Synchronized Performance Evaluation Methodologies for Communication Systems

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

Diplom-Informatiker

Elias David Weingärtner

aus Emmendingen

Berichter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Wehrle
Prof. Alejandro Buchmann, PhD.

Tag der mündlichen Prüfung: 19.6.2013

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten derHochschulbibliothek online verfügbar.

Reports on Communications and Distributed Systems

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

Volume 8

Elias David Weingärtner

Synchronized Performance Evaluation Methodologies for Communication Systems

Shaker Verlag
Aachen 2013

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, 2013)

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2227-8
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 • e-mail: info@shaker.de

Contents

Abstract

Researchers and developers typically rely on analytical techniques, simulation-based approaches or real-world experiments for the performance evaluation of communication systems. All of these methods have unique strengths. Network simulations are well suitable for conducting virtual experiments of very high scale; the deterministic and thus repeatable execution of simulations also make them an essential method for parameter studies. Performance evaluations carried out with real-world systems allow for investigations with the topmost possible level of realism and detail. Finally, analytical techniques abstract away from the technical environment of a communication system and hence enable the deduction of general evidence.

Unfortunately, all performance evaluation techniques also suffer from a number of individual shortcomings. The analytical formalization of complex communication protocols and their behavior is often very difficult. Network simulations model only the essential functionality of a communication system, making it problematic to apply this technique for analyzing resource usage or system-specific effects. Finally, evaluations carried out with real-world software prototypes are often perturbed by uncontrollable conditions in the environment. In addition, the high amount of hardware and manpower required for real-world performance evaluations of larger scale make such trials often very costly.

Hybrid performance evaluation methodologies are a promising approach for overcoming these issues. The concept of *network emulation* combines the flexibility and scalability of network simulation with the credibility and the level of detail associated with performance evaluations using real-world systems. A second important hybrid methodology is *hardware/network co-simulation*. The idea of this methodology is to integrate different simulation tools to bridge between their individual application domains, for instance network simulation and hardware modeling.

We contribute to the field of hybrid evaluation tools for communication systems in different ways. First, we introduce the concept of *Synchronized Hybrid Evaluation* that generalizes the idea of hybrid performance evaluation and thus is able to subsume a number of existing hybrid techniques. The second central cornerstone of our work is the synchronization and the virtualization of time. Existing network emulation frameworks require real-time capable simulations, which limits the application of network emulation to a rather narrow set of scenarios. Our work on *Synchronized Network Emulation* removes this burden by synchronizing the execution of the network simulation with virtualized communication systems. A further contribution to the field of network emulation is our work on *Device Driver-enabled Wireless Network Emulation*. It tightly integrates the simulated environment with the operating system context of the software prototype. As we further elaborate in this dissertation, both concepts and their respective implementations substantially extend the applicability of network emulation.

In addition, we contribute to the field of hybrid evaluation techniques with two additional frameworks. First, we propose the integration of a SystemC-based hardware simulator with a network simulation tool, aiming at a network centric design of embedded systems. Second, we show that virtualizing the progression of time and synchronizing the execution of virtualized software prototypes is helpful for building distributed debugging and monitoring tools.

Kurzfassung

Die Leistungsbewertung von Kommunikationssystemen wird derzeit meist entweder mit mathematisch-analytischen oder simulativen Methoden durchgeführt; ebenfalls sind Messungen mit realen Prototypen in Textnetzwerken (Test-Beds) verbreitet. All diese Ansätze besitzen individuelle Stärken: Die hohe Skalierbarkeit von Simulationen ermöglicht es, verteilte Kommunikationssysteme oder große Topologien zu untersuchen. Da Netzwerksimulationen eine deterministische Ausführung erlauben, ist es überdies möglich, Simulationsläufe beliebig zu wiederholen, was die Durchführung von Parameterstudien sehr vereinfacht. Im Gegensatz dazu liefern Messungen mit realen Prototypen Ergebnisse hoher Detailtreue und Güte. Mathematisch-Analytische Verfahren können generelle Aussagen über das Systemverhalten unabhängig von der konkreten Technologie liefern.

Ein großes Problem sind jedoch die individuellen Einschränkungen dieser Verfahren. So ist die mathematisch-analytische Formalisierung von komplexen Kommunikationssystemen sehr schwierig und oft nur eingeschränkt machbar. Der Abstraktionsgrad von Simulationen erschwert die Analyse von komplexem Systemverhalten, das sich beispielsweise aus der Interaktion mit dem Betriebssystem ergibt. Während Messungen mit realen Systemen solchen Einschränkungen nicht unterliegen, sind Experimente auf Testbeds typischerweise durch den hohen Hardwarebedarf sehr teuer. Ein großes Problem sind hier ebenfalls eine Vielzahl von schwer zu kontrollierenden externen Einflüssen, beispielsweise Hintergrundverkehr im Netzwerk oder eine nicht-deterministische Mobilität der Netzwerkknoten.

