

Zuverlässigkeitsbasierter Cross-Layer-Entwurf digitaler Übertragungssysteme

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)
der Technischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von

Justus Christian Fricke

Kiel 2008

Tag der Einreichung: 18.09.2008

Tag der Disputation: 06.02.2009

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter Adam Höher
Prof. Dr.-Ing. Werner Henkel
Dr.-Ing. Ingmar Land

Digital Communications

Justus Christian Fricke

**Zuverlässigkeitsbasierter Cross-Layer-Entwurf
digitaler Übertragungssysteme**

Shaker Verlag
Aachen 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Kiel, Univ., Diss., 2009

Copyright Shaker Verlag 2009

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-8093-2

ISSN 1860-7535

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Die Funktionen digitaler Übertragungssysteme werden in übereinanderliegende Schichten systematisiert. Da üblicherweise nur benachbarte Schichten Informationen austauschen, können die Schichten unabhängig voneinander entworfen und gepflegt werden. Nachteil dieses schichtweisen Aufbaus ist, dass jede Schicht zusätzliche Verzögerungen und zusätzliches Datenaufkommen durch Protokollinformation verursacht. Häufig sind die einzelnen Schichten auf Grund ihres voneinander unabhängigen Entwurfs schlecht aufeinander abgestimmt. Der stetige Bedarf nach höheren Datenraten führte daher zu der Idee des schichtübergreifenden Systementwurfs (cross-layer design). Ziel des schichtübergreifenden Systementwurfs ist, durch zusätzlichen Informationsaustausch oder gar Auflösung der einzelnen Schichten Vorteile, z. B. höhere Datenraten oder geringere Verzögerungen, zu erzielen.

In dieser Arbeit werden schichtübergreifende Ansätze ausgehend von der untersten, der physikalischen Schicht, betrachtet. Dafür werden die weichen Ausgangswerte des üblicherweise als letzte Komponente der physikalischen Schicht angeordneten Kanaldecodierers verwendet, um die Bit- oder die Wortfehlerwahrscheinlichkeit zu berechnen. Mit der Bit- bzw. Wortfehlerwahrscheinlichkeit steht ein Maß zur Schätzung der Übertragungsqualität zur Verfügung, das schichtübergreifend genutzt werden kann. Ein großer Vorteil dieser Vorgehensweise die Fehlerwahrscheinlichkeit zu berechnen ist ihre Unabhängigkeit von Kanal, Modulationsformat und verwendetem Kanalcode.

Im ersten Teil der Arbeit wird nach einer kurzen Einführung der betrachteten Kanalcodes und des verwendeten Systemmodells erläutert, wie mit Hilfe des Decodierers bzw. seiner weichen Ausgangswerte Bit- und Wortfehlerwahrscheinlichkeit berechnet werden können. Ferner werden verschiedene Fehlerquellen und ihre Auswirkung auf die Schätzung untersucht. Der zweite Teil der Arbeit umfasst verschiedene schichtübergreifende Anwendungsmöglichkeiten der Fehlerwahrscheinlichkeiten. Eher anwendungsorientierte Ansätze stellen die Verwendung der Fehlerwahrscheinlichkeiten als Neuanforderungskriterium für ARQ-Verfahren und die güteorientierte Decodierung dar. Die Verwendung als Neuanforderungskriterium ermöglicht einen Abtausch zwischen der für eine Anwendung maximal zulässigen Fehlerrate und der Datenrate. Bei der güteorientierten Decodierung werden die empfangenen Daten nur dann decodiert, wenn die Fehlerwahrscheinlichkeit für die Ansprüche einer gegebenen Anwendung zu groß ist. Durch Ablaufplanung und Medium-Access-Control werden die begrenzten Ressourcen eines Kommunikationssystems zwischen den unterschiedlichen Teilnehmern aufgeteilt. Auch hier kann die Kenntnis der Fehlerwahrscheinlichkeiten der einzelnen Teilnehmer dazu genutzt werden, um die Datenrate des Systems zu steigern. Schließlich können die Fehlerwahrscheinlichkeiten auch zur Berech-

nung von Routing-Metriken genutzt werden, um einen möglichst geeigneten Pfad durch ein Netzwerk zu finden. In allen Fällen können durch die schichtübergreifende Kenntnis bzw. Anwendung der aus der Decodierung gewonnenen Fehlerwahrscheinlichkeit positive Effekte erzielt werden.

