

Beiträge aus der Informationstechnik

Marco Gunia

**Analyse und Design verschiedenartiger
Positionierungssysteme, deren Zusammenführung sowie
Vorhersage zukünftiger Positionen und Trajektorien**

 VOGT

Dresden 2023

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

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet
at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2023

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation
„Analyse und Design verschiedenartiger Positionierungssysteme, deren
Zusammenführung sowie Vorhersage zukünftiger Positionen und
Trajektorien“ von Marco Gunia überein.

© Jörg Vogt Verlag 2023
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-068-1

Jörg Vogt Verlag
Niederwaldstr. 36
01277 Dresden
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921
Telefax: +49-(0)351-31403918
e-mail: info@vogtverlag.de
Internet : www.vogtverlag.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Analyse und Design verschiedenartiger Positionierungssysteme, deren Zusammenführung sowie Vorhersage zukünftiger Positionen und Trajektorien

Dipl.-Inf. Dipl.-Ing.
Marco Gunia

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dirk Plettemeier Tag der Einreichung: 02.03.2023
Gutachter: Prof. Dr. sc. techn. Frank Ellinger Tag der Verteidigung: 12.06.2023
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Eckehard Steinbach

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit wird versichert, dass die nachfolgende Dissertation zum Thema

*Analyse und Design verschiedenartiger Positionierungssysteme, deren
Zusammenführung sowie Vorhersage zukünftiger Positionen und
Trajektorien*

einschließlich aller relevanten Erkenntnisse und Resultate, selbstständig und ohne unzulässige Hilfe Dritter erarbeitet wurde. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken und Ergebnisse sind als solche gekennzeichnet. Eine Einreichung zum Zwecke der Promotion wurde bisher weder an der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, noch an einer anderen wissenschaftlichen Einrichtung im Inland oder Ausland in gleicher oder ähnlicher Weise durchgeführt. Des Weiteren fand noch keine Veröffentlichung in der vorliegenden Form statt, jedoch wurden bedeutende Ergebnisse im Rahmen der allgemeinen wissenschaftlichen Tätigkeit als Konferenzbeiträge und Zeitschriftenartikel zeitnah im Vorfeld publiziert. Dies wird zu Beginn der entsprechenden Abschnitte kenntlich gemacht durch einen Hinweis und eine Referenz der Gestalt [*Gun...*] auf die eigenen Veröffentlichungen im Literaturverzeichnis.

Dresden, den 28. August 2023

Marco Gunia

Kurzfassung

Im Gegensatz zu den schnell abrufbaren satellitengestützten Verfahren im Außenbereich stellen Lokalisierungskonzepte im Innenraum Insellösungen dar. Die vorliegende Arbeit präsentiert ein neuartiges Software-Framework zur Integration beliebiger heterogener Positionierungstechnologien, welches unkompliziert auf eine Vielzahl von Problemen angewendet werden kann. Da die Hybridisierung zunächst des Vorhandenseins individueller Ansätze bedarf, widmet sich der Text eingangs ausgewählten Prinzipien zur Ermittlung der Parameter Abstand und Einfallswinkel basierend auf Signalstärke, Signalphase, Signalfrequenz und Signallaufzeit. Neben signaltheoretischen Betrachtungen, welche für die Operabilität der später realisierten Systeme neuartige Ableitungen zum Einfluss von Frequenzabweichungen enthalten, werden innovative Klassifikationstechniken zur Messwertcharakterisierung vorgeschlagen. Aufbauend auf der Verfügbarkeit erwähnter Parameter thematisiert die Arbeit sodann mannigfaltige Positionierungstechniken, wobei die Ableitung ihrer statistischen Eigenschaften gelingt. Sowohl die individuellen Varianten als auch das hybride System werden nach dem Entwurf umfassend analysiert, wahlweise anhand der Rohdaten oder unter Ausnutzung ihrer zeitlichen Korrelation. Mittels der Methoden des maschinellen Lernens gelingt schlussendlich die Vorhersage der bevorstehenden vollständigen Trajektorie einer Person bei Einbeziehung weniger anfänglicher Positionsvektoren.

Abstract

In contrast to the outdoor environment with its quickly retrievable satellite-based methods, indoor localisation concepts are isolated solutions. This work presents a novel software framework for the integration of arbitrary heterogeneous positioning technologies, which can be easily applied to a variety of problems. However, hybridisation first requires the existence of the individual approaches. For this reason, the text is initially devoted to selected principles for determining the parameters of distance and angle of incidence based on signal strength, signal phase, signal frequency and signal propagation time. Besides signal-theoretical considerations, which contain novel derivations for the operability of the later realised systems on the influence of frequency deviations, innovative classification techniques for the characterisation of measured values are proposed. Based on the availability of the mentioned parameters, the work then discusses various positioning techniques, whereby the derivation of their statistical properties is carried out. Both the individual variants and the hybrid system are comprehensively analysed after the design, either using raw data or exploiting their temporal correlation. Finally, using machine learning methods, the prediction of a person's upcoming full trajectory is achieved by only applying a few initial position vectors.

Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt all den Menschen, die mich auf dem langen Weg zur Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Besonders möchte ich Herrn Prof. Dr. sc. techn. habil. Dipl. Betriebswissenschaftler Frank Ellinger für die Möglichkeit der konzentrierten und unabhängigen Forschung an seinem Lehrstuhl sowie für sein Vertrauen in meine Arbeit und seine allgemeine Unterstützung danken. Mein spezieller Dank gilt meinen ehemaligen Gruppenleiter Herrn Dr.-Ing. Niko Joram für die unzähligen wertvollen fachlichen Diskussionen sowie die Beratung in allen administrativen Belangen. Herrn Dipl.-Ing. Florian Protze danke ich für die vielen Anregungen im analogen und digitalen Schaltungsentwurf sowie bei der Leiterplattenherstellung. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Udo Jörges und Herrn Dr.-Ing. Stefan Schumann meine Anerkennung für das Gegenlesen der vierzehn im Rahmen der Dissertation durchgeführten studentischen Arbeiten ausdrücken. Auch möchte ich hier alle weiteren Mitarbeiter des Lehrstuhls für Schaltungstechnik und Netzwerktheorie erwähnen, insbesondere Frau Katharina Isaack, die bei verwaltungstechnischen Fragestellungen eine wertvolle Hilfe war, sowie Herrn Dr.-Ing. Belal Al-Qudsi hinsichtlich der Beratung zu alternativen am Lehrstuhl implementierten Positionierungssystemen.

Bedanken möchte ich mich darüber hinaus bei Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer G. Spallek, der in mir die Begeisterung für wissenschaftliche Arbeit geweckt hat und mir die Gelegenheit gegeben hat mein Zweitstudium abzuschließen.

Mein Dank wäre sehr unvollständig, wenn er nicht meine Familie und meine Freunden einbeziehen würde, die mir während der Erstellung dieser Arbeit mit Rat und viel Verständnis entgegengetreten sind. Hier möchte ich ganz besonders meiner Freundin Dipl.-Lebensmittelchemikerin Frau Isabel Weiß (staatl. gepr.) würdigen, die mich auf dem ganzen Weg begleitet hat, sich die Schilderungen aller großen und kleineren Probleme anhören musste und mir unzählige Male die Motivation und Kraft gegeben hat, kontinuierlich an der Aufgabe weiterzuarbeiten.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	17
Symbolverzeichnis	21
1. Einleitung	29
2. Grundlagen der Stochastik und Statistik	35
2.1. Univariate Zufallsvariablen	35
2.1.1. Wahrscheinlichkeitsraum, Zufallsvariable und Verteilungsfunktion	35
2.1.2. Erwartungswert, Varianz und Kovarianz für diskrete und kontinuierliche Zufallsvariablen	37
2.1.3. Momente	40
2.1.4. Ausgewählte Verteilungsfunktionen	41
2.2. Multivariate Zufallsvariablen	43
2.2.1. Zufallsvektor, Zufallsmatrix und Verteilungsfunktion	43
2.2.2. Erwartungswert und Kovarianz für diskrete und kontinuierliche multivariate Zufallsvariablen	45
2.2.3. Unabhängigkeit	47
2.2.4. Momente	49
2.2.5. Ausgewählte Verteilungsfunktionen	49
2.3. Stichprobenerhebung	50
2.3.1. Grundgesamtheit und Stichprobe	51
2.3.2. Statistik und Stichprobenmomente	51
2.4. Parameterschätzung	53
2.4.1. Stichproben Erwartungswert und Varianz	53
2.4.2. Maximum-Likelihood-Schätzung	53
2.4.3. Cramér-Rao Schranke	53
3. Grundlagen der drahtlosen Hochfrequenz-Lokalisierung	57
3.1. Begriffsbildung	57
3.2. Klassifikationen	58
3.3. Fehlermetriken	59
3.3.1. Einzelfehler	61
3.3.2. Wiederholte Durchführung	61
4. Abstands- und Winkelbestimmung	65
4.1. Messung der Signalstärke zur Bestimmung des Abstandes	65
4.1.1. Grundprinzip	66

