

Feedforward Symbol Timing Recovery: Computationally Efficient, Data-Aided Techniques for Digital Communication Receivers

Feedforward Symboltakt-Rückgewinnung: Aufwandsgünstige
datengestützte Methoden für digitale Empfänger

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

vorgelegt von
Axel Gesell
Erlangen - 2003

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	18.10.2002
Tag der Promotion:	18.03.2003
Dekan:	Prof. Dr. Albrecht Winnacker
Berichterstatter:	Prof. Dr. Johannes Huber
	Prof. Dr. Robert Weigel

Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik

Band 5

Axel Gesell

Feedforward Symbol Timing Recovery:

Computationally Efficient, Data-Aided Techniques
for Digital Communication Receivers

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2003

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Gesell, Axel:

Feedforward Symbol Timing Recovery: Computationally Efficient, Data-Aided Techniques for Digital Communication Receivers / Axel Gesell.

Aachen : Shaker, 2003

(Erlanger Berichte aus Informations- und Kommunikationstechnik ; Bd. 5)

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2003

ISBN 3-8322-1773-8

Copyright Shaker Verlag 2003

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 3-8322-1773-8

ISSN 1619-8506

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

To
Mareike

Acknowledgements

I am very grateful to my advisor, Prof. Dr.-Ing. J. Huber, at the university of Erlangen-Nuremberg, chair for information transmission, for his inspiration, guidance and support. He always managed to have time for consultations. Our discussions were the source of many ideas, how to improve this thesis.

Furthermore, I would like to thank Prof. Dr. R. Weigel for his interest in my work and for serving as co-referee.

I want to acknowledge the cooperativeness of the assistants at the chair for information transmission at the university of Erlangen-Nuremberg. Particularly, I wish to thank Dr. Wolfgang Gerstacker and Dr. Robert Schober for their helpful advices, and for reviewing parts of my work.

I am indebted to my employer Siemens AG, information and communication networks, at Munich, for supporting this work.

The best thanks go to my colleagues, Dr. Stefano Calabrò, Eric DeMan, Michaela Golombeck, Manfred Haberer, Dr. Berthold Lankl, Johann Lermer, Alfred Nist, Hermann Rausch, Richard Schmidmaier, Georg Sebald, Ernst-Dieter Schmidt, Dr. Bernhard Spinnler, Joachim Ziegler, and Luise Zierer for the excellent working atmosphere. I enjoyed their cooperativeness and the willingness to transfer their know-how and experience.

Especially, I want to thank Dr. Berthold Lankl for giving me the possibility to visit conferences and for the flexible working hours, which enabled me to write the thesis in parallel to my work at Siemens AG.

I am grateful for the numberless, fruitful discussions with Dr. Stefano Calabrò, Dr. Berthold Lankl, Georg Sebald, and Dr. Bernhard Spinnler, for their motivation for this thesis, and for reviewing this work.

For proof reading I wish to thank Dr. Stefano Calabrò, Dr. Bernhard Spinnler, Michaela Golombeck, Dr. Nancy Hecker-Dehnschlag, Dr. Erich Gottwald and Dr. Sven de Vries. Their comments and suggestions helped to improve the readability and the comprehensibility of this work.

Finally, I wish to thank my parents for supporting my studies and my wife for her patience and understanding for this work.

Abstract

An important task of a receiver in a synchronous digital communication system is the symbol timing recovery (STR). The STR is required in order to avoid intolerable timing phase offsets of the received signal sequence with respect to the optimal sampling raster.

The central topic of this thesis is to discuss techniques for feedforward STR based on a training sequence, i.e. a transmitted data sequence, which is a priori known at the receiver. Assuming a regularly sampled received signal, an eventual timing phase offset is estimated first, and then compensated by interpolating the sampled received signal, according to the timing phase estimate. We restrict ourselves to the case of linear modulation.

Generally, these techniques can be applied to almost all digital communication systems with a burst-wise data transmission, for instance TDMA (time-division multiple-access) – systems.

We concentrate on STR, placing high demands on performance, spectral efficiency (in the sense of a short and multipurpose training-sequence), and implementation. These design aspects are described in detail. The influence of constant and temporally varying timing phase offsets on the total system performance, which is represented by the bit error probability, is studied. The corresponding methods for performance calculation are new in parts. We also discuss the application of an channel equalizer as an alternative to STR.

