



Marc-André Jung

Contributions to Wideband Hands-free Systems and their Evaluation



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Nachrichtentechnik

Contributions to Wideband Hands-free Systems and their Evaluation

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

Marc-André Jung
aus Weilburg

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. Tim Fingscheidt
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Gerhardt Schmidt
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Markus Maurer
Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

eingereicht am: 08. März 2017

mündliche Prüfung am: 07. August 2017

Druckjahr: 2018

Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig,
Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik, Physik

Mitteilungen aus dem Institut für Nachrichtentechnik der
Technischen Universität Braunschweig

Band 55

Marc-André Jung

**Contributions to Wideband Hands-free Systems
and their Evaluation**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2017

Editor of this volume:

Prof. Dr.-Ing. Tim Fingscheidt
Institute of Communications Technology
Technische Universität Braunschweig
Schleinitzstraße 22
38106 Braunschweig
Germany
e-mail: fingscheidt@ifn.ing.tu-bs.de
phone: +49 (0)531 391-2485
fax: +49 (0)531 391-8218

Copyright Shaker Verlag 2018

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 978-3-8440-6000-3

ISSN 1865-2484

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

This work deals with the advancement of wideband (i.e., 150 Hz to 7 kHz frequency range) hands-free systems (HFSs) for mono- and stereophonic cases of application. Furthermore, innovative contributions to the corresponding field of quality evaluation are made. The proposed HFS approaches are based on frequency-domain adaptive filtering for system identification, making use of Kalman theory and state-space modeling. Simultaneous satisfaction of several independent quality aspects is key to proper speech enhancement system development. Therefore, functional enhancement modules are developed in this work, which improve one or more of these quality aspects, aiming at not to harm others. In so doing, these modules can be combined in a flexible way, dependent on the needs at hand. The monophonic HFS, enhanced in this way, is evaluated according to automotive recommendations of the standardization sector of the International Telecommunication Union (ITU-T Rec. P.1110/P.1130), to prove its customized efficacy. Furthermore, a novel methodology and, based upon this, a technical framework are introduced in this work to improve the prototyping and evaluation process of automotive hands-free and in-car-communication (ICC) systems. The monophonic HFS in several configurations hereby acts as device under test (DUT) and is thoroughly investigated, which will show the DUT's satisfying performance, as well as the advantages of the proposed development process.

As current methods for the evaluation of HFSs in dynamic conditions oftentimes still lack flexibility, reproducibility, and accuracy, this work introduces “**Car in a Box**” as a novel, improved system for this demanding task. It will be shown, that it is able to enhance the development process by performing high-resolution system identification of dynamic electro-acoustical systems, as they are present, e.g., if a car’s driver moves during a hands-free call. The extracted dynamic impulse response trajectories are then applicable to arbitrary input signals in a synthesis operation. In so doing, a realistic dynamic automotive auralization of a car cabin interior is available for HFS evaluation. It is shown that this system improves evaluation flexibility at guaranteed reproducibility. In addition, the accuracy of evaluation methods can be increased considerably by having access to exact, realistic impulse response trajectories acting as a so-called “ground truth” reference. If the **Car in a Box** is included into an automotive evaluation setup, there is no need for an acoustical car interior prototype to be present at this stage of development, as will be shown. As these prototypes are typically not available easily/cost-efficiently, the **Car in a Box** may therefore ease the HFS development process. As shown in this work, dynamic acoustic replicas may be provided including an arbitrary number of acoustic car cabin interiors for multiple developers simultaneously. With **Car in a Box**, speech enhancement system developers therefore have an evaluation environment at hand, which can adequately replace the real environment.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung breitbandiger (Frequenzbereich 150 Hz bis 7 kHz) Freisprechsysteme für mono- und stereophone Anwendungsfälle und liefert innovative Beiträge zu deren Qualitätsmessung. Die vorgestellten Verfahren basieren auf im Frequenzbereich adaptierenden Algorithmen zur Systemidentifikation gemäß der Kalman-Theorie in einer Zustandsraumdarstellung. Bei der Entwicklung von Systemen zur Sprachsignalverbesserung muss darauf geachtet werden, verschiedenen unabhängigen Qualitätsanforderungen gleichzeitig zu genügen. Daraus werden in dieser Arbeit funktionale Erweiterungsmodule dahingehend entwickelt, dass mindestens eine dieser Qualitätsanforderungen verbessert wird, ohne andere eklatant zu verletzen. Diese nach Anforderung flexibel kombinierbaren algorithmischen Erweiterungen werden gemäß internationaler anerkannter Empfehlungen des Standardisierungssektors der International Telecommunication Union (ITU-T Rec. P.1110/P.1130) in vorwiegend automotiven Testszenarien getestet und somit deren zielgerichtete Wirksamkeit bestätigt. Des Weiteren wird eine Methodensammlung und darauf aufbauend ein technisches System zur verbesserten Prototypentwicklung und Evaluation von automotiven Freisprech- und Innenraumkommunikationssystemen vorgestellt und beispielhaft mit dem monophonen Freisprechsystem in diversen Ausbaustufen zur Anwendung gebracht. Daraus entstehende Vorteile im Entwicklungs- und Testprozess von Systemen zur Sprachverbesserung werden dargelegt und messtechnisch verifiziert.

Bestehende Messverfahren zum Verhalten von Freisprechsystemen in zeitvarianten Umgebungen zeigten bisher oft nur ein unzureichendes Maß an Flexibilität, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit. In dieser Arbeit wird daher das “Car in a Box”-Verfahren entwickelt und vorgestellt, mit dem zeitvariante elektro-akustische Systeme, wie zum Beispiel Fahrerbewegungen im Fahrzeug während der Freisprechtelefonie, technisch identifiziert werden können. Daraufhin können die so gewonnenen dynamischen Impulsantworten im Labor in einer Synthesoperation auf beliebige Eingangssignale angewandt werden, um realistische Testsignale unter dynamischen Bedingungen zu erzeugen. Bei diesem Vorgehen wird ein hohes Maß an Flexibilität bei garantierter Reproduzierbarkeit erlangt. Es wird gezeigt, dass die Genauigkeit von darauf basierenden Evaluationsverfahren zudem deutlich gesteigert werden kann, da mit dem Vorliegen von exakten, realen Impulsantworten zu jedem Zeitpunkt der Messung eine sogenannte “ground truth” als Referenz zur Verfügung steht, welche unter regulären Bedingungen nicht verfügbar wäre. Bei der Einbindung des “Car in a Box”-Systems in einen Messaufbau für automotive Freisprechsysteme ist es bedeutsam, dass zu diesem Zeitpunkt das eigentliche Fahrzeug, das ohnehin zum Entwicklungszeitpunkt neuartiger Freisprechsysteme oft nur als Prototyp existiert und somit nur selten, und daher kostspielig, zur Verfügung steht, nicht mehr benötigt wird. Es wird gezeigt, dass eine dynamische Fahrzeugakustikumgebung, wie sie im Entwicklungsprozess von automotiven Sprachverbesserungsalgorithmen benötigt wird, in beliebiger Anzahl vollständig und mindestens gleichwertig durch das “Car in a Box”-System ersetzt werden kann.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtentechnik der Technischen Universität Braunschweig. In dieser Zeit hat mich sowohl das soziale und fördernde Institutsleben als auch die fachliche und freundschaftliche Unterstützung zahlreicher Personen beeindruckt und geprägt, weshalb ich hiermit sehr gerne meinen Dank aussprechen möchte.

Dieser Dank gilt im besonderen meinem Doktorvater und Mentor Professor Dr.-Ing. Tim Fingscheidt. Sie haben durch Ihre teils fordernde, aber immer wohlwollende und unterstützende Art sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Die Zusammenarbeit mit Ihnen, die sich nicht nur auf hilfreiche wissenschaftliche und fachliche Diskussionen beschränkt, schätze ich sehr und ich bin für Ihre Unterstützung und das in mich gesetzte Vertrauen dankbar. Mein weiterer Dank gilt meinem Zweitprüfer Professor Dr.-Ing. Gerhardt Schmidt. Vielen Dank für die freundschaftliche Unterstützung und die geteilte fachliche Begeisterung. Ich danke auch Professor Dr.-Ing. Markus Maurer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bedanken möchte ich mich auch sehr herzlich bei allen Mitarbeitern, Kollegen und Freunden die ich während meiner Zeit am Institut kennen gelernt habe. Ihr habt entscheidend dazu beigetragen, dass das IfN für mich zu einem besonderen Ort geworden ist, den ich mit vielen gemeinsamen sozialen Aktivitäten und fruchtbarem wissenschaftlichen Austausch verbinde. Besonders danke ich den Kollegen und auch Studenten, die mich unmittelbar bei der Anfertigung und Korrektur der Dissertation unterstützt haben und in vielen Gesprächen meinen Horizont erweitert haben. Auch allen Mitarbeitern aus Technik und Verwaltung möchte ich Danke sagen. Sei es in den Sekretariaten, der Bibliothek oder der elektrischen und mechanischen Werkstatt – ihr hattet immer ein offenes Ohr und habt mich in zahllosen Dingen unterstützt. Nicht zuletzt danke ich auch Professor Dr.-Ing. Ulrich Reimers für seine vorbildliche Führung des Instituts und seine persönliche Unterstützung.

Abschließend möchte ich mich noch ganz herzlich bei meiner Familie bedanken. Ihr habt stets an mich geglaubt und mir Orientierung und Motivation gegeben. Vielen Dank für alles was ihr gegeben habt! Auch euch – Silvia, Jürgen und Niklas – danke ich sehr für euer Verständnis und den Rückhalt. Ein ganz besonderer Dank gilt dir, Kirsten. Deine bedingungslose Unterstützung und Liebe hat mir Kraft gegeben und mir jederzeit sehr geholfen.

Danke!

Braunschweig im Mai 2018

Marc-André Jung

Contents

List of Tables	xi
List of Figures	xiii
List of Abbreviations	xv
List of Mathematical Symbols	xxi
1 Introduction	1
2 Automotive Hands-free Systems	7
2.1 Overview of State-of-the-art Hands-free Systems	7
2.1.1 Time-based AEC Approaches	10
2.1.2 Frequency-based AEC Approaches	11
2.1.3 Postfiltering	11
2.1.4 Near-end Signal Enhancement	12
2.2 Algorithmic Description: The Mono Case	13
2.2.1 Functional Enhancement Modules	16
2.2.2 Automotive Scenario	26
2.2.3 Office Scenario	27
2.2.4 Experimental Evaluation	28
2.3 Algorithmic Description: The Stereo Case	28
2.3.1 Distinction Against Baselines	35
2.3.2 Experimental Discussion	38
2.4 Summary	39
3 Measurement and Prototyping System for Automotive Teleconferencing	41
3.1 Proposed Measurement Methodology	42
3.1.1 Noise Data Acquisition	46
3.1.2 Speech Data Acquisition	48
3.1.3 Communication Simulation	50
3.1.4 Evaluation	53
3.2 System Description	54
3.2.1 Signal Flow and General Overview	54
3.2.2 Hardware Setup	55
3.2.3 Software Setup	69
3.2.4 Power Concept	74
3.3 Noise Database Acquisition	76
3.3.1 Acquisition Conditions	76
3.3.2 Sensor Selection and Placement	77

Contents

3.3.3	Noise Scenarios	78
3.3.4	Data Postprocessing and Noise Insertion	82
3.4	Live Demonstration	84
3.5	Summary	85
4	Evaluation of Hands-free Systems	87
4.1	Quality Aspects of Hands-free Systems	87
4.2	Subjective Evaluation	89
4.3	Instrumental Evaluation: A Researcher's Point of View	89
4.3.1	White-box Testing / Signal Separation	92
4.3.2	Black-box Testing / Signal Identification	106
4.4	Reproducible Evaluation in Dynamic Conditions	110
4.4.1	Dynamic System Identification	111
4.4.2	Excitation Signal	112
4.4.3	Robustness to Nonlinearities	114
4.4.4	Simulation Setup	116
4.4.5	Iterative NLMS Versus Fast NLMS	118
4.4.6	Real-world Setup	122
4.4.7	Application to Instrumental White-box Evaluation	123
4.5	Instrumental Evaluation: An Implementor's Point of View	126
4.5.1	Preparatory Measurements	128
4.5.2	Delay Measurements	130
4.5.3	Measurements in Receive Direction	132
4.5.4	Measurements in Send Direction	133
4.5.5	Echo Measurements	135
4.5.6	Speech Quality in the Presence of Background Noise	137
4.5.7	Performance of SRW-transmission-enabled Phones	144
4.6	Summary	145
5	Car in a Box	147
5.1	Ambition and Reasoning	147
5.2	Technical Description	149
5.2.1	Preparatory Measurements	149
5.2.2	Signal Processing Layer	151
5.2.3	Physical Layer	157
5.2.4	Software Layer	159
5.3	Evaluation	163
5.4	Summary	166
6	Conclusions	169
Bibliography		173
Own Publications		191

List of Tables

2.1	Parameter settings for the proposed monophonic FDADF approach with decimation: reference filter (RF) and shadow filter (SF). Optimized for an <i>automotive</i> usage scenario.	27
2.2	Parameter settings for the proposed monophonic FDADF approach with decimation: reference filter (RF) and shadow filter (SF). Optimized for an <i>office</i> usage scenario.	29
3.1	Microphone distribution	78
3.2	Accelerometer distribution	80
3.3	Auxiliary sensors	80

List of Figures

2.1	General overview of a typical hands-free system	9
2.2	System model of a monophonic hands-free system	13
2.3	System model of a complexity-reduced monophonic hands-free system	16
2.4	System model of a monophonic hands-free system with postfilter decimation	19
2.5	System model of a monophonic hands-free system with shadow filter	21
2.6	Stereo AEC system model with decorrelation preprocessor	31
2.7	Evaluation of automotive stereo AEC system (white Gaussian noise excitation)	37
2.8	Evaluation of automotive stereo AEC system (speech excitation)	37
3.1	Measurement- and prototyping platform: general overview	45
3.2	Proposed measurement methodology: noise data acquisition	48
3.3	Proposed measurement methodology: speech data acquisition	49
3.4	Proposed measurement methodology: communication simulation	51
3.5	Measurement- and prototyping platform: hardware setup	56
3.6	Processing platform with device under test and measurement equipment	57
3.7	Processing platform with device under test	64
3.8	Measurement- and prototyping platform: software setup	70
3.9	Magnitude response and group delay for FIR and IIR sample rate conversion filters	72
3.10	Measurement- and prototyping platform: power concept	75
3.11	VW Touran research car with accelerometer placement	79
3.12	Measurement setup of noise processing	83
4.1	Performance mono AEC: different configuration levels	97
4.2	Influence of “Enhanced Signal Equalizing and Normalization” module on amplitude response in send direction.	98
4.3	Performance mono AEC: far-end single talk	99
4.4	Performance mono AEC: near-end single talk	100
4.5	Performance mono AEC: SNR conditions	102
4.6	Performance mono AEC: SER conditions	104
4.7	Performance mono AEC: double talk over time	107
4.8	Performance mono AEC: far-end single talk over time	107
4.9	Comparison of white-box and black-box evaluation, applied to a monophonic HFS in two different configuration setups	108
4.10	Discrete-time model for identification of a time-variant LEM system	111
4.11	Perfect sweep sequence $p(n) _{n=0}^{P-1} = \text{IDFT}\{\mathcal{P}(k) _{k=0}^{P-1}\}$ of length $P = 256$	114
4.12	Normalized system distance $D(n)$ for a static identification process with PS and WN excitation	115

List of Figures

4.13 Simulated Q -measure evaluation for different excitation signal types and signal levels	115
4.14 Room acoustic simulation setup of a car's interior	117
4.15 Car setup with generation of a time-varying echo path according to ITU-T P.1110	117
4.16 Q -measure and normalized system distance D as a function of PS sequence length P	118
4.17 Figure-of-merit evaluation to find the optimum sequence length	120
4.18 Iterative NLMS with $N = P = 768$	121
4.19 Fast NLMS with $N = P = 768$	121
4.20 Automotive measurement with time-varying echo path according to ITU-T P.1110	123
4.21 Fast NLMS with $N = P = 768$ (verification step).	124
4.22 Performance mono AEC: double talk over time (dynamic)	125
4.23 Terminal coupling loss wideband and spectral echo attenuation	136
4.24 3QUEST speech quality testing (ITU 1)	140
4.25 3QUEST speech quality testing (ITU 2)	140
4.26 3QUEST speech quality testing (ITU 3)	141
4.27 3QUEST speech quality testing (ITU 4)	141
4.28 3QUEST speech quality testing (ITU 5)	143
4.29 3QUEST speech quality testing (ITU 6)	143
4.30 3QUEST speech quality testing (ITU 7)	144
5.1 Electro-acoustical paths inside a passenger car	150
5.2 Car in a Box: signal processing layer	152
5.3 Car in a Box: physical layer	158
5.4 Car in a Box: software layer	165

List of Abbreviations

— A —

A/D	<i>see</i> ADC
A2DP	Advanced audio distribution profile
ABE	Artificial bandwidth extension
ABWE	<i>see</i> ABE
ac	Acoustical
AC	Alternating current
ACQUA	Advanced Communication Quality Analysis (a proprietary software by HEAD acoustics GmbH, Germany)
ADC	Analog-to-digital converter
AEC	Acoustic echo canceler
AES	Audio Engineering Society, (<i>also:</i> AES or AES/EBU often-times describe a specification for a digital two-channel audio interface according to AES3)
AES3	<i>see</i> AES
AES10	<i>see</i> MADI
AES/EBU	<i>see</i> AES
AG	Audio gateway
AGC	Automatic gain control
AMP	Amplifier
AMR	Adaptive Multirate
AMR-NB	<i>see</i> AMR
AMR-WB	Adaptive Multirate Wideband
ANR	Ambient noise rejection
ANSI	American National Standards Institute
AP	Affine projection
ArtemiS	(a proprietary multichannel analysis software by HEAD acoustics GmbH, Germany)
ASRC	Asynchronous SRC, <i>see</i> SRC
ATC	Automotive teleconferencing system

— B —

BGN	Background noise
BLOCK	Noise blocking
BNC	Bayonet Neill Concelman
BT	Bluetooth

List of Abbreviations

— C —

CAN	Controller area network
CCP	Constant current power
CDMA	Code division multiple access
CDMA2000	<i>see</i> CDMA
CiaB	Car in a Box
codec	Coder and decoder
CPU	Central processing unit
CSS	Composite source signal
CVSD	Continuously Variable Slope Delta Modulation

— D —

D/A	<i>see</i> DAC
DAC	Digital-to-analog converter
DC	Direct current
DEC	Decimation
DF	Diffuse field
DFT	Discrete Fourier transform
DMA	Direct memory access
DRP	Drum reference point
DSP	Digital signal processing / processor
DT	Double talk
DTD	DT detection, <i>see</i> DT
DUT	Device under test

— E —

EBU	European Broadcasting Union
ECU	Electronic control unit
el	Electrical
EMI	Electro-magnetic interference
EQ	Equalizer
ERL	Echo return loss
ERLE	ERL enhancement, <i>see</i> ERL
ERP	Ear reference point
ETSI	European Telecommunications Standards Institute

— F —

FB	Full band
FDAF	Frequency-domain adaptive filtering
FF	Free field
FFT	Fast Fourier transform
FIR	Finite impulse response
FM	Frequency modulation
FOM	Figure of merit
FS	Full scale

— G —

GLC	Gain loss control
GPS	Global positioning system
GSM	Global system for mobile telecommunications

— H —

HATS	Head and torso simulator
HD	High definition
HD Voice	(a brand name to cover wideband audio transmission, quality, and devices), <i>see</i> HD, WB
HF	Hands-free
HFP	HF profile, <i>see</i> HF, BT
HFRP	HF reference point, <i>see</i> HF
HFS	HF system, <i>see</i> HF
HFT	HF terminal, <i>see</i> HF
HMI	Human machine interface
HMS	HEAD Measurement System, (a proprietary technology by HEAD acoustics GmbH, Germany)
HP	High pass (filter)
HRP	HATS reference point, <i>see</i> HATS
HRTF	Head-related transfer function
HSP	Headset profile
HVAC	Heating, ventilation, air conditioning

