Verfahren und Protokolle jedoch zuverlässig bezüglich ihres Verbesserungspotentials bewertet werden können, sind detaillierte Energiemodelle notwendig, die alle relevanten Parameter berücksichtigen. Neben kontrollierbaren Systemparametern beinhaltet dies auch sogenannte Kontext-Parameter wie beispielsweise das Mobilitätsverhalten des Nutzers oder die Funkkanalbedingungen.

Basierend auf umfangreichen Messkampagnen mit aktuellen LTE Endgeräten wird in dieser Arbeit ein neues, auf Markov-Ketten basierendes, Energiemodell vorgestellt, welches neben Systemparametern (wie z.B. der Anzahl der zugewiesenen Resource Blocks) auch den Kontext des Nutzers in Form von Kanalbedingungen und Applikationseigenschaften berücksichtigt. Ein wesentlicher Fortschritt im Vergleich zu existierenden Modellen ist hierbei die stochastische Natur des neuen Ansatzes die es ermöglicht, durchschnittliche Leistungsaufnahmen basierend auf Nutzungsprofilen zu bestimmen. Zur Validierung des Modells werden umfangreiche System Simulationen basierend auf Ray-Tracing Verfahren sowie Messungen der tatsächlichen Batterielaufzeit im Labor verwendet.

Beispielhafte, auf dem neuen Modell basierende Studien zeigen, dass die zu erwartende Batterielaufzeit stark von der aktuellen Systemparametrisierung sowie dem Nutzerkontext abhängt. Zudem kann gezeigt werden, dass basierend auf dem neuen kontextsensitiven Energiemodell (CoPoMo), quantitative Analysen des Zusammenhanges zwischen Ressourcenzuweisung durch das Netz und Batterielaufzeit ermöglicht werden.

Eine abschließend durchgeführte Erweiterung des Modells zur Untersuchung von LTE-Advanced Systemen zeigt, dass die CoPoMo zugrundeliegenden Ansätze mit nur geringen Modifikationen auch für zukünftige Mobilfunkgenerationen anwendbar sind. Der Einfluss von neuen oder modifizierten Protokollen und Systemeigenschaften auf die zu erwartende Batterielaufzeit kann somit bereits frühestmöglich qualitativ und quantitativ bewertet werden.

Die Arbeit wurde unterstützt durch die Deutsche Forschungsgesellschaft (DFG) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 876 - "Verfügbarkeit von Information durch Analyse unter Ressourcenbeschränkung".



# Abstract

Increasing the battery lifetime of power-hungry mobile devices has become a major research target for mobile operators. This is motivated by the fact that energy efficiency is progressively considered as important factor influencing the user satisfaction with portable communication equipment. Before novel, power efficient protocols and algorithms can be quantitatively evaluated in terms of their battery lifetime gain, it is however mandatory to have a significant power consumption model available that incorporates all the specific characteristics of a cellular communication system such as user mobility and time variant radio channel conditions.

Based on extensive measurement campaigns with the most recent Long Term Evolution (LTE) devices, in this thesis a new Markovian power consumption model is introduced, which takes into account the chosen system parameters (such as the number of physical resource blocks) as well as the context of a user in terms of radio channel conditions and service characteristics (non-real-time vs. real-time). One key advancement of this generic model is its stochastic nature, which allows for determining the average power consumption of a device based on usage profiles including location information and service statistics.

To validate the new model, comprehensive system simulations using realistic channel characteristics derived from ray tracing analyses are conducted. Beyond this, the validity of the model is proven by sophisticated battery lifetime measurements in the laboratory.

Exemplary case studies show that the expected battery lifetime is to a large extent depending on the actual system parameterization as well as the user context. Therefore, it is shown that the proposed context-aware power consumption model (CoPoMo) enables quantitative analyses of the trade-off between network resource allocation and enhanced battery lifetime.

Finally, the performed extension of the model towards LTE-Advanced illustrates that the fundamental ideas of CoPoMo can be applied to next generation wireless networks with only minor adaptations. The qualitative as well as quantitative impact of new or modified protocols and system properties can therefore be evaluated at the earliest possible time.