In addition to the timing phase compensation, interpolation can be useful for estimating the timing phase itself. Therefore, an entire chapter is dedicated to this subject. Assuming band-limited signals we introduce complexity efficient implementations, both for fixed and variable interpolation phases, and appropriate design methods.

Making use of rules for the maximum-likelihood (ML) estimation of synchronization parameters, we calculate a lower bound for the estimation variance of the considered parameters on the basis of the Cramer-Rao bound (CRB) or the inverse Fisher information matrix. This lower bound is evaluated for both, the DA and NDA timing phase estimations.

Additionally, we derive numerous methods for DA timing phase estimation from the corresponding ML rule, some of them being new. The novel methods allow a significantly simplified implementation when compared to many known methods. This is confirmed by a comparison of all presented methods with respect to the hardware requirements and the necessary sampling frequency. Even certain well-known NDA methods, frequently applied due to their low implementation overhead, are shown to be more complex than these novel DA solutions.

Assuming frequency-nonselective channels, the systematic estimation error, the estimation variance and the robustness to small frequency offsets of the presented methods are investigated. It is shown that the mentioned variance can approach the theoretical limit, given by the CRB. Furthermore, frequency-selective channels are studied by applying the so-called Rummier channel model. This allows the comparison of the diverse methods for timing phase estimation on the basis of their 'signature-plots'.

Finally, a possible receiver concept for a TDMA system is discussed as an example of application. Synergy advantages of distinct receiver tasks can be exploited for a complexity efficient implementation. On the basis of system measurements some performance aspects are presented.

Zusammenfassung

Digitale Nachrichtenübertragung erfordert am Empfänger eine Symboltaktückgewinnung. Diese dient der Vermeidung eines nicht tolerierbaren Phasenfehlers bezüglich des Symboltaktes.

Im Mittelpunkt dieser Dissertation stehen Techniken zur “feedforward Symboltaktückgewinnung” auf der Basis einer Trainings-Sequenz. Unter der Annahme einer äquidistanten Abtastung des Empfangssignals wird ein eventuell auftretender Taktphasenfehler zunächst geschätzt, und anschließend durch entsprechende Interpolation des abgetasteten Empfangssignals kompensiert. Es wird eine lineare Modulation unterstellt.

Generell umfasst der Anwendungsbereich nahezu alle digitalen Übertragungssysteme mit blockweiser Datenübertragung, zum Beispiel TDMA (time-division multiple-access) – Systeme.

Im Fokus stehen Symboltaktückgewinnungen mit hohen Anforderungen an die Performance, die Bandbreiteneffizienz (im Sinne einer kurzen, universell verwendbaren Trainingssequenz), und die Implementierung. Diese Design-Aspekte werden ausführlich erörtert, der Einfluss von statischen und zeitvarianten Taktphasenfehlern auf die Gesamtperformance, gemessen an der Bitfehlerwahrscheinlichkeit, wird demonstriert. Die entsprechenden Rechenwege sind teilweise neu. Entzerrung wird als mögliche Alternative zu einer Symboltaktückgewinnung diskutiert.

Interpolatoren können zusätzlich zur Taktphasenkompensation auch für die Schätzung des Taktphasenfehlers selbst eine wichtige Rolle spielen. Daher ist diesem Thema ein eigenes Kapitel gewidmet. Unter der Voraussetzung bandbegrenzter Signale werden entsprechende Grundlagen, aufwandsgünstige Implementierungen für feste und variable Interpolationsphasen, und geeignete Design-Methoden aufgezeigt.

Ausgehend von Berechnungsvorschriften zur “maximum-likelihood” (ML) – Schätzung von Synchronisationsparametern wird eine untere Schranke für die Schätzvarianz auf der Basis der “Cramer-Rao bound” (CRB), bzw. der “Fisher-Information-Matrix”, berechnet. Für den Fall der DA und NDA Schätzung des Taktphasenfehlers wird die Schranke ausgewertet.

Die Berechnungsvorschrift für ideale ML-Schätzung ermöglicht zudem die Herleitung zahlreicher, praktikabler, z.T. neuer Methoden zur DA Taktphasenschätzung. Die neuen Methoden sind größtenteils wesentlich einfacher zu implementieren als viele bekannte Methoden, wie ein ausführlicher Vergleich bezüglich des erforderlichen Hardware-Aufwandes und der benötigten Abtastfrequenzen bestätigt. Selbst NDA Methoden zur Taktphasenschätzung, oft verwendet wegen ihrer geringen Komplexität, sind im allgemeinen aufwendiger.