4.1.2.	Algorithmus	67
4.1.3.	Artverwandte Arbeiten	68
4.2.	Messung der Signalphase zur Bestimmung des Abstandes	69
4.2.1.	Grundprinzip	69
4.2.2.	Algorithmen	82
4.2.3.	Verwendung multipler Einzelmessungen	85
4.2.4.	Artverwandte Arbeiten	88
4.3.	Messung der Signallaufzeit zur Bestimmung des Abstandes	89
4.3.1.	Grundprinzip	89
4.3.2.	Algorithmen	95
4.3.3.	Verwendung multipler Einzelmessungen	96
4.3.4.	Artverwandte Arbeiten	96
4.4.	Messung der Signalphasen zur Bestimmung des einfallenden Winkels	97
4.4.1.	Grundprinzip	97
4.4.2.	Algorithmen	102
4.4.3.	Winkelschätzung anhand des Spektrums unter Verwendung multipler Einzelmessungen	108
4.4.4.	Artverwandte Arbeiten	114
5.	Positionierung	121
5.1.	Geometrische Ansätze	121
5.2.	Verwendung der Signallaufzeit: Time of Arrival	124
5.2.1.	Direkte Berechnung: Trilateration	124
5.2.2.	Iterativer Ansatz	127
5.2.3.	Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate	127
5.2.4.	Gewichteter Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate	129
5.2.5.	Gewichteter iterativer Ansatz	132
5.2.6.	Maximum-Likelihood-Verfahren	135
5.2.7.	Cramér-Rao-Schranke	137
5.2.8.	Weitere Ansätze	139
5.3.	Verwendung der Differenzen der Signallaufzeiten: Time Difference of Arrival	139
5.3.1.	Direkte Berechnung	140
5.3.2.	Iterativer Ansatz	141
5.3.3.	Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate	141
5.3.4.	Gewichteter Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate	142
5.3.5.	Gewichteter iterativer Ansatz	144
5.3.6.	Maximum-Likelihood-Verfahren	146
5.3.7.	Cramér-Rao-Schranke	148
5.3.8.	Weitere Ansätze	149
5.4.	Verwendung der Signalstärke: Received Signal Strength	149
5.4.1.	Gewichteter Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate	150
5.4.2.	Gewichteter iterativer Ansatz	151
5.4.3.	Maximum-Likelihood-Verfahren	152
5.4.4.	Cramér-Rao-Schranke	155
5.4.5.	Weitere Ansätze	155

5.5.	Verwendung des Einfallswinkels: Angle of Arrival	156
5.5.1.	Direkter Ansatz: Triangulation	156
5.5.2.	Iterativer Ansatz	158
5.5.3.	Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate	158
5.5.4.	Gewichteter Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate . .	159
5.5.5.	Gewichteter iterativer Ansatz	160
5.5.6.	Maximum-Likelihood-Verfahren	161
5.5.7.	Cramér-Rao-Schranke	163
5.5.8.	Weitere Ansätze	164
5.6.	Gegenüberstellung anhand der Cramér-Rao-Schranken . . .	165
6.	Nachverfolgung und Sensorfusion	169
6.1.	Kalman-Filter	169
6.2.	Alternative Ansätze	171
7.	Generisches Framework für die hybride Positionierung	175
7.1.	Problemstellung	175
7.2.	Methodik	176
7.3.	Entwurfsmuster	177
7.3.1.	Strategie-Entwurfsmuster	178
7.3.2.	Kompositum-Entwurfsmuster	178
7.3.3.	Beobachter-Entwurfsmuster	178
7.3.4.	Extension Object-Entwurfsmuster	180
7.4.	Design des Frameworks	180
7.5.	Test des Frameworks	183
7.6.	Artverwandte Arbeiten	185
8.	System Design der Einzelsysteme	189
8.1.	Messung der WLAN-Signalstärke zur Bestimmung des Abstandes	189
8.1.1.	Hardware	189
8.1.2.	Software Design	190
8.2.	Messung der Bluetooth-Signalstärke zur Bestimmung des Abstandes	191
8.2.1.	Hardware Design	191
8.2.2.	Software Design	193
8.3.	Messung der ZigBee-Signallphase zur Bestimmung des Abstandes	194
8.3.1.	Hardware Design	194
8.3.2.	Firmware Design	197
8.3.3.	Software Design	198
8.4.	Messung der UWB-Signallaufzeit zur Bestimmung des Abstandes	201
8.4.1.	Hardware Design	201
8.4.2.	Firmware Design	202
8.4.3.	Software Design	202

- 8.5. Messung der ZigBee-Signalphase zur Bestimmung des einfallenden Winkels 204
 - 8.5.1. Spezifikation der Systemparameter 204
 - 8.5.2. Hardware Design 209
 - 8.5.3. Firmware Design 211
 - 8.5.4. Software Design 213

- 9. Messergebnisse der Einzelsysteme 217**
 - 9.1. Messung der WLAN-Signalstärke zur Bestimmung des Abstandes 217
 - 9.1.1. Außenbereich 217
 - 9.1.2. Innenraum 219
 - 9.1.3. Diskussion 221
 - 9.2. Messung der Bluetooth-Signalstärke zur Bestimmung des Abstandes 230
 - 9.2.1. Außenbereich 230
 - 9.2.2. Innenraum 231
 - 9.2.3. Diskussion 232
 - 9.3. Messung der ZigBee-Signalphase zur Bestimmung des Abstandes 240
 - 9.3.1. Außenbereich 240
 - 9.3.2. Innenraum 241
 - 9.3.3. Diskussion 245
 - 9.4. Messung der UWB-Signallaufzeit zur Bestimmung des Abstandes 258
 - 9.4.1. Außenbereich 258
 - 9.4.2. Innenraum 260
 - 9.4.3. Diskussion 262
 - 9.4.4. Ausblick für die Verwendung der Differenzen der Signallaufzeiten 272
 - 9.5. Messung der ZigBee-Signalphase zur Bestimmung des einfallenden Winkels 274
 - 9.5.1. Außenbereich 274
 - 9.5.2. Innenraum 276
 - 9.5.3. Diskussion 278

- 10. Heterogenes Gesamtsystem 291**
 - 10.1. Design des Gesamtsystems 291
 - 10.2. Messergebnisse 294

- 11. Trajektorie-Vorhersage 307**
 - 11.1. Langes Kurzzeitgedächtnis (LSTM) 307
 - 11.1.1. Neuronale Netzwerke 307
 - 11.1.2. LSTM als rückgekoppeltes neuronales Netzwerk 310
 - 11.2. Framework des maschinellen Lernens 312
 - 11.3. Messergebnisse 313

12. Zusammenfassung und Ausblick	319
Abbildungsverzeichnis	323
Tabellenverzeichnis	329
Literaturverzeichnis	331
Veröffentlichungen des Autors	351
Konferenz-Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation	351
Journal-Veröffentlichungen im Rahmen der Dissertation	352
Weitere Veröffentlichungen	353
A. MuSiC	355
A.1. Komplexe Zufallsvariablen und Zufallsvektoren	355
A.2. Struktur der Rauschkovarianzmatrix für MuSiC	355
A.3. Struktur der rauschfreien Kovarianzmatrix für MuSiC	356
A.4. Struktur der rauschfreien Stichprobenkovarianzmatrix für MuSiC	358
A.5. Struktur der rauschbehafteten Kovarianzmatrix für MuSiC	360
B. Positionierung	361
B.1. Hyperbelgleichung	361
B.2. Verwendung der Signallaufzeit: Time of Arrival	363
B.2.1. Gewichteter iterativer Ansatz Weighted Circular	363
B.3. Verwendung der Signalstärke: Received Signal Strength	364
B.3.1. Gewichteter iterativer Ansatz Weighted Circular	364
B.4. Verwendung der Signallaufzeit und der Signalstärke	365
B.4.1. Cramér-Rao-Schranke	365
B.5. Verwendung der Differenzen der Signallaufzeit und der Signalstärke	367
B.5.1. Cramér-Rao-Schranke	367
C. Lebenslauf	371