— I —

IC	Integrated circuit
ICC	In-car communication
ICP	Integrated Circuit Piezoelectronic
ID	Independent of direction
IDFT	Inverse DFT, <i>see</i> DFT
IFFT	Inverse FFT, <i>see</i> FFT
IIR	Infinite impulse response
IP	Internet protocol
IR	Impulse response
ITU	International Telecommunication Union
ITU-T	ITU Telecommunication Standardization Sector, <i>see</i> ITU

— L —

LEM	Loudspeaker/enclosure/microphone
LIN	Local interconnect network
LMS	Least mean squares
LP	Low pass (filter)
LQO	Objective listening quality
LQS	Subjective listening quality

List of Abbreviations

LR	Loudness rating
LS	Loudspeaker
LSD	Log spectral distortion
LTE	Long term evolution

— M —

max	Maximum
mSBC	Modified SBC, <i>see</i> SBC
MAC	Multiply and accumulate
MADI	Multichannel audio digital interface
MCSSFDAF	Multichannel state-space FDAF, <i>see</i> FDAF
MFE	Measurement front end
MIC	Microphone
MMD	Multiple Measurements Descriptor
MO	Measurement object
MOS	Mean opinion score
MRP	Mouth reference point
MMSE	Minimum MSE, <i>see</i> MSE
MSE	Mean squares error

— N —

NA	Noise attenuation
NB	Narrowband (frequency range: 300 Hz to 3.4 kHz)
NELE	Near-end listening enhancement
NLMS	Normalized LMS, <i>see</i> LMS
NLP	Nonlinear processing / processor
NR	Noise reduction
NVH	Noise, vibration, harshness

— O —

OEM	Original equipment manufacturer
OLA	Overlap add
OLS	Overlap save
OV	Overload

— P —

PBX	Private branch exchange
PC	Personal computer
PESQ	Perceptual evaluation of speech quality
PF	Postfilter
PLL	Phase-locked loop
PML	Permitted maximum level
POI	Point of interconnection
POLQA	Perceptual objective listening quality assessment
PS	Perfect sweep

PSD	Power spectral distribution
PSEQ	Perfect sequence

— R —

RCV	Receive
RF	Reference filter
RLR	Receive loudness rating
RLS	Recursive least squares
RMS	Root mean squares
RPM	Revolutions per minute
Rx	Receive direction

— S —

SAEC	Stereo acoustic echo canceler
SBC	Sub band codec
SD-MCSSFDAF	Submatrix-diagonal MCSSFDAF, <i>see</i> MCSSFDAF
seg	Segmental
SER	Signal-to-echo ratio
SF	Shadow filter
SII	Speech intelligibility index
SIP	Session initiation protocol
SLC	Service level connection
SLR	Send loudness rating
SMD	<i>here:</i> Single Measurement Descriptor
SND	Send
SNR	Signal-to-noise ratio
S/PDIF	Sony/Philips Digital Interface
SPL	Sound pressure level
SRC	Sample rate converter
SSR	Solid state relay
ST	Single talk
STI	Speech transmission index
SUT	System under test, <i>see</i> DUT
SWB	Super wideband
SYSDIS	Normalized system distance

— T —

T	Terminal
TCL	Terminal coupling loss
TCLw	Weighted TCL, <i>see</i> TCL
THD	Total harmonic distortion
TOSQA	Telecommunication objective speech quality assessment
Tx	Transmit/send direction

List of Abbreviations

— UVW —

UART	Universal asynchronous receiver/transmitter
UMTS	Universal mobile telecommunications system
USB	Universal serial bus
VAD	Voice activity detection
VD-MCSSFDAF	Variationally-diagonalized MCSSFDAF, <i>see</i> MCSSFDAF
VDA	Verband der Automobilindustrie (German association of automotive industry)
VoIP	Voice over Internet Protocol
WB	Wideband (frequency range: 150 Hz to 7 kHz)

— XYZ —

XLR	(a standardized connector for electrical interconnections), e.g., <i>see</i> AES
-----	---

The absence of trademark or copyright symbols in this work does not imply that no trademark or intellectual property rights have to be considered.