Unter der Annahme von frequenznichtselektiven Kanälen werden die vorgestellten Methoden hinsichtlich des systematischen Schätzfehlers, der Schätzvarianz und der Robustheit gegenüber kleineren Frequenzoffsets untersucht. Es wird gezeigt, dass hinsichtlich der Schätzvarianz die theoretische Grenze, die CRB, erreicht werden kann.

Für frequenzselektive Kanäle wird exemplarisch das Rummler-Kanalmodell verwendet. Dieses ermöglicht den Vergleich der verschiedenen Methoden zur Taktphasenschätzung auf der Basis ihrer Signaturen.

Abschließend wird als Anwendungsbeispiel ein mögliches Empfängerkonzept für ein TDMA-System diskutiert. Das Zusammenspiel verschiedener Empfängeraufgaben kann im Sinne einer aufwandsgünstigen Implementierung genutzt werden. Basierend auf Systemmessungen werden einige Performance Aspekte betrachtet.

Contents

Abstract	i
1 Introduction	1
2 System Model	5
2.1 Transmitter Model	5
2.1.1 Modulation	5
2.1.2 Message Format	6
2.2 Channel Model	8
2.2.1 Intersymbol-Interference	8
2.2.2 Signal Attenuation	8
2.2.3 Carrier Phase and Frequency Offset	9
2.2.4 Additive White Gaussian Noise	9
2.3 Receiver Model	10
2.3.1 Receiver Filter	10
2.3.2 Synchronization & Parameter Estimation	14
2.3.3 Data-Recovery	16
3 Feedforward Symbol Timing Recovery	19
3.1 Operation Principle of a Feedforward Symbol Timing Recovery	19
3.2 Alternatives to a FF STR	20
3.2.1 Feedforward vs. Feedback	20
3.2.2 Equalization	21
3.3 Design Criteria	24
3.3.1 Spectral Efficiency	24
3.3.2 Performance – Bit Error Rate Evaluations	26

3.3.3	Implementation Complexity	39
4	Interpolation	43
4.1	Ideal Interpolation	43
4.2	FIR Approximation	45
4.3	Piecewise Interpolation	46
4.3.1	Lagrange Interpolation	48
4.3.2	Constrained Impulse Response	49
4.3.3	MMSE Design	50
4.4	Fixed Interpolation	51
4.5	Examples	52
5	Lower Bounds of the Estimation Variance	55
5.1	Cramer-Rao Bound	55
5.2	Fisher Information Matrix	56
5.3	Other Bounds	57
5.4	CRB for NDA TPE	57
5.5	CRB for DA Combined Timing Phase and Carrier Phase Estimation	59
5.6	Application of the Bounds for TPE	61
6	Methods for Timing Phase Estimation	65
6.1	Method for NDA Timing Phase Estimation	66
6.2	Methods for DA Timing Phase Estimation	69
6.2.1	Straightforward Methods	70
6.2.2	Polynomial Approximation of the Objective Function	73
6.2.3	Sampled Objective Function & Post-Processing	77
6.2.4	Channel Estimation & Post-Processing	93
6.3	Complexity - Overview	98
7	Performance – Frequency-Nonselective Channels	103
7.1	Systematic Error	103
7.2	Estimation Variance	112
7.3	Robustness to Frequency Offsets	116
7.4	Chapter Summary	122

8 Frequency-Selective Fading	125
8.1 Rummier Channel Model	125
8.2 Signatures	128
8.3 Application of an Equalizer	129
8.4 DA TPE with ISI	133
9 Example of Application	139
9.1 System Description	139
9.2 Receiver Concept	141
9.3 System Performance	146
10 Summary & Outlook	151
A Maximum-Likelihood Estimation	155
A.1 Optimum Receiver	155
A.2 Data-Aided, Decision-Directed and Non-Data-Aided Estimation	157
A.2.1 Data-Aided Estimation	157
A.2.2 Decision-Directed Estimation	157
A.2.3 Non-Data-Aided Estimation	158
A.3 Timing Phase Estimation	159
A.3.1 ML Rule for Combined Estimation of Data and Parameters	159
A.3.2 Objective Function for DA TPE	162
A.3.3 Objective Function for DD TPE	163
A.3.4 Objective Function for NDA TPE	163
B Summary of Methods for DA TPE	167
Glossary	169
Bibliography	177
Index	185