

**Automatische Mehrzielverfolgung als Grundlage  
für Kontaktfusion und Parameterschätzung  
in einem Aktivsonarsystem**

**Dissertation**

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

vorgelegt von

**Kolja Pikora**

Kiel 2017

1. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schmidt
2. Berichterstatter: Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Koch

Datum der mündlichen Prüfung: 06.04.2017

Arbeiten über digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie

Band 3

**Kolja Pikora**

**Automatische Mehrzielverfolgung als Grundlage  
für Kontaktfusion und Parameterschätzung  
in einem Aktivsonarsystem**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

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

Zugl.: Kiel, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5239-8

ISSN 2197-7089

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzzusammenfassung

Die Detektion, Verfolgung und Klassifikation von Objekten unter Wasser ist die zentrale Aufgabe von Aktivsonarsystemen. Ein Aktivsonarsystem besteht aus einem Sender, der aktiv Schall in das Wasser eingibt und einem Empfänger, der mittels eines geschleppten Hydrofonarrays (Schleppsonar) Reflexionen des Schalls aus der Umgebung aufnimmt. In einer herkömmlichen Signalverarbeitungskette werden diese Reflexionen mittels Algorithmen zur Signalaufbereitung und Richtungsfindung in Sonarkontakte umgewandelt. Anschließend werden mittels einer automatischen Mehrzielverfolgung aus diesen Kontakten mögliche Verläufe von Zieltracks extrahiert. Die Mehrzielverfolgung ist im Rahmen dieser Arbeit als kardinalisierter PHD-Filter umgesetzt. Grundlegend für eine korrekte Kontaktgenerierung ist die genaue Kenntnis von Systemparametern, die in einer Parameterschätzung parallel zur Kontaktgenerierung ermittelt werden können. Wenn verschiedene Signale ausgesendet werden, dann wird für jedes Signal eine separate Signalverarbeitungskette prozessiert und jeweils eine Menge an Kontakten generiert. Eine Kombination dieser Kontaktmengen innerhalb der Mehrzielverfolgung oder im Rahmen einer expliziten Kontaktfusion führt zu einem Fusionsgewinn in Form einer höheren Lokalisierungsgenauigkeit von Zieltracks.

Eine zentrale Problemstellung im Aktivsonar liegt darin, dass Sonarkontakte mit einer gewissen Unsicherheit generiert werden und sich diese proportional auf die Position von Zieltracks auswirkt. Die Detektionsgenauigkeit und Detektionswahrscheinlichkeit von Sonarkontakten kann durch Kohärenzverluste der Signalformen oder durch Manöver des schleppenden Schiffes (und damit des Schleppsonars) verringert werden. Inhalt dieser Arbeit ist die Untersuchung von Möglichkeiten, eine Verbesserung der Ziellokalisierung durch eine Rückführung von Zieltrack-Informationen aus der Zielverfolgung in die Kontaktgenerierung zu erwirken. Kontaktfusion und Parameterschätzung in der Kontaktgenerierung sind Möglichkeiten für einen Informationsgewinn durch das Prinzip der Rückführung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine sog. Semikohärente Kontaktfusion entwickelt, welche Kohärenzverlusten in Signalformen entgegenwirkt. Diese Kontaktfusion beinhaltet die Assoziation von Kontakten aus Kontaktmengen zweier hyperbolisch frequenzmodulierter Signale unter Zuhilfenahme von Zieltrack-Positionen aus der Mehrzielverfolgung. Es lässt sich zeigen, dass ein Fusionsgewinn durch diesen Ansatz erreicht werden kann, während Mehrzielsituationen den Fusionsgewinn jedoch einschränken. In einer Schätzung der Hydrofonpositionen wird die Idee der Semikohärenten Kontaktfusion bei Berechnungen von Mehrziel-Likelihoods genutzt. Für die Schätzung der Hydrofonpositionen werden innerhalb dieser Arbeit Zieltrack-Positionen aus der Mehrzielverfolgung als Unterstützung verwendet und ein Verfahren zur Selbstverfolgung des Hydrofonarrays entwickelt. Der Fokus der Selbstverfolgung liegt auf dem Moment einer Kursänderung des Hydrofonarrays. Es stellt sich heraus, dass eine Selbstverfolgung während einer Kursänderung möglich ist und hierzu keine Sensordaten des Hydrofonarrays oder *A-Priori*-Wissen über Objekte in der Umgebung vorhanden sein müssen.

Die Diskussion der Algorithmen basiert auf Monte-Carlo-Simulationen, in denen Track-Metriken gewonnen werden, welche die Qualität der entstehenden Tracks am Ausgang der Mehrzielverfolgung beschreiben. Die Ergebnisse der Semikohärenten Kontaktfusion werden mit denen einer Datenfusion im PHD-Filter mittels iterativer Nachführung verglichen. Der Selbstverfolgung werden Ergebnisse der Zielverfolgung gegenübergestellt, die mit verschiedenen ausgeprägter Kenntnis über Parameter des Manövers ermittelt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Rückführung von Informationen aus der Zielverfolgung in die Kontaktfusion und Parameterschätzung geeignet ist, die Leistungsfähigkeit eines Aktivsonarsystems zu erhöhen.



## Abstract

An active sonar system is used for the detection, classification and tracking of underwater objects. It consists of a transmitter which sends out acoustic energy into the water and a receiver (towing ship) which makes use of a towed hydrophone array (towed array) for detecting acoustical reflections in the environment. Within a common used signal processing chain the reflections are processed by signal enhancement and beamforming algorithms to create sonar contacts each representing one reflection. Based on these generated contacts, tracks of possible target trajectories are estimated in a subsequent automatic multitarget tracking which is within this work realized by a cardinalized PHD-filter. In parallel to the contact generation parameter estimation techniques could be used for approximating system parameters whose knowