

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Baumechanik

**Output-only measurement-based parameter
identification of dynamic systems subjected to random
load processes**

Katrin S. Runtemund

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. sc. techn. (ETH) Daniel Straub

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Müller
2. Prof. Pol D. Spanos, Ph.D.
Rice University, Houston/USA

Die Dissertation wurde am 24.04.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 13.09.2013 angenommen.

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Baumechanik

Band 11

Katrin Runtemund

**Output-only measurement-based parameter
identification of dynamic systems subjected to
random load processes**

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.: München, Techn. Univ., Diss., 2013

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 978-3-8440-2595-8

ISSN 1864-1806

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

Abstract

In the present work a new output-only measurement based method is proposed which allows identifying the modal parameters of structures subjected to natural loads such as wind, ocean waves, traffic or human walk. The focus lies on the dynamic excitation of structures by wind turbulences and wind-induced ocean waves modeled as stationary Gaussian random process. In contrast to the existing output-only identification techniques which model the unmeasured load as white noise process, statistical information about the dynamic excitation, e.g. obtained by measurements of the wind fluctuations in the vicinity of the structure, are taken into account which improve the identification results as well as allow identifying the unmeasured load process exciting the structure.

The identification problem is solved on basis of a recently developed method called *H-fractional spectral moment (H-FSM) decomposition* of the transfer function $H(\omega)$ which allows representing Gaussian random processes with known power spectral density (PSD) function as output of a linear fractional differential equation with white noise input.

In the present work the efficiency and accuracy of this method is improved by the use of an alternative fractional operator and a modification is proposed which makes it applicable to short as well as long memory processes. The most widely used wind and ocean wave model spectra are compared and discussed, and the corresponding H-FSMs are provided in closed form allowing to simulate realization of the processes in a straight forward manner. Based on the FSM decomposition a state space representation of arbitrarily correlated Gaussian processes is developed in closed form which neither requires the factorization of the PSD function nor any optimization procedure. Combined with the state space model of the structure, it leads to an overall model with white noise input, which can be efficiently combined with any state-space model-based parameter identification algorithms such as the well known (weighted) extended Kalman filter algorithm used here. The method is successfully applied for the stiffness and damping estimation of single and multi-degree of freedom systems subjected to wind and wind-wave turbulences as well as for the estimation of the unmeasured load process. Finally, a sensitivity analysis of the filter accuracy is conducted in order to improve the accuracy and efficiency of the method.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Methode zur Identifikation modaler Parameter dynamischer Systeme entwickelt, die auf (Output-only) Messungen der Systemantwort infolge der natürlichen Anregung durch Lasten wie z.B. Wind, Wellen, Verkehr oder Personen basiert. Der Fokus der Arbeit liegt hierbei auf der stochastischen Anregung durch Windturbulenzen und windinduzierten Wellen, welche als Realisation stationärer Gaußscher Prozesse modelliert werden. Im Gegensatz zu bestehenden Output-only Identifikationsverfahren, die die unbekannten Lasten vereinfacht als weiße Rauschprozesse beschreiben, werden hier zusätzliche statistische Informationen, die beispielsweise durch Windmessung in der Nähe der Struktur gewonnen werden, berücksichtigt. Dies führt nicht nur zu einer Verbesserung der Parameterschätzung, sondern ermöglicht auch die gleichzeitige Lastidentifikation.

Das entwickelte Identifikationsverfahren basiert auf einer kürzlich entwickelten Methode, der sogenannten „*H-fractional spectral moment (H-FSM) decomposition*“, d.h. der Zerlegung der Übertragungsfunktion $H(\omega)$ mit Hilfe von spektralen Momenten fraktionaler Ordnung. Die Methode erlaubt einen Gaußschen Prozess mit gegebener Leistungsspektraldichte (PSD) als Output einer linearen fraktionalen Differentialgleichung mit weißem Rauschen als Input zu simulieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Effizienz und die Genauigkeit dieser Methode durch die Verwendung eines alternativen fraktionalen Integraloperators verbessert und die Definition der H-FSMs derart modifiziert, dass die Methode nicht nur für sogenannte „Short Memory“ Prozesse mit exponentiell abklingender Autokorrelation, sondern auch für langkorrelierte („Long Memory“) Prozesse anwendbar ist. Die gebräuchlichsten Wind und Windwellen charakterisierenden Modellspektren werden diskutiert und die zugehörigen H-FSMs in analytischer Form zur Verfügung gestellt, mit Hilfe derer, Realisationen der Prozesse in einfacher Weise generiert werden können. Auf der H-FSM Zerlegung aufbauend, wird ein für beliebig korrelierte Lastprozesse gültiges lineares Zustandsraummodell in analytischer Form hergeleitet, das im Gegensatz zu gebräuchlichen Methoden weder die spektrale Faktorisierung der Leistungsspektraldichte noch die Anwendung eines Optimierungsverfahrens erfordert. Es erlaubt die Lasten in die Systemgleichungen zu integrieren, so dass das System mit korrelierten Lasten auf ein Gesamtsystem höherer Ordnung mit weißem Rauschen als Input

zurückgeführt werden kann, dessen Parameter dann mit einem beliebigen zustandsraum-basierten Verfahren, wie z.B. das hier verwendete Erweiterte Kalman Filter, identifiziert werden können. Die Methode wird für die Schätzung der Steifigkeits- und Dämpfungsparameter von Ein- und Mehrfreiheitsgradsystemen unter wind- und welleninduzierten Lasten sowie für die Schätzung des unbekannten Lastprozesses verwendet. Schließlich wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, mit dem Ziel, die Genauigkeit und die Effizienz des Algorithmus weiter zu verbessern.

Acknowledgments

It has been a great privilege to spend several years as research assistant at the Chair of Structural Mechanics of the Faculty of Civil, Geo and Environmental Engineering at Technische Universität München.

I would like to express my sincere gratitude to my supervisor Prof. Gerhard Müller for his guidance, patience and unconditional trust, that encouraged me to follow my own ideas and research interests. I greatly appreciated the familiar atmosphere at the chair and my colleges will always remain dear to me.

Besides my supervisor, I would like to thank Prof. Pol Spanos for agreeing to be co-examiner of my thesis and for his encouraging and insightful comments.

I owe my deepest gratitude to my mentor Giulio Cottone for many valuable discussions that helped me to understand my research area better. Without his continuous optimism concerning this work, enthusiasm, encouragement and support this study would hardly have been completed.

Foremost, I would like to thank my family and friends for having been a constant source of moral and spiritual support, encouragement and strength during all these years.

Contents

Abstract	III
Zusammenfassung	IV
Acknowledgments	VI
List of Symbols and Acronyms	X
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Outline	3
2 Stochastic Models of Dynamic Excitations	6
2.1 A brief review on probability and stochastic process	6
2.1.1 Second-order characterization	8
2.1.2 Important processes	10
2.1.2.1 White noise process	10
2.1.2.2 Gaussian process	11
2.2 Aerodynamic Wind Excitation	13
2.2.1 Mean wind velocity profile	15
2.2.2 Turbulence	17
2.2.2.1 Turbulence intensity	18
2.2.2.2 Integral scales of turbulence	18
2.2.2.3 Asymptotic properties of the turbulence spectra	20
2.2.2.4 Turbulence model spectra	26
2.2.3 Models for wind loads on structures	29
2.3 Wind wave excitation	32
2.3.1 Ocean wave spectra	33
2.3.2 Sea states	34
2.3.3 Generation of wind waves	35
2.3.4 Linear wave model	37
2.3.5 Model spectra of the fully developed sea	39
2.3.6 Wind-induced wave forces	45
3 State-of-the-Art on Digital Simulation of Ambient Loads - Traditional Methods	49
3.1 Wave superposition-based methods	50
3.2 Digital filter schemes	54
3.2.1 Parametric time series-based methods	54

3.2.2	Shaping filters	59
3.2.2.1	The spectral factorization theorem	60
4	State Space (Markovian) Modeling of Ambient Loads	64
4.1	Definition	64
4.2	State space model of AR and MA series	66
4.3	State space model of an ARMA series	68
4.4	Relation between state space model and transfer function	69
4.5	State space augmentation	73
4.5.1	Numerical example	75
5	Fractional Representation of Stationary Gaussian Processes	77
5.1	A short historical overview	78
5.2	Grünwald - Letnikov fractional integral	79
5.3	Reconstruction of AC and PSD function by fractional spectral moment decomposition	81
5.4	Reconstruction of impulse response and transfer function by H-FSM decomposition	83
5.4.1	Numerical examples	85
5.4.1.1	Exponentially autocorrelated wind gusts	85
5.4.1.2	Wind gusts with von Kármán velocity PSD	86
5.4.1.3	Wind waves with Pierson Moskowitz PSD	87
5.5	Digital simulation of Gaussian random processes with target PSD function	88
5.5.1	Short memory principle	90
5.5.2	Numerical examples	92
5.5.3	Investigation of the simulation accuracy: discretization and truncation errors	93
5.6	Long-memory processes	100
5.6.1	Properties	100
5.6.2	Proposed modification of the H-FSM decomposition for the representation of Gaussian processes with power-law decay	103
5.6.2.1	Numerical example	104
5.6.3	Digital simulation of a Gaussian random process with power-law decay by H-FSM decomposition	104
5.6.3.1	Numerical example	105
5.7	Summary of the main findings	106
6	Structural Parameter Identification by Kalman Filter Approaches	109
6.1	Kalman filter	110
6.1.1	Model assumptions	112
6.1.2	Bayesian approach to the Kalman filter	114
6.1.2.1	Recursive Bayesian filtering	116
6.1.3	Nonlinear state estimation	120
6.1.3.1	Derivation of the extended Kalman filter for adaptive estimation	121
6.1.3.2	Initialization of the Kalman filter algorithm	125

6.1.3.3	The weighted extended Kalman filter algorithm (W-EKF) . . .	126
6.1.4	Application to a three story shear building	128
7	A New Parameter Identification Method of Structures Excited by Random Loads	142
7.1	Proposed modification of the EKF algorithm	142
7.1.1	Generalized state space representation of colored random processes . .	143
7.1.2	Generalized state space model of structures subjected to random loads	145
7.1.3	Parameter identification of a SDOF dynamical structure	146
7.1.3.1	CASE STUDY 1: Exponentially correlated wind gusts	146
7.1.3.2	CASE STUDY 2: Wind gusts with von Kármán velocity PSD	153
7.1.3.3	CASE STUDY 3: Wind waves with Pierson-Moskowitz PSD .	154
7.1.4	Enhancing the method's efficiency by the weighted H-fractional extended Kalman filter	154
7.1.5	Parameter identification of a three story shear building	155
7.1.5.1	CASE STUDY 1: Exponentially correlated wind gusts	156
7.1.5.1.1	Influence of the sampling interval on the filter convergence	157
7.1.5.1.2	Influence of the accuracy of the load modeling on the filter performance	160
7.1.5.2	CASE STUDY 2: Wind gusts with von Kármán velocity PSD	164
8	Conclusions and Outlook	169
Annexe		176
A.1	Definitions	176
A.1.1	Characteristic function	176
A.1.2	Stationarity	177
A.1.3	Ergodicity	177
A.1.4	Selected processes	178
B.1	Digital Simulation of Ambient Loads	184
B.1.1	Iterative derivation of the ARMA coefficients	184
B.1.2	Fractional spectral moments	186
C.1	Kalman Filter	193
C.1.1	Least square approach to the Kalman filter	193
C.1.2	Partial derivative matrices	198
D.1	State-of-the-art on System Identification Techniques for Operational Modal Analysis	200
D.1.1	NExT-type methods	201
D.1.2	ARMA-type methods	203
D.1.3	Stochastic realization-based methods	209
D.1.4	Stochastic subspace-based methods	213
Bibliography		220