Stichwörter: schichtübergreifender Systementwurf (cross-layer design), Kanalcodierung, soft-output Decodierung, Wortfehlerwahrscheinlichkeit, Bitfehlerwahrscheinlichkeit, zuverlässigkeitsbasierte Neuanforderungskriterien, güteorientierte Decodierung, hybrid ARQ, zuverlässigkeitsbasiertes Routing, Routing-Metrik

Abstract

The operations of digital transmission systems can be organised in different layers which are arranged in a stack. Usually, only neighbouring layers exchange information between each other. Therefore, the different layers can be designed and modified without taking care of the other (non-neighbouring) layers. A disadvantage of this layered structure is that every layer introduces additional delay and causes additional data in terms of protocol information. Furthermore, the different layers often do not harmonise with each other due to their independent design. The continuous demand for higher data rates led to the idea of cross-layer design. The goal of cross-layer design are improvements such as higher data rates or lower delays obtained by additional information transfer between the layers or even dissolution of the layers.

In this thesis, cross-layer approaches based on the lowest layer of the protocol stack, the physical layer, are considered. Towards that goal, the soft output of the last component of the physical layer, the channel decoder, is used to calculate the bit or word error probability. The bit or word error probability is a measure of the transmission quality which can be applied in a cross-layer design. An advantage of this approach to calculate the error probability is its independence of channel, modulation format, and applied channel code.

The first part of this thesis covers a brief introduction of the system model and channel codes employed. The calculation of bit and word error probability by the channel decoder or its soft output is explained. Furthermore, different sources of error and their impact on the estimation of the error probabilities are investigated. The second part of the thesis covers different cross-layer applications of the error probabilities. Application-dependent approaches are the use of the error probabilities as retransmission criteria for ARQ protocols and for quality-oriented decoding. When used as a retransmission criterion, the error probabilities offer a trade-off between a maximum acceptable error rate of an application and the data rate. In quality-oriented decoding, the received data is only decoded if the error probability is too high for the requirements of a given application. The limited resources of a communication system are distributed among the different subscribers by scheduling and medium access control. The knowledge of the error probabilities of the individual subscribers can be used to increase the data rate of the system. Finally, the error probabilities can be also applied for the calculation of routing metrics to find a suitable path through a network. In all above-mentioned cases, the application of the error probabilities obtained by the decoding process in a cross-layer manner results in positive effects.

Keywords: cross-layer design, channel coding, soft-output decoding, word error probabil-

ity (WEP), bit error probability (BEP), reliability-based retransmission criteria, quality-oriented decoding, hybrid ARQ, reliability-based routing, routing metric

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufbau der Arbeit	2
2	Digitale Übertragungssysteme	5
2.1	Schichtmodelle und schichtübergreifender Systementwurf	5
2.1.1	Schichtmodelle	5
2.1.2	Das OSI-Schichtmodell	6
2.1.3	Schichtübergreifender Systementwurf	9
2.2	Zeitdiskretes Übertragungsmodell der physikalischen Schicht	12
2.2.1	Sender	14
2.2.2	Zeitdiskreter Ersatzkanal	14
2.2.3	Empfänger	17
2.3	Dienstgüte (QoS)	17
2.3.1	QoS-Attribute der physikalischen Schicht	17
2.4	Zusammenfassung	21
3	Fehlerkontrolle	23
3.1	Faltungscodes	24
3.1.1	Codierung	24
3.1.2	Decodierung	25
3.2	Parallel verkettete Faltungscodes	26
3.2.1	Codierung	26
3.2.2	Decodierung	27
3.3	LDPC-Codes	28
3.3.1	Codierung	29
3.3.2	Decodierung	30
3.4	Fehlererkennende Codes	31
3.4.1	Codierung	31
3.4.2	Decodierung	32
3.5	ARQ-Protokolle	32
3.6	Hybride ARQ-Protokolle	35
3.6.1	Diversity-Combining	35
3.6.2	Code-Combining	36
3.7	Zusammenfassung	37

4	Zuverlässigkeitsinformation als Qualitätsmaß	39
4.1	Zuverlässigkeitsinformation	39
4.2	Fehler bei der Berechnung der Zuverlässigkeitsinformation	41
4.2.1	Suboptimale Decodierer	41
4.2.2	Quantisierung durch Festkommandarstellung	42
4.2.3	Hard-input soft-output Decodierung	43
4.2.4	Korrelation der weichen Schätzwerte der Informationsbits	44
4.3	Bitfehlerwahrscheinlichkeit	50
4.3.1	Schätzung Bitfehlerwahrscheinlichkeit	50
4.3.2	Fehler Bitfehlerwahrscheinlichkeit	51
4.4	Wortfehlerwahrscheinlichkeit	60
4.4.1	Schätzung der Wortfehlerwahrscheinlichkeit	60
4.4.2	Fehler Wortfehlerwahrscheinlichkeit	61
4.5	Bit- und Wortfehlerwahrscheinlichkeit	73
4.6	Zusammenfassung	76
5	Zuverlässigkeitsbasierte Neuanforderungskriterien	77
5.1	Systemmodelle für ARQ	78
5.1.1	CRC-Code als Neuanforderungskriterium	81
5.1.2	Wortfehlerwahrscheinlichkeit als Neuanforderungskriterium	81
5.1.3	Bitfehlerwahrscheinlichkeit als Neuanforderungskriterium	83
5.2	Durchsatzeffizienz für verschiedene Neuanforderungskriterien	84
5.3	Packet-Combining	87
5.3.1	Diversity-Combining	87
5.3.2	Code-Combining	88
5.4	Zusammenfassung	90
6	Güteorientierte Decodierung	91
6.1	Abbruchbedingungen für iterative Strukturen	91
6.1.1	Turbo-Decodierer	92
6.1.2	BPA für LDPC-Code	95
6.2	Decodierung in Netzwerken mit Weiterleitung	97
6.2.1	Systembeschreibung	97
6.2.2	Güteorientierte Decodierung	100
6.3	Zusammenfassung	102
7	Zuverlässigkeitsbasiertes Routing	103
7.1	Einfluss der physikalischen Schicht auf die effektive Pfadlänge	104
7.1.1	Physikalische Schicht	106
7.1.2	Sicherungsschicht	107
7.1.3	Netzwerkschicht	107
7.2	Routing-Metriken für abschnittsweise Fehlerkontrolle	108
7.3	Routing-Metriken für durchgehende Fehlerkontrolle	111
7.4	Zusammenfassung	111

8	Zuverlässigkeitsbasierte Ablaufplanung	113
8.1	Systemmodell	114
8.2	Nutzermetriken	115
8.3	Fair-opportunistische Ablaufplanung	118
8.4	Zusammenfassung	121
9	Zuverlässigkeitsinformation in IDM	123
9.1	Systemmodell	124
9.2	Layer-weises ARQ in IDM	125
9.3	Zuverlässigkeitsbasierte Layer-Verteilung in IDM	127
9.4	Zusammenfassung	129
10	Zusammenfassung und Ausblick	131
A	Notation	135
B	Algorithmen zur soft-output Decodierung	141
C	Ergänzende Erläuterungen	157
	Literaturverzeichnis	163
	Stichwortverzeichnis	173