Ein Weg, den individuellen Schwächen dieser Verfahren zu begegnen, sind hybride Ansätze zur Leistungsbewertung. So vereint das Konzept der Netzwerkemulation die Stärken von Simulationen mit der Detailtreue bei Messungen mit realen Systemen. Ein weiterer solcher Ansatz ist das Konzept des Hardware-Software Co-Designs, in dem verschiedene Leistungsbewertungs- und Hardware-Entwurfsmethodiken in einem hybriden Werkzeug zusammengefasst werden.

In dieser Arbeit werden verschiedene Beiträge zu Forschungsfragestellungen im Bereich der hybriden Leistungsbewertungswerkzeuge besprochen. Das Konzept der *synchronisierten hybriden Evaluation* stellt eine Generalisierung hybrider Leistungsbewertungsverfahren dar und erlaubt es, eine Reihe von bestehenden hybriden Messverfahren zu subsubmieren. Das Hauptaugenmerk der Arbeit liegt auf einer daraus abgeleiteten Technologie, der *synchronisierten Netzwerkemulation*. Dieses Verfahren erlaubt es, Netzwerkemulationen mit Simulationen beliebiger Laufzeitkomplexität zu kombinieren und durchzuführen. Die *Gerätetreiber-basierte Netzwerkemulation für drahtlose Übertragungsverfahren (DDWNE)* ermöglicht es, den simulativen Kontext eng an die Ausführungsumgebung der realen Prototypen in einem Emulationsszenario zu binden.

In weiteren Verlauf werden zwei neue Evaluations-Werkzeuge vorgestellt. Zunächst wird ein Ansatz für die Netzwerk-zentrierte Entwicklung von eingebetteten Systemen diskutiert, das intern eine Hardware-Simulation auf Basis von SystemC mit einem Ereignis-basierten Simulator kombiniert. Abschließend wird ein Ansatz beschrieben, der mit Hilfe von Basistechnologien aus der synchronisierten Netzwerksimulation eine Umgebung für die verteilte Fehlersuche und Beobachtung der Ausführung von Kommunikationssystemen erlaubt.

Acknowledgments

Foremost I'd like to express my strong gratitude to my advisor, Klaus Wehrle. Six years ago, Klaus supported me in obtaining a PhD scholarship that enabled my journey with the fabulous COMSYS crew. He pointed me to a research problem that evolved into this doctoral thesis. Beyond that, I thank Klaus very much for creating an open-minded, creative and enjoyable environment. I will never forget the barbecues, skiing in Kleinwalsertal and all our intense conversations!

I'd also like to greatly thank Prof. Alejandro Buchmann not only for co-advising this dissertation, but also for all the exciting discussions we had during all the MAKI and QuaP2P-2 meetings in Darmstadt, Aachen and Kleinwalsertal.

This dissertation would not have been possible without the outstanding contributions by the highly talented and gifted students and colleagues I was lucky to work with. I'd like to give exceptional kudos to Florian Schmidt and Hendrik vom Lehn for their countless efforts with SliceTime. I deeply acknowledge the work of Marko Ritter for taming gdbserver-xen and Apache Thrift. René Glebke, Martin Lang and Alexander Hocks deserve a lot of praise for their patience with VODSim. I'd also like to thank Suraj Prabhakaran and Martin Lindner for additional SliceTime measurements. Finally, I'm very grateful for the fruitful cooperation with Stefan Schürmans, who introduced me to the concept of Hardware-Software Co-Design.

I owe the entire COMSYS team a big debt of gratitude. Tobi, I thank you so much for all the scientific and non-scientific discussions and for your exactness and diligence, not only when we've been writing papers together! Jó, I envy your endless curiosity and your enthusiasm! Raimondas and Georg, you have been both wonderful office mates. I have learned a lot from you! Ismet, thank you for being my No. 1 lifesaver by supplying me with coffee and snacks and for many great down-to-earth advices. I appreciate Petra, Ulrike and Rainer for being so helpful with all organizational issues I ran into - and Dirk and Janosch for taking over a lot of common duties in a self-forgetting manner! All of you have always been a wonderful source of inspiration and good reason to procrastinate. I will never forget three of you spontaneously performing "Bochum" by Herbert Grönemeyer in my office!

I am very thankful for the great support of my amazing friends. You have always been there to listen. You have always been great motivators, for example when we traveled the world together or simply by giving me a smile.

Finally, I'd like to express the strongest gratitude to my parents and my entire family. Rainer, Gertrud and Klaus Weingärtner have continuously supported my curiosity from an early age. I also deeply thank my brother Simon for letting me spend so much time on our C64 and all other family computers. This eventually made me become a computer scientist!