The thesis has been supported by the German Research Foundation (DFG) within the Collaborative Research Center SFB 876 "Providing Information by Resource-Constrained Analysis".





# Contents

<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abstract</b>	<b>V</b>
<b>1. Introduction</b>	<b>1</b>
1.1. Outline	2
1.2. Motivation	3
1.2.1. Quality of Experience	3
1.2.2. Energy-Aware Application Design	5
1.2.3. Battery Lifetime	5
1.2.4. Energy Efficient Communication Protocols	5
1.2.5. Power Consumption Modeling	6
1.3. Formal Problem Statement	6
1.4. Solution Approach	7
1.5. Focus on OFDMA based Systems	9
<b>2. Technical Basics and Frame Conditions</b>	<b>11</b>
2.1. Selected Aspects of the LTE Physical Layer	11
2.1.1. Uplink Signal and Frame Structure	11
2.1.2. Radio Resource Allocation and Scheduling	13
2.1.3. Link Adaptation	15
2.1.4. Transmit Power Control	15
2.2. Selected Aspects of Mobile WiMAX	18
2.2.1. Comparison with LTE	18
2.2.2. Mobile WiMAX Uplink Frame Structure	19
2.2.3. Transmit Power Control	21
2.3. Dual-Mode Power Amplifier for Handsets	22
2.4. The Mobile Radio Channel	25
2.4.1. Pathloss and Shadowing	25
2.4.2. Multipath Propagation	26
2.4.3. Doppler Shifts	29
2.5. Power and Energy Consumption Measurement	30
2.5.1. Shunt Resistor	31
2.5.2. Voltage to Frequency Conversion	33
2.5.3. Inductor	33
2.5.4. Battery Discharge Curve Based Approaches	34
2.6. Battery Lifetime Modeling	34
2.7. Lessons Learned	36

<b>3. Related Work</b>	<b>39</b>
3.1. Quality of Experience . . . . .	39
3.2. Battery Technology and Battery Lifetime Management . . . . .	40
3.3. Energy Efficient Algorithms and Protocols . . . . .	42
3.4. Power Consumption Measurement and Modeling . . . . .	44
3.5. Lessons Learned . . . . .	47
<b>4. Empirical Power Consumption Modeling</b>	<b>49</b>
4.1. An Empiric Power Consumption Model for LTE UE . . . . .	50
4.1.1. Measurement Setup . . . . .	50
4.1.2. Measuring the Impact of the Transmission Power on the Power Consumption . . . . .	54
4.1.3. Closed Form Modeling . . . . .	59
4.2. An Empiric Power Consumption Model for Mobile WiMAX UE . . . . .	63
4.2.1. Measurement Setup . . . . .	63
4.2.2. Measuring the Impact of the Transmission Power on the Power Consumption . . . . .	65
4.2.3. Closed Form Modeling . . . . .	68
4.3. Lessons Learned . . . . .	71
<b>5. A Context-Aware Power Consumption Model</b>	<b>73</b>
5.1. Architecture Description . . . . .	73
5.1.1. System Parameters . . . . .	74
5.1.2. Context Parameters . . . . .	77
5.2. Power Consumption Modeling based on Markov-Chain . . . . .	78
5.2.1. Power Consumption During Data Reception . . . . .	82
5.2.2. Consideration of Time Variant Parameters . . . . .	83
5.2.3. Incorporation of Tail Times . . . . .	83
5.3. The Impact of the Application-Type on Parameter Dependencies . . . . .	85
5.3.1. Parameter Dependencies for Non-Real-Time Applications . . . . .	85
5.3.2. Parameter Dependencies for Real-Time Applications . . . . .	87
5.4. Lessons Learned . . . . .	89
<b>6. Close to Reality Parameterization of CoPoMo</b>	<b>91</b>
6.1. Application-Context-Dependent State Transition Rates . . . . .	91
6.1.1. Real-Time Applications . . . . .	92
6.1.2. Non-Real-Time Applications . . . . .	92
6.2. Radio Channel Aware Throughput Measurements . . . . .	93
6.2.1. Measurement Setup . . . . .	93
6.2.2. The Impact of the SNR on the Throughput . . . . .	97
6.2.3. The Impact of the Multi-Path Characteristic on the Throughput . . . . .	98
6.2.4. The Impact of User Mobility on the Throughput . . . . .	102