List of Mathematical Symbols

$\cdot x \cdot$	Scalar entity
$\cdot X \cdot$	Frequency-domain or constant entity
$\cdot \mathbf{x} \cdot$	Vector
$\cdot \underline{\mathbf{X}} \cdot$	Matrix
$(\cdot)^*$	Conjugate complex operator
$(\cdot)^T$	Transpose operator
$(\cdot)^H$	Hermitian transpose operator
$(\hat{\cdot})$	Estimated value
$(\tilde{\cdot})$	Decimated value
$(\cdot)'$	Modified parameter / Far-end signal
$(\cdot)^c$	Constrained value
$(\cdot)^+$	Predicted value
$\overline{(\cdot)}$	Smoothed value
$\{\cdot\}$	Full-length signal, i.e., whole audio file
$\ \cdot\ $	Euclidian norm
\circ	Hadamard product
α	Amplifier gain factor
α'	Shadow filter overestimation factor
α_{EQ}	Equalizer offset factor
α_{Ψ^Δ}	Process noise covariance overestimation factor
β	Fader gain factor
γ	Operating point factor
$\delta(n)$	NLMS delta coefficient signal
ε	The smallest possible number, which, if added to the divisor of a fraction, avoids a division by zero on the current computing platform
ζ	Noise threshold
η	Adaptive noise floor
θ	Figure-of-merit argument
ϑ	Relative error
κ_{EQ}	Equalizer gain factor
κ_{PREAMP}	PREAMP gain factor

List of Mathematical Symbols

λ	Smoothing factor
λ_E	ERLE smoothing factor
λ_{EQ}	Equalizer smoothing factor
λ_P	Interpolation smoothing factor
λ_Q	Q-measure smoothing factor
$\lambda_{\hat{W}_2}$	Postfilter update smoothing factor
$\lambda_{\Phi_{ee}}$	Error PSD smoothing factor
λ_{Ψ^s}	Measurement noise covariance smoothing factor
μ	Step size
ν	Sum index
ρ	Perfect sweep sequence stretch factor
σ	Standard deviation
ς	Microphone sensitivity
τ	Time delay
τ_0	Direct path time delay
ω	Rotation speed
Δ	Delta / difference
\varPhi	Azimuth angle
Φ_{ee}	Error signal PSD
Φ_{EQ}	Current equalizer PSD
$\Phi_{EQ,target}$	Target equalizer PSD
Φ_{ss}	Near-end speech signal PSD
$\Phi_{ss,nn}$	Noisy speech signal PSD
$\Phi_{w_r w_r}$	Converge state
Φ_{ww}	Echo path covariance
$a(n)$	Accelerometer signal
b	Passenger position index
$d(n)$	Echo signal
$e(n)$	Error signal
$f(\cdot)$	Arbitrary function
f_c	Cut-off frequency
f_m	Modulation frequency
g	Noise calibration factor
h	Impulse response
i	General index
j	Imaginary unit
k	Frequency bin index
ℓ	Frame index
m	Microphone index

n	Sample index
$n(n)$	Background noise signal
$p(n)$	Time-domain perfect sweep sequence
r	Primary or sagittal channel index, e.g., front or rear
$r(n)$	Residual echo signal
$\tilde{r}(n)$	Residual echo signal (after postfiltering)
s	Secondary or lateral channel index, e.g., left or right
$s(n)$	Speech signal
$\bar{s}(n)$	SIDETONE output signal
t	Time index
$u(n)$	External party speech signal
$x(n)$	Far-end signal
$\bar{x}(n)$	HRTF output signal
$y(n)$	(Virtual) microphone signal
A	Markovian forgetting factor
B	Number of passenger positions
Hann_O	Flat-top Hann window with transition length O
$I(L_n)$	Lombard gain
$\mathbf{E}_{K \times K}$	K-point DFT matrix
K	DFT length
L^-	Shadow filter look-back frames
L_d	Level of signal d at the microphone position
L_n	Level of background noise signal (A weighted)
M	Number of microphone channels
N	Impulse response length
N_h	Impulse response length (ground truth)
N_w	AEC filter length
N_p	Postfilter length
\bar{N}_p	Decimated postfilter length
O	Overlap-add length
P	Perfect sweep sequence length
\mathcal{P}	Perfect sweep sequence
R	Frame shift / block length
T_{60}	Reverberation time (sound pressure level decrease of 60 dB)
U	Full-scale ADC input voltage (differential) of AD1939