Abkürzungsverzeichnis

ACM	Association of Computer Machinery.
ADC	Analog-Digital-Umsetzer (engl.: Analog to Digital Converter).
AoA	Einfallswinkel (engl.: Angle of Arrival).
AWGN	Additives weißes Gaußsches Rauschen (engl.: Additive White Gaussian Noise).
BGA	Kugelgitteranordnung (engl.: Ball Grid Array).
BS	Basisstation (engl.: Base Station).
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor.
COTS	Kommerziell verfügbare Produkte (engl.: Commercial-Off-The-Shelf).
CPU	Prozessor (engl.: Central Processing Unit).
CRC	Zyklische Redundanzprüfung (engl.: Cyclic Redundancy Check).
CRLB	Cramér-Rao-Schranke (engl.: Cramér-Rao-Lower-Bound).
CS	Kalibrierstation (engl.: Calibrator Station).
CSI	Channel State Information.
DR	Koppelnavigation (engl.: Dead Reckoning).
DVB	Digitaler Videorundfunk (engl.: Digital Video Broadcasting).
EKF	Extended Kalman-Filter.
FFT	Schnelle Fouriertransformation (engl.: Fast Fourier Transform).
FIFO	First In - First Out.
FMCW	Frequenz modulierter Dauerstrich (engl.: Frequency Modulated Continous Wave).
FPGA	Field Programmable Gate Array.
FT	Fouriertransformation (engl.: Fourier Transform).
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem (engl.: Global Navigation Satellite System).
GPIO	Allzweckeingabe/-ausgabe (engl.: General Purpose Input Output).
GPS	Globales Positionsbestimmungssystem (engl.: Global Positioning System).
GPU	Graphikprozessor (engl.: Graphics Processing Unit).
GSM	Global System for Mobile Communications.
HF	Hochfrequenz.
I²C	Inter-Integrated Circuit.

IC	Integrierter Schaltkreis (engl.: Integrated Circuit).
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
INS	Inertialnavigationssystem (engl.: Inertial Navigation System).
IoT	Internet der Dinge (engl.: Internet of Things).
IR	Pulsgesteuerte Funkwellenübertragung (engl.: Impulse Radio).
ISM	Industriell, wissenschaftlich und medizinisch (engl.: Industrial, Scientific and Medical).
JDL	Joint Directors of Laboratories.
LED	Leuchtdiode (engl.: Light-Emitting Diode).
LNA	Rauscharmer Verstärker (engl.: Low Noise Amplifier).
LoRa	Long Range.
LoS	Sichtlinie (engl.: Line of Sight).
LSTM	Langes Kurzzeitgedächtnis (engl.: Long Short Term Memory Cell).
LTE	Long Term Evolution.
LVDS	Low Voltage Differential Signaling.
MAC	Media Access Control.
MCU	Mikrokontroller (engl.: Micro-Controller Unit).
MOSFET	Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor (engl.: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor).
MS	Mobile Station (engl.: Mobile Station).
MuSiC	Klassifikation multipler Signale (engl.: Multiple Signal Classification).
NIC	Netzwerkkarte (engl.: Network Interface Card).
NLoS	Nicht-Sichtlinie (engl.: Non Line of Sight).
OpAmp	Operationsverstärker (engl.: Operational Amplifier).
PA	Leistungsverstärker (engl.: Power Amplifier).
PCB	Leiterplatte (engl.: Printed Circuit Board).
PHR	Physical layer HeadeR.
PLL	Phasenregelschleife (engl.: Phase-Locked Loop).
PMU	Phasenmessenheit (engl.: Phase Measurement Unit).
PSDU	Physical layer Service Data Unit.
RADAR	Funkgestützte Richtungs- und Abstandsmessung (engl.: Radio Direction And Ranging).
RFID	Radio-Frequency IDentification.
RNN	Rückgekoppelte neuronale Netze (engl.: Recurrent Neural Network).
RSS	Empfangssignalstärke (engl.: Received Signal Strength).
SDR	Software-Defined Radio.
SHR	Synchronization HeadeR.
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (engl.: Signal-to-Noise Ratio).
SPI	Serial Peripheral Interface.
SRAM	Statischer Speicher mit wahlfreiem Zugriff (engl.: Static Random Access Memory).

SSID	Netzwerkennung (engl.: Service Set Identifier).
TDoA	Differenzen der Signallaufzeiten / Ankunftszeiten (engl.: Time Difference of Arrival).
ToA	Signallaufzeit / Ankunftszeit (engl.: Time of Arrival).
TS	Totalstation (engl.: Total Station).
TV	TeleVision.
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter.
UKF	Unscented Kalman-Filter.
ULA	Gleichförmige lineare Anordnung (engl.: Uniform Linear Array).
UML	Vereinheitlichte Modellierungssprache (engl.: Unified Modeling Language).
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System.
USB	Universal Serial Bus.
UWB	Ultra-Breitband (engl.: Ultra-WideBand).
VCO	Spannungsgesteuerter Oszillator (engl.: Voltage Controlled Oscillator).
WAN	Wide Area Network.
WLAN	Wireless Local Area Network.

Symbolverzeichnis

Konstanten und Mengen

Symbol	Beschreibung
c	Lichtgeschwindigkeit
E	Einheitsmatrix
e	Eulersche Zahl
i	Imaginäre Einheit
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
π	Kreiszahl Pi
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen

Deterministische Operatoren

Symbol	Beschreibung
$\Psi(\cdot)$	Autokorrelationsfunktion
$\hat{\cdot}$	Fehlerwert der Größe
\cdot	Einhüllende eines Signals
$\mathcal{F}(\cdot)$	FFT
$[\cdot]$	Ganzzahl der Größe
\cdot^H	Adjungierte Matrix
\uparrow	Erhöhung
$\Im(\cdot)$	Imaginäre Komponenten eines komplexen Skalars, Vektors oder Matrix
$\text{rang}(\cdot)$	Rang einer Matrix
$\Re(\cdot)$	Reelle Komponenten eines komplexen Skalars, Vektors oder Matrix
\cdot^T	Transponierte Matrix
$\bar{\cdot}$	Wahrer Wert der Größe

Statistische und stochastische Operatoren

Symbol	Beschreibung
$\text{Cov}\{\cdot, \cdot\}$	Kovarianz zweier Zufallsvariable
$\text{COV}\{\cdot\}$	Kovarianz eines Zufallsvektors
$\widehat{\text{COV}}\{\cdot\}$	Geschätzte Kovarianz eines Zufallsvektors
$\mathbf{E}\{\cdot\}$	Erwartungswert eines Zufallsvektors
$\mathbb{E}\{\cdot\}$	Erwartungswert einer Zufallsvariable
$\tilde{S}^2\{\cdot\}$	Stichprobenvarianz
$\text{VAR}\{\cdot\}$	Varianz eines Zufallsvektors
$\text{var}\{\cdot\}$	Varianz einer Zufallsvariable

Statistische und stochastische Variablen

Symbol	Beschreibung
A, A'	Mengen
\mathbb{A}	σ -Algebra
\tilde{f}	Einzelfehler
$F_{\tilde{x}}(\mathbf{x})$	Verteilungsfunktion einer multivariaten Zufallsvariable \tilde{x}

Symbolverzeichnis

$f_{\vec{x}}(x)$	Verteilungsdichtefunktion einer multivariaten Zufallsvariable \vec{x}
$F_{\vec{x}}(x)$	Verteilungsfunktion einer univariaten Zufallsvariable \vec{x}
$f_{\vec{x}}(x)$	Verteilungsdichtefunktion einer univariaten Zufallsvariable \vec{x}
$F(\theta)$	Fisher-Information
$F(\theta)$	Fisher-Information
$G(\cdot)$	Abbildung von $D \subseteq \mathbb{R}^K \rightarrow \mathbb{R}^{N \times M}$ mit $K, N, M \in \mathbb{N}$
$g(\cdot)$	Abbildung von $D \subseteq \mathbb{R}^K \rightarrow \mathbb{R}$ mit $K \in \mathbb{N}$
$I_{(0, \infty)}(x)$	Indikatorfunktion der offenen Menge $(0, \infty) \subseteq \mathbb{R}$
$L(\cdot)$	Likelihood-Funktion
${}^S \hat{m}$	Schätzwert der Messgröße m
m	Wahrer Wert der Messgröße m
$m_{\vec{x}}(t)$	Momentenerzeugende Funktion der Zufallsvariable \vec{x}
M_r	Stichprobenmoment der Ordnung r einer Zufallsvariable
μ_r	Moment der Ordnung r einer Zufallsvariable
$N(\mu, \sigma^2)$	Normalverteilung mit Erwartungswert μ und Varianz σ^2
N_r	Stichprobenmoment der Ordnung r einer Zufallsvariable den Stichprobenmittelwert
Ω	Ergebnisraum
ω	Element des Ergebnisraums
P	Wahrscheinlichkeitsmaß
σ_r	Zentralmoment der Ordnung r einer Zufallsvariable
$\tau(\theta)$	Zu schätzender Wert der Funktion $\tau(\cdot)$ des unbekanntem Parameters $\theta \in \mathbb{R}$
$\tau(\theta)$	Zu schätzender Wert der Funktion $\tau(\cdot)$ des unbekanntem Parameters $\theta \in \mathbb{R}^D$ mit $D \in \mathbb{N}$
\bar{x}	Stichprobenmittelwert einer Zufallsvariable \vec{x}
\tilde{X}	Zufallsmatrix
\vec{x}	Multivariate Zufallsvariable; Zufallsvektor
\tilde{x}	Univariate Zufallsvariable
\tilde{y}	Univariate Zufallsvariable

Variablen/Signale für Abstands- und Winkelmessung

Symbol	Beschreibung
\underline{A}	Steuermatrix für MuSiC
A	Station A
$a_{S_m; E_1 \rightarrow E_n}(\alpha_{\triangleleft \bullet})$	Element der Steuermatrix für MuSiC in Zeile n und Spalte m
A	Parameter A des Log-Normal-Modells für die Empfangsleistung
a	Antennenabstand
$A_{bb, \square}(t)$	Amplitude des Basisbandsignals am Sender S
$A_{hf, \square}(t)$	Amplitude des Hochfrequenzsignals am Sender S
$A_{lo, \square}(t)$	Amplitude des lokalen Oszillators am Sender S
α	Wahrer Winkel
$\alpha_{\triangleleft \bullet}$	Wahrer Winkel zwischen MS und BS bestimmt vermittels Phasenmessung
${}^S \hat{\alpha}$	Schätzwert des Winkels
${}^S \hat{\alpha}_{\triangleleft \bullet}$	Geschätzter Winkel zwischen MS und BS bestimmt vermittels Phasenmessung
A_{Mantel}	Mantelfläche einer Kugel
$A_{w, \square}$	Wirksame Antennenfläche des Empfängers E
B	Station B
b_i	Breite des i -ten lokalen Maximum im Spektrum zur Berechnung der Relevanz
${}^S \hat{d}$	Schätzwert des Abstands
d	Wahrer Abstand
D_{\square}	Direktivität der Sendeantenne
$d_{\triangleleft \bullet}$	Wahrer Abstand zwischen MS und BS bestimmt vermittels Phasenmessung

d_{\bullet}	Wahrer Abstand zwischen MS und BS bestimmt vermittelt Signalstärkemessung
$S_{\text{hf},S \rightarrow \mathbb{E}}$	Empfangsleistungsdichte im Fernfeld am Empfänger E
δ	Winkel
Δd	Zusätzliche Signalstrecke
$\Delta \phi_{n,A \rightarrow \mathbb{E}}$	Phasendifferenz zw. n-ten empf. Signal des Senders A und lok. Referenz am Empfänger B
$\Delta \phi_{n,B \rightarrow \mathbb{A}}$	Phasendifferenz zw. n-ten empf. Signal des Senders B und lok. Referenz am Empfänger A
$\Delta \phi_{n,S \rightarrow \mathbb{E}}$	Phasendifferenz zw. n-ten empf. Signal des Senders S und lok. Referenz am Empfänger E
$\Delta \phi_{S \rightarrow \mathbb{E}_n}$	Phasendifferenz zw. empf. Sendesignal von Sender S und n-ter Antenne des Empfängers E
$\Delta t_{\text{empfang}}$	Dauer des Empfangsintervalls
$\Delta \Theta_{n,A \leftrightarrow B}$	Summe der Phasendifferenzen $\Delta \phi_{n,A \rightarrow \mathbb{E}}$ und $\Delta \phi_{n,B \rightarrow \mathbb{A}}$
$\Delta t_{\text{laufzeit}}$	Laufzeit einer Nachricht
Δt_{schutz}	Dauer des Schutzzeitintervalls
$\Delta t_{\text{se},1 \leftrightarrow 2}$	Zeitdifferenz des Empfangs der ersten und zweiten Frequenz an der gleichen Station
$\Delta t_{\text{se},A \leftrightarrow B}$	Zeitdifferenz des Starts des Empfangs zwischen Stationen A und B
Δt_{sende}	Dauer des Sendintervalls
Δt_{sync}	Zeitlicher Synchronisationsfehler
$\Delta t_{\text{wechsel},\mathbb{A},n \leftrightarrow m}$	Zeitspanne zw. Senden n-ter Nachricht und Empfangen von m-ter Nachricht für Station A
$\Delta t_{\text{wechsel},\mathbb{B},n \leftrightarrow m}$	Zeitspanne zw. Empfangen n-ter Nachricht und Senden von m-ter Nachricht für Station B
$d_{\mathbb{P},\bullet,\text{error}}$	Distanzfehler vermittelt Phasenmessung für Fehlerrechnung
$d_{\mathbb{P},\bullet,\text{id}}$	Idealer Abstand ohne Messfehler vermittelt Phasenmessung für Fehlerrechnung
$d_{\mathbb{P},\bullet,\text{max}}$	Maximal erfassbarer Abstand bestimmt vermittelt Phasenmessung
E	Empfänger E
E_n	n-te Antenne des Empfängers E
η	Parameter η des Log-Normal-Modells für die Empfangsleistung
$\eta_{\mathbb{E}}$	Antennenwirkungsgrad des Senders S
$f_{\text{hf},\mathbb{E}}$	Frequenz des Hochfrequenzsignals erzeugt an Station S
\tilde{f}_{α}	Einzelfehler des Winkels
$f_{\text{bb},S \rightarrow \mathbb{E}}$	Frequenz des Basisbandsignals am Empfänger E
$f_{\text{bb},\mathbb{S}}$	Frequenz des Basisbandsignals am Sender S
$f_{\text{bb},n,\mathbb{S}}$	Frequenz des n-ten Basisbandsignals am Sender S
\tilde{f}_d	Einzelfehler des Abstands
$\hat{f}_{\text{lo},\Delta}$	Differenz der Fehler der lokalen Oszillatoren
$\hat{f}_{\text{lo},\Sigma}$	Summe der Fehler der lokalen Oszillatoren
$f_{\text{hf},n,\mathbb{A}}$	Frequenz des n-ten sinusförmigen Sendesignals für Station A
$f_{\text{hf},n,\mathbb{B}}$	Frequenz des n-ten sinusförmigen Sendesignals für Station B
$f_{\text{hf},n,\mathbb{E}}$	Frequenz des n-ten sinusförmigen Sendesignals für Empfänger E
$f_{\text{hf},n,\mathbb{S}}$	Frequenz des n-ten sinusförmigen Sendesignals für Sender S
$f_{\text{hf},\mathbb{S}}$	Frequenz des Hochfrequenzsignals am Sender S
$f_{\text{hf},\mathbb{S}_m}$	Frequenz des m-ten Senders S_m
$\omega_{\text{hf},\mathbb{S}_m}$	Kreisfrequenz des m-ten Senders S_m
$f_{\text{lo},\mathbb{E}}$	Frequenz des lokalen Oszillators am Empfänger E
$f_{\text{lo},\mathbb{E}_n}$	Frequenz des lokalen Oszillators an n-ter Antenne des Empfängers E
$f_{\text{lo},\mathbb{S}}$	Frequenz des lokalen Oszillators am Sender S
f_{osz}	Frequenz des Oszillators der Phasenregelschleife
$f_{\text{ref},\mathbb{E}}$	Frequenz des Referenzsignals am Empfänger E
$f_{\text{ref},\mathbb{E}_n}$	Frequenz des Referenzsignals an n-ter Antenne des Empfängers E

$f_{\text{takt},\mathbb{A}}$	Taktsignal der Station A
$f_{\text{takt},\mathbb{B}}$	Taktsignal der Station B
$f_{\text{zf},\mathbb{E}}$	Frequenz des Zwischenfrequenzsignals am Empfänger E
$G_{\mathbb{S}}$	Antennengewinn des Senders S
$\lambda_{\text{hf},\mathbb{S}}$	Wellenlänge des Hochfrequenzsignals erzeugt an Station S
λ_m	m-ter Eigenwert für MuSiC
$\tilde{n}_{\text{hf},\mathbb{E}_n}(t)$	Rauschen an n-ter Antenne für MuSiC
$\tilde{\mathbf{n}}_{\text{hf},\mathbb{E}} := \tilde{\mathbf{n}}_{\text{hf},\mathbb{E}}(t)$	Rauschvektor für alle N Antennen für MuSiC
$P(\alpha_{\leftarrow \bullet})$	Pseudospektrum für MuSiC
p_i	i-te Prominenz
$\hat{P}_{\mathbf{S},\bullet}$	Gemessener Pegel der empfangenen Sendeleistung
$P_{\mathbf{S},\bullet}$	Wahrer Pegel der empfangenen Sendeleistung
$P_{\text{hf},\mathbb{S} \rightarrow \mathbb{E}}$	Emittierte Sendeleistung des Senders S
$P_{\text{hf},\mathbb{S} \rightarrow \mathbb{E}}$	Empfangene Sendeleistung des Senders S am Empfänger E
$P_{\text{hf},\mathbb{S} \rightarrow \mathbb{E}}^{\text{dB}}$	Pegel der empfangenen Sendeleistung des Senders S am Empfänger E
$\varphi_{\text{bb},\mathbb{A}}$	Phase des Basisbandsignals an Station A
$\varphi_{\text{bb},\mathbb{B}}$	Phase des Basisbandsignals an Station B
$\varphi_{\text{bb},\mathbb{S}}$	Phase des Basisbandsignals am Sender S
$\varphi_{\text{hf},\mathbb{S}}$	Phase des Hochfrequenzsignals am Sender S
$\varphi_{\text{hf},\mathbb{S}_m}$	Phase des Hochfrequenzsignals des m-ten Senders S_m
$\varphi_{\text{lo},\mathbb{A}}$	Phase des lokalen Oszillators an Station A
$\varphi_{\text{lo},n,\mathbb{A}}$	Phase des lokalen Oszillators an Station A beim Empfang des n-ten Sendesignals
$\varphi_{\text{lo},\mathbb{B}}$	Phase des lokalen Oszillators an Station B
$\varphi_{\text{lo},n,\mathbb{B}}$	Phase des lokalen Oszillators an Station B beim Empfang des n-ten Sendesignals
$\varphi_{\text{lo},\mathbb{E}}$	Phase des lokalen Oszillators am Empfänger E
$\varphi_{\text{lo},n,\mathbb{E}}$	Phase des lokalen Oszillators am Empfänger E beim Empfang des n-ten Sendesignals
$\varphi_{\text{lo},\mathbb{E}_n}$	Phase des lokalen Oszillators an n-ter Antenne des Empfängers E
$\varphi_{\text{lo},\mathbb{S}}$	Phase des lokalen Oszillators am Sender S
φ_{Offset}	Phasen-Offset
$\varphi_{\text{ref},\mathbb{A}}$	Phase des Referenzsignals an Station A
$\varphi_{\text{ref},\mathbb{B}}$	Phase des Referenzsignals an Station B
$\varphi_{\text{ref},\mathbb{E}}$	Phase des Referenzsignals am Empfänger E
$\varphi_{\text{ref},\mathbb{E}_n}$	Phase des Referenzsignals an n-ter Antenne des Empfängers E
\hat{P}_{RX}	Empfangene Sendeleistung
$P_{\mathbb{S}}$	Insgesamt aufgewendete Leistung am Sender S
P	Signalleistung
P_0	Maximale Signalleistung
$P_{\text{v},\mathbb{S}}$	Ohmsche Verluste in Antenne und Zuleitungen sowie Fehlanpassungen am Sender S
$Q_{\text{b},i}$	Breitenbasiertes Maß zum i-ten lok. Max. im Spektrum zur Berechnung der Relevanz
$Q_{\text{h},i}$	Höhenbasiertes Maß zum i-ten lok. Max. im Spektrum zur Berechnung der Relevanz
$\rho_{\text{hf},\mathbb{A}}$	Phase des Hochfrequenzsignals an Station A
$\rho_{\text{hf},n,\mathbb{A}}$	Phase des n-ten Hochfrequenzsignals an Station A
$\rho_{\text{hf},\mathbb{B}}$	Phase des Hochfrequenzsignals an Station B
$\rho_{\text{hf},n,\mathbb{B}}$	Phase des n-ten Hochfrequenzsignals an Station B
$\rho_{\text{hf},\mathbb{S}}$	Phase des Hochfrequenzsignals am Sender S
$\rho_{\text{hf},n,\mathbb{S}}$	Phase des n-ten Hochfrequenzsignals am Sender S

R_i	Relevanz zum i -ten lok. Max. im Spektrum zur Berechnung der Relevanz
S	Sender s
$s_{bb,s \rightarrow E}(t)$	Basisbandsignal am Empfänger E
$s_{bb,n,s \rightarrow E}(t)$	Basisbandsignal zur n -ten Sendefrequenz am Empfänger E
$s_{bb,S}(t)$	Basisbandsignal am Sender s
$\tilde{\mathbf{s}}_{hf,E} := \tilde{\mathbf{s}}_{hf,E}(t)$	Signalvektor für alle N Antennen für MuSiC
$\tilde{\mathbf{S}}_{hf,E}(t_1, \dots, t_D)$	Signalmatrix für MuSiC
$s_{hf,A \rightarrow E}(t)$	Hochfrequenzsignal ausgehend von Station A an Station B
$s_{hf,B \rightarrow A}(t)$	Hochfrequenzsignal ausgehend von Station B an Station A
$s_{hf,s \rightarrow E}(t)$	Hochfrequenzsignal ausgehend von Sender s am Empfänger E
$s_{hf,S \rightarrow E}(t)$	Hochfrequenzsignal am Sender s
$S_{hf,s \rightarrow E,Kugel}$	Leistungsdichte eines Kugelstrahlers am Empfänger E
$S_{hf,s \rightarrow E,max}$	Maximal emittierte Leistungsdichte einer Antenne in Richtung des Empfängers E
$\tilde{s}_{hf,S_m}(t)$	Einhüllende des Hochfrequenzsignal des m -ten Senders S_m
$s_{hf,S_m \rightarrow E}(t)$	Hochfrequenzsignal des m -ten Senders S_m
$s_{hf,S_m \rightarrow E_n}(t)$	Hochfrequenzsignal des m -ten Senders S_m empfangen an n -ter Antenne des Empfängers E
$s_{lo,E_n}(t)$	Lokales Oszillatorsignal an n -ter Antenne des Empfängers E
$s_{lo,E}(t)$	Lokales Oszillatorsignal am Empfänger E
$s_{lo,S}(t)$	Lokales Oszillatorsignal am Sender s
S_m	m -ter Sender S_m
$s_{ref,E}(t)$	Referenzsignal am Empfänger E
$s_{ref,E_n}(t)$	Referenzsignal an n -ter Antenne des Empfängers E
$s_{zf,s \rightarrow E}(t)$	Zwischenfrequenzsignal am Empfänger E
$s_{zf,S \rightarrow E}(t)$	Zwischenfrequenzsignal am Sender s
$t_{anf,A \rightarrow B}$	Zeitpunkt zur Initiierung der Abstandsmessung durch Station A
$t_{anf,A \rightarrow E}$	Zeitpunkt des Empfangs der Initiierung der Abstandsmessung durch Station B
$t_{bes,E \rightarrow A}$	Zeitpunkt des Bestätigens der Anforderung der Abstandsmessung durch Station B
t_{breite}	Parameter für breitenbas. Maß zum i -ten lok. Max. im Spektrum zur Berechn. der Relevanz
t_{gruppe}	Konfigurierbarer Schwellwert fürs Gruppieren
$t_{komm,A \rightarrow B}$	Zeitpunkt des Sendens der Kommunikationsnachricht durch Station A
$t_{mess,A \rightarrow E}$	Zeitpunkt des Beginns der Abstandsmessung in Station B
$t_{mess,B \rightarrow A}$	Zeitpunkt des Beginns der Abstandsmessung in Station A
t_n	n -ter diskreter Zeitpunkt
t_{peak}	Konfigurierbarer Schwellwert zur Berechnung des Flächenverhältnisses fürs Gruppieren
$t_{prominenz}$	Konfigurierbarer Schwellwert fürs Gruppieren
$t_{rep,A \rightarrow B}$	Zeitpunkt der Anforderung zur Übermittlung der berechneten Distanz durch Station A
$t_{rep,A \rightarrow E}$	Zeitpunkt des Empfangs zur Übermittlung der berechneten Distanz an Station B
$t_{se,n,A \rightarrow E}$	Startzeitpunkt des Empfangsintervalls an Station B
$t_{se,n,B \rightarrow A}$	Startzeitpunkt des Empfangsintervalls an Station A
$t_{sync,A \rightarrow B}$	Zeitpunkt des Sendens der Synchronisationsnachricht durch Station A
$t_{trans,E \rightarrow A}$	Zeitpunkt des Sendens der Ergebnismnachricht durch Station B
\mathbf{v}_m	m -ter Eigenvektor für MuSiC
\mathbf{V}_{Noise}	Rausch-Unterraum für MuSiC
w_n	n -tes Gewicht zum n -ten Messwert für das Gruppieren

Variablen / Signale für Positionierung

Symbol	Beschreibung
$\alpha_{n \leftarrow \bullet}$	Wahrer Einfallswinkel von n-ter BS an MS
$\hat{\alpha}_{n \leftarrow \bullet}$	Geschätzter Einfallswinkel von n-ter BS an MS
$\tilde{\mathbf{b}}$	Matrix der Anregungen für (gewichteten) Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate
$\Delta d_{\Delta[n \leftrightarrow \bullet, m \leftrightarrow \bullet]}$	Differenzen der wahren Abstände zwischen BS n und MS und BS m und MS
$\tilde{\Delta} d_{\Delta[n \leftrightarrow \bullet, m \leftrightarrow \bullet]}$	Differenzen der geschätzten Abstände zwischen BS n und MS und BS m und MS
$\tilde{d}_{n \leftrightarrow \bullet}$	Geschätzter Abstand zwischen MS und n-ter BS vermittelt Signallaufzeit
$d_{n \leftrightarrow \bullet}$	Wahrer Abstand zwischen MS und n-ter BS vermittelt Signallaufzeit
$\tilde{d}_{n \rightsquigarrow \bullet}$	Geschätzter Abstand zwischen MS und n-ter BS vermittelt Signalstärke
$d_{n \rightsquigarrow \bullet}$	Wahrer Abstand zwischen MS und n-ter BS vermittelt Signalstärke
$\tilde{\varepsilon}$	Summe Fehlerquadrate des Parameters
$\tilde{\varepsilon}_{n, m}$	Fehlerquadrate der Differenzen des Parameters zwischen MS und BS n und MS und BS m
$\tilde{\varepsilon}_n$	Fehlerquadrat des Parameters zwischen MS und BS n
$\tilde{\mathbf{\varepsilon}}$	Vektor der Fehlerquadrate des Parameters
$\overline{\tilde{f}}_p$	Stichprobenmittelwert des Positionsfehlers
\tilde{f}_p	Einzelfehler der Positionierung
$\mathbf{F}(x, y)$	Fisher-Information
$\overline{\tilde{f}}_{p, \text{Trajektorie}}$	Stichprobenmittelwert des Positionsfehlers hinsichtlich der Trajektorie
$f(\cdot x, y)$	Bedingte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für Parameter
\mathbf{H}	Matrix der Daten der BS für (gewichteten) Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate
$\tilde{\mathbf{H}}$	Matrix BS- und Anregungsdaten für (gewichteten) Ansatz der kleinsten Fehlerquadrate
K_{Δ}	Konstante für CRLB für Differenzen der Signallaufzeiten
$K_{\leftrightarrow \bullet}$	Konstante für CRLB für Signallaufzeit
$K_{\leftarrow \bullet}$	Konstante für CRLB für Einfallswinkel
$K_{\rightsquigarrow \bullet}$	Konstante für CRLB für Signalstärke
$l(\cdot x, y)$	Logarithmische Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion für Parameter
N	Anzahl Basisstationen
$\tilde{\mathbf{p}} = \begin{pmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \end{pmatrix}^T$	Schätzwert der Position
$\mathbf{p} = (x, y)^T$	Wahre Position der MS
$\tilde{\mathbf{P}}_{\rightsquigarrow \bullet}$	Vektor der Signalstärken gemessen an MS
$\tilde{P}_{n \rightsquigarrow \bullet}$	Signalstärke der BS n gemessen an MS
\mathbf{S}	Kovarianzmatrix für Vektor $\tilde{\mathbf{b}}$
τ	Korrelationskoeffizient für Ecolocation
\mathbf{u}	Vektor der Signalstärken für Ecolocation
\mathbf{v}	Vektor der Signalstärken für Ecolocation
$(x_n, y_n)^T$	Position der n-ten BS

Variablen / Signale für Nachverfolgung und Sensorfusion

Symbol	Beschreibung
$\underline{\mathbf{A}}[t_k]$	Systemmatrix des beobachteten Systems
$\underline{\mathbf{B}}[t_k]$	Systemmatrix des beobachteten Systems
$\underline{\mathbf{C}}[t_k]$	Systemmatrix des beobachteten Systems
$\underline{\mathbf{D}}[t_k]$	Systemmatrix des beobachteten Systems
$\delta_{i, j}$	Kronecker-Delta
$F_{\Delta d_{\rightsquigarrow \bullet}}(\Delta d_{\rightsquigarrow \bullet})$	Verteilungsfunktion für vorzeichenbehafteten Abstandsfehler $\Delta d_{\rightsquigarrow \bullet}$
$\tilde{\mathbf{K}}[t_k]$	Kalman-Verstärkung des Kalman-Filters
$\underline{\mathbf{Q}}[t_k]$	Kovarianzmatrix der Störgrößen des beobachteten Systems

$\underline{\mathbf{R}} [t_k]$	Kovarianzmatrix der Messgrößen des beobachteten Systems
t_0	Anfangszeitpunkt
t_k	k-ter diskreter Zeitpunkt
$\underline{\mathbf{u}} [t_k]$	Eingangsvektor des beobachteten Systems
$\underline{\mathbf{v}} [t_k]$	Störgrößenzufallsvektor des beobachteten Systems
$(\mathbf{v}_x [t_k], \mathbf{v}_y [t_k])^T$	Geschwindigkeitsvektor des beobachteten Systems
$\underline{\mathbf{w}} [t_k]$	Messfehlerzufallsvektor des beobachteten Systems
$\underline{\mathbf{x}} [t_k]$	Zustandsvektor des beobachteten Systems
$\underline{\hat{\mathbf{x}}} [t_k]$	Zustandszufallsvektor des beobachteten Systems
${}^P \underline{\hat{\mathbf{x}}} [t_k]$	Prognose des Zustandsvektors des beobachteten Systems
${}^S \underline{\hat{\mathbf{x}}} [t_k]$	Geschätzter Zustandsvektor des beobachteten Systems
$\underline{\hat{\mathbf{y}}} [t_k]$	Ausgangszufallsvektor des beobachteten Systems

Variablen für Trajektorie-Vorhersage

Symbol	Beschreibung
$e [t_k]$	Eingabevektor zum Zeitpunkt t_k
$f_a [t_k]$	Funktion für Ausgabe-Tor
$f_e [t_k]$	Funktion für Eingabe-Tor
$f_u [t_k]$	Funktion für Update-Tor
$f_v [t_k]$	Funktion für Vergess-Tor
$h [t_k]$	Verdeckter Zustandsvektor zum Zeitpunkt t_k
N	Anzahl Eingangsvariablen
net	Ergebnis des gewichteten Mittels für die N Eingangsvariablen
$s (\cdot)$	Vorzeichenfunktion
$\sigma (\cdot)$	Sigmoid-Funktion
t_k	k-ter Zeitschritt
b_a	Gewichte für Ausgabe-Tor
b_e	Gewichte für Eingabe-Tor
b_u	Gewichte für Update-Tor
b_v	Gewichte für Vergess-Tor
$W_{a,e}$	Gewichte für Ausgabe-Tor bezüglich Eingabevektor
$W_{a,h}$	Gewichte für Ausgabe-Tor bezüglich verdecktem Zustandsvektor
W_a	Gewichte für Ausgabe-Tor
$W_{e,e}$	Gewichte für Eingabe-Tor bezüglich Eingabevektor
$W_{e,h}$	Gewichte für Eingabe-Tor bezüglich verdecktem Zustandsvektor
W_e	Gewichte für Eingabe-Tor
$W_{u,e}$	Gewichte für Update-Tor bezüglich Eingabevektor
$W_{u,h}$	Gewichte für Update-Tor bezüglich verdecktem Zustandsvektor
W_u	Gewichte für Update-Tor
$W_{v,e}$	Gewichte für Vergess-Tor bezüglich Eingabevektor
$W_{v,h}$	Gewichte für Vergess-Tor bezüglich verdecktem Zustandsvektor
W_v	Gewichte für Vergess-Tor
$w_{[i]k}$	Gewicht im neuronalen Netzwerk (i-te Schicht, j-te Einheit, k-ter Ausgang)
w_n	n-tes Gewicht zur n-ten Eingangsvariable
x_n	n-te Eingangsvariable
$z [t_k]$	Zustandsvektor zum Zeitpunkt t_k

Schaltungstechnische Variablen

Symbol	Beschreibung
C	Kapazität
D	Diode
J_n	Operationsverstärker n mit $n = 1, 2$
M_n	Transistor n mit $n = 1, 2$
R_n	Widerstand n mit $n = 0, 1, 2, 3, 4$
U_{ab}	Ausschaltsschwelle

Symbolverzeichnis

U_{an}	Anschaltswelle
U_{aus}	Ausgangsspannung
U_{DS}	Drain-Source-Spannung des Transistors
U_{ein}	Eingangsspannung
U_{GS}	Gate-Source-Spannung des Transistors
U_{ref}	Referenzspannung
U_{th}	Schwellspannung des Transistors

1. Einleitung

Die vorliegende Arbeit stellt die wissenschaftlichen Fortschritte dar, die seit Beginn der Dissertation auf dem Gebiet der hybriden Positionierung erreicht wurden. Das Gesamtziel war die Realisierung eines heterogenen Ortungssystems unter Einbeziehung möglichst vieler individueller Lokalisierungsmethoden. Die Hauptforschungsarbeit wurde am Lehrstuhl für Schaltungstechnik und Netzwerktheorie an der Technischen Universität Dresden durchgeführt, wobei die meisten Ergebnisse im Rahmen von öffentlichen Förderprojekten erzielt werden konnten. Genannt seien hier insbesondere die von der Europäischen Union unterstützten Projekte „Multimodal Authoring and Gaming Environment for Location-based coLLaborative AdveNtures“ (MAGELLAN) und „Next generation smart Perception sensors and distributed intelligence for proactive human monitoring in health, wellbeing, and automotive systems“ (NextPerception) sowie das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt „FastTraffic“.