6.2.5.	Implications for CoPoMo . . . . .	104
6.3.	Ray Tracing Simulations for Cell-Environment Characterization . . .	106
6.3.1.	Statistical Characterization of Cell Environments . . . . .	107
6.3.2.	Derivation of Active State Probabilities . . . . .	108
6.3.3.	Consideration of Additional User Behavior Characteristics . .	111
6.3.4.	Data Rate Degradation in Max. Power State . . . . .	113
6.3.5.	Consideration of Uplink Interferences . . . . .	113
6.4.	Lessons Learned . . . . .	114
<b>7.</b>	<b>Validation of CoPoMo</b>	<b>117</b>
7.1.	System Simulation . . . . .	117
7.1.1.	Random Walk . . . . .	119
7.1.2.	Calculating the File Transmission Energy . . . . .	121
7.1.3.	Deriving the Long Term Average Power Consumption . . . .	122
7.2.	Battery Lifetime Measurements . . . . .	122
7.2.1.	Traffic Generator . . . . .	124
7.2.2.	Automated BSE Parameterization . . . . .	125
7.3.	Validation Results . . . . .	127
7.3.1.	Example Validation Results by Simulation . . . . .	127
7.3.2.	Example Validation Results by Laboratory Measurements . .	128
7.4.	Lessons Learned . . . . .	131
<b>8.</b>	<b>Example Applications and Implications of CoPoMo</b>	<b>133</b>
8.1.	Deterministic Applications of the Empirical Power Consumption Model	133
8.2.	Quantifying the Parameter-Dependency of Battery Lifetime . . . . .	139
8.2.1.	Reference Cell Environments and Signal Quality Distribution	139
8.2.2.	Context Sensitivity of State Probabilities . . . . .	142
8.2.3.	Context Sensitivity of Power Consumption . . . . .	146
8.2.4.	Evaluating the Impact of the Device Characteristic . . . . .	149
8.2.5.	Evaluating the Impact of Tail Times . . . . .	152
8.2.6.	Quantitative Evaluation of Battery Models . . . . .	154
8.3.	Battery-Lifetime Optimization by Optimized Resource Allocation . .	156
8.4.	Utilizing Unused Network Capacity for Battery Lifetime Extension .	159
8.4.1.	A Generic Approach for Trading Cell Capacity in for Battery Lifetime . . . . .	160
8.4.2.	Parameterizing LTE for VoIP . . . . .	163
8.4.3.	Best-Case Power Savings for Intelligent PRB Utilization . . .	164
8.4.4.	Average Power Savings Derived by CoPoMo . . . . .	165
8.5.	Lessons Learned . . . . .	166
<b>9.</b>	<b>Extending CoPoMo to LTE-Advanced</b>	<b>169</b>
9.1.	Heterogeneous Network Architectures . . . . .	169

*Contents*

9.2. Coordinated Multipoint Reception . . . . .	171
9.3. Carrier Aggregation . . . . .	172
9.3.1. Implementation Issues . . . . .	174
9.3.2. Example Results . . . . .	176
9.4. Lessons Learned . . . . .	179
<b>10. Conclusion and Outlook</b>	<b>181</b>
10.1. Conclusion and Impact . . . . .	181
10.2. Outlook . . . . .	183
10.2.1. Multi Criteria Parameter Optimization . . . . .	183
10.2.2. Dynamic Network Parameterization by Operators . . . . .	184
10.2.3. Application Specific Tail Time Optimization . . . . .	184
10.2.4. Benchmarking of LTE and LTE-A User Equipment . . . . .	184
10.2.5. Comprehensive Modeling for Complete Smartphones . . . . .	185
10.2.6. Energy Efficiency Optimizations for Machine Type Commu- nications . . . . .	185
10.2.7. Validation by Field Measurements . . . . .	185
<b>A. Appendix</b>	<b>187</b>
A.1. Power Consumption Measurements versus Empirical Model . . . . .	187
<b>List of Acronyms</b>	<b>193</b>
<b>Bibliography</b>	<b>197</b>
<b>Acknowledgments</b>	<b>213</b>