Motivation

Neben der Kommunikation hat sich die Positionierung innerhalb der letzten Jahre zu einer der wichtigsten Triebfedern für neue Hardware entwickelt. Für Außenanwendungen stehen beispielsweise mit dem Globalen Positionsbestimmungssystem (engl.: Global Positioning System, kurz: GPS) und Galileo bereits kostengünstige und schnell abrufbare Lösungen zur Verfügung. Im Gegensatz dazu existieren im Innenraum keine Standardansätze sondern eine Vielzahl isolierter Techniken. Diese reichen von preisgünstigen aber ungenauen Methoden unter Verwendung der Signalstärke vorhandener Kommunikationsinfrastruktur bis hin zu hochpräzisen proprietären aber kostenintensiven Verfahren unter Einsatz von funkgestützten Richtungs- und Abstandsmessungen (engl.: RADio Direction And Ranging, kurz: RADAR). Während für erstgenannte Varianten maximale Positionsfehler von 30 m berichtet werden [Liu+07], ermöglichen letztgenannte Genauigkeiten im Dezimeterbereich [Gun+16b]. Allen derartigen Herangehensweisen ist gemeinsam, dass die Lokalisierung bezüglich spezieller ortsfester Umgebungsmerkmale durchgeführt wird, wie den Positionen der Sendestationen. Eine der Hauptfehlerquellen stellt hierbei die Mehrwegeausbreitung der Signale dar. Mit der Koppelnavigation existieren alternativ Konzepte bei welcher die Ortsbestimmung mittels Beschleunigungs- und Drehratensensoren relativ zu einer Anfangsposition durchgeführt wird. Dies bedingt jedoch eine Fehlerakkumulierung mit der Zeit.

Jedes oben erwähnte Vorgehen verfügt über charakteristische Eigenschaften, die dessen Stärken und Schwächen kennzeichnen. Je nach Anwendung verspricht deren Hybridisierung, also die gleichzeitige Einbeziehung multipler Techniken, die Erhöhung der Genauigkeit, die Vergrößerung der Reichweite, den nahtlosen Wechsel oder ermöglicht überhaupt erst die Lokalisierung. Letztgenannter Fall tritt ein, falls die Varianten jeweils allein nicht genügend unabhängige Messungen generieren, welche für die Positionsberechnung vonnöten sind. Zudem ist bei festgelegtem maximalem Fehler eine Kostenreduktion denkbar, beispielsweise durch gleichzeitigen Einsatz mehrerer preisgünstiger Ansätze anstelle einer individuellen teuren Lösung.

Die Hybridisierung bedarf zunächst des Vorhandenseins der separaten Verfahren. Aus diesem Grund widmet sich die Arbeit in einem ersten Teil dem Design diverser Einzelsysteme, bevor im Anschluss deren Zusammenführung diskutiert wird. Letzteres umfasst unter anderem die Präsentation eines generischen Frameworks zur Fusionierung.

Struktur der Arbeit

Zum Verständnis enthalten die ersten Kapitel eine Einführung in die für das Werk notwendigen Grundlagen. Dies betrifft einerseits mathematische Aussagen der Stochastik und Statistik, wie die Definition von uni- und multivariate Zufallsvariablen nebst zugehörigen Verteilungsfunktionen, die Stichprobenerhebung sowie die Vorstellung von Schätzverfahren. Andererseits beschreibt der Text die Prinzipien der drahtlosen Hochfrequenz-Lokalisierung. Neben einer allgemeinen Begriffsbildung und der Erarbeitung möglicher Klassifikationen wird hierbei insbesondere auf Fehlermetriken eingegangen.

Mit Hinblick auf die später entworfenen Einzelsysteme widmet sich die Dissertation daraufhin ausgewählten Lokalisierungskonzepten und zugehöriger Algorithmen zur Berechnung der beiden Kenngrößen Abstand und Einfallswinkel. Zur Bestimmung des ersten Parameters werden Messungen der Signalstärke, der Signalphase, der Signalfrequenz und der Signallaufzeit thematisiert. Demgegenüber beschränkt sich der Inhalt für den zweiten Parameter auf die Signalphase. Für die jeweiligen Varianten werden neben dem Grundprinzip und üblichen Algorithmen auch artverwandte Publikationen präsentiert. Zudem diskutiert die Arbeit die Einbeziehung diverser Ergebnisse einer Datenquelle zur Identifizierung fehlerbehafteter Werte. Beispielsweise werden für die Klassifikation multipler Signale (engl.: Multiple Signal Classification, kurz: MuSiC) innovative Techniken zur Extraktion des wahren Einfallswinkels aus unabhängigen Spektren erarbeitet.

Zur Positionsschätzung betrachtet das nachfolgende Kapitel die Kenngrößen mehrerer Quellen zu einem Zeitpunkt gemeinsam. Aufgrund der ausgiebigen Verwendung im weiteren Verlauf ist der Text hier bewusst ausführlich gehalten. Neben einfachen geometrischen Ansätzen beschränkt sich die Dissertation infolge der Proportionalität zum Abstand auf die Signallaufzeit sowie auf

deren Differenzen. Für Signalstärke-basierte Messungen werden zudem angepasste Gleichungen angegeben. In [Gun+19b] konnte der Autor ferner statistische fundierte Qualitätsmetriken für die verschiedenen Positionierungsverfahren erarbeiten, auf welche im Rahmen der Arbeit nicht weiter eingegangen werden kann. Ein weiterer Teil diskutiert den einfallenden Winkel. Das Kapitel schließt mit einer Gegenüberstellung anhand statistischer Schranken.

Aufeinanderfolgende Messungen unterliegen einer zeitlichen Abhängigkeit. Filter zur Nachverfolgung, welche daraufhin vorgestellt werden, verwenden dies zur Glättung und Fehlerreduktion. Einige spezielle derartige Filter ermöglichen zugleich die Sensorfusion.

Daran anknüpfend wird das im Rahmen der Dissertation entworfene generische Software-Framework zur Integration heterogener Positionierungstechnologien beschrieben, welches mittels geringfügiger Modifikationen unkompliziert auf eine Vielzahl von Lokalisierungsproblemen angewendet werden kann. Dessen Ziel ist die Unterstützung beliebiger Signale, Fusions- und Filtertechniken. Insbesondere werden hierbei Variabilität und Erweiterbarkeit als notwendige Eigenschaften hervorgehoben und die Methoden zu deren Realisierung thematisiert.

Der weitere Text befasst sich mit dem Entwurf von fünf unabhängigen Einzelsystemen. Für die Abstandsbestimmung betrifft dies die Verwendung der Signalstärke für Wireless Local Area Network (WLAN) sowie Bluetooth, der Signalphase von ZigBee und der Signallaufzeit für Ultra-Breitband (engl.: Ultra-WideBand, kurz: UWB). Zudem gelingt für die Signalphase die Ableitung des Einfallswinkels. Alle Systeme wurden ausführlich charakterisiert. Die Arbeit enthält diesbezüglich ausführliche Messungen jedes Systems im Außenbereich und Innenraum. Zur Straffung des Inhalts wurde auf die Aufnahme eines weiteren im Rahmen der Dissertation entworfenen System, welches sich der Koppelnavigation bedient, verzichtet. Gleichwohl ist dieses ausführlich in [Gun+17a] beschrieben.

Ein letzter Teil behandelt die Zusammenführung aller Systeme mit Fokus auf der Erhöhung der Genauigkeit. Ausführliche Messungen belegen die Qualität des Designs des hybriden Systems, welches vorab präsentiert wird.

Schlussendlich wird ein Ausblick auf eine zukünftige Forschungsarbeit des Autors gegeben, wobei vermittelt weniger anfänglicher Positionsmessungen die Vorhersage der bevorstehenden vollständigen zweidimensionalen Trajektorie einer Person unter Einbeziehung der Methoden des maschinellen Lernens gelingt.

Neuwert der Arbeiten im Rahmen der Dissertation

Nachfolgend wird die oben diskutierte Kapitelstruktur erneut aufgegriffen und der Text hinsichtlich der maßgeblichen Neuerungen analysiert.

Die Grundlagenkapitel 2 und 3 zur Stochastik und Statistik sowie zur draht-

losen Hochfrequenz-Lokalisierung dienen der Einführung in die Materie und beschreiben aus der Literatur bekannte Konzepte. Neben Definitionen und Theoremen nebst zugehörigen Beweisen für die mathematischen Aussagen, betrifft dies ebenso die für die Positionierung relevanten Begriffsbildungen und Klassifikationen.

Die daraufhin präsentierten Prinzipien der Abstands- und Winkelmessung gemäß Kapitel 4 stellen einzig für die Signalstärke vollständig aus der Literatur bekannte Vorgehen dar. Für die Einbeziehung der Signalphase zur Berechnung beider Kenngrößen konnten jeweils die signaltheoretischen Grundsätze abgeleitet werden, zu welchen dem Autor bis auf [PBH14] nach bestem Wissen keine artverwandten Publikationen bekannt sind. In jener Quelle wird dabei lediglich grob das Empfangssignal zur Bestimmung des Abstandes für den Ein-Wege-Fall charakterisiert. Dahingegen beleuchtet die Dissertation die vollständige Signalverarbeitung für den Ein- und Zwei-Wege-Fall für den Abstand sowie die kohärente, nicht-kohärente und quasi-kohärente Ausführung für den Winkel. Die nachfolgend diskutierten Algorithmen des Gradientenverfahrens und der schnellen Fouriertransformation (engl.: Fast Fourier Transform, kurz: FFT) für den Abstand und der FFT und MuSiC für den Winkel sind der Fachliteratur entnommen. Nichtsdestotrotz ist die rigorose für MuSiC durchgeführte Ableitung eine Neuerung, speziell im Hinblick auf die theoretischen Beweise zu den komplexen Signal-Kovarianzmatrizen in Anhang A. Denn in artverwandten Publikationen wird häufig reelles Verhalten unterstellt, was aufgrund der komplexen Natur der I/Q-Daten inkorrekt ist. Die sodann besprochenen Konzepte der Einbeziehung multipler Einzelmessungen beschreiben mit der Mittelwertbildung und dem kürzesten Pfad für den Abstand und der Suche des Maximums für den Winkel einerseits konventionelle Ansätze. Andererseits konnten für beide Kenngrößen neuartige Methoden unter Verwendung einer (gewichteten) Gruppierung erarbeitet werden. Für die Signallaufzeit enthält das Kapitel eine Zusammenfassung aus der Literatur bekannter Herangehensweisen. Gleichwohl erörtert der Abschnitt ferner eine vom Autor konzipierte Auswertung zum Einfluss von Frequenzabweichungen. Eine ähnlich innovative Fehlerauswertung wird bereits zuvor für die Signalphase durchgeführt.

Das umfangreiche Kapitel 5 vergleicht mannigfaltige Techniken zur Positionierung aus der Literatur. Neben einigen geringfügigen Vorschlägen zur Verbesserung jener Varianten, beispielsweise für den geometrischen Algorithmus Ecolocation, konnten, angeregt durch [TBC11], umfangreiche mathematische Beziehungen für den Fehlereinfluss der nicht-geometrischen Methoden aufgezeigt werden. Während jene Quelle derartige Resultate einzig für den (gewichteten) iterativen Ansatz und das (gewichtete) Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate für die Signalstärke beschreibt, ergänzt die Dissertation Ableitungen für die Signallaufzeit, die Differenzen der Signallaufzeit und den Einfallswinkel. Jene umfangreichen Charakterisierungen dienen nicht dem Selbstzweck, sondern sind Grundlage für den späteren Einsatz des jeweiligen Algorithmus. Die Abschnitte thematisieren zudem jeweils eingangs das direkte Vorgehen

nebst deren Nachteilen und schließen mit der Deduktion der theoretisch bestmöglichen Schranke.

Für die Nachverfolgung und Sensorfusion, denen sich Kapitel 6 widmet, beschränkt sich das Werk vollständig auf aus der Literatur bekannte Varianten. Das Hauptaugenmerk liegt hier auf dem Kalman-Filter. Aufgrund der in [BS90] und [BS93] präsentierten rigorosen Darstellungen wurde vom erneuten Beweis der angegebenen Theoreme abgesehen.

Kapitel 7 konzentriert sich auf den Entwurf der gesamtheitlichen Softwarekomponente zur Einbeziehung beliebiger Signale, Fusions- und Filtertechniken zur Positionsschätzung. Nach Analyse der Problemstellung wird eine Design-Methodik abgeleitet, die sich der Prinzipien der Variabilität, Erweiterbarkeit und Plattformunabhängigkeit verschrieben hat. Zudem soll die beliebige Verschachtelung ihrer Elemente, variables Aufrufverhalten und eine einheitliche Schnittstelle gewährleistet werden. Mit den Entwurfsmustern, welche auf [AIS77] zurückgehen und deren wichtigste Vertreter ausführlich in [Gam+04] beschrieben sind, stehen objektorientierte Standardlösungen zur Sicherstellung der zuvor aufgestellten Bedingungen zur Verfügung. Unter Zuhilfenahme multipler dieser Instrumente gelingt die Realisierung eines modernen Frameworks, welches nahezu alle Lokalisierungsaufgaben adressiert.

Die daraufhin in Kapitel 8 vorgeschlagenen Umsetzungen der Einzelsysteme basieren auf den Vorarbeiten von Kapitel 4. Im Rahmen der Dissertation wurde auf das Design anwendungsspezifischer integrierter Schaltungen zugunsten der Verwendung kommerzieller verfügbar Bauelemente verzichtet. Der Text befasst sich stattdessen vorrangig mit der Implementierung der Leiterplatten einschließlich der für die Komponenten notwendigen Firmware. Zudem wird die Übertragung der Messdaten an ein Android[®]-basiertes Endgerät thematisiert, welches sich der Nachverarbeitung anhand des zuvor präsentierten Lokalisierungsframeworks und der Visualisierung widmet. Sowohl die Realisierungen der Leiterplatten als auch der Software-Bibliotheken stellen hierbei eigenständige für die Arbeit verwirklichte Entwürfe dar. Kapitel 9 beleuchtet schließlich die Positionierungsgenauigkeit der Konzepte ohne Betrachtung der zeitlichen Abhängigkeit aufeinanderfolgender Messpositionen.

Für die Einbeziehung der zeitlichen Korrelation sowie der Unterstützung multipler losgelöster Implementierungen untersucht Kapitel 10 einzig die Verwendung des Kalman-Filters. Der Fokus der Arbeit liegt hier weniger in der Präsentation neuartiger Fusionstechniken. Stattdessen beabsichtigt der Text die Veranschaulichung der Möglichkeiten des generischen Positionierungsframeworks mit dem Ziel der Erhöhung der Genauigkeit.

Der final gegebene Ausblick zur Vorhersage der Trajektorie einer Person basiert auf der Verwendung spezieller rückgekoppelter neuronaler Netzwerke. Neben der Theorie dieser Variante des maschinellen Lernens beleuchtet Kapitel 11 die Implementierung eines darauf basierenden Frameworks und illustriert erste Messergebnisse. Während sich unzählige wissenschaftliche Gruppen allgemein mit Themen des maschinellen Lernens beschäftigen, thematisie-

ren wenige die Anwendung hinsichtlich der Positionsvorhersage. Jene im Text vorgeschlagene Umsetzung basiert hierbei auf Vorarbeiten aus [Ala+16]. Mit dem Ziel der Anwendung in eingebetteten Systemen, der Integration innerhalb des in Kapitel 7 vorgeschlagenen Positionierungsframeworks sowie der Lizenz-Unabhängigkeit, wurde vom Autor der Arbeit bereits eine entsprechende eigenständige Software-Bibliothek entworfen, welche Einsatz in nachfolgenden Forschungsarbeiten finden soll. Die simultane Implementierung in zwei gängigen Programmiersprachen unter wahlweiser Einbeziehung des Haupt- und Grafikprozessors ermöglicht hierbei die Unterstützung beliebiger Endgeräte und eingebetteter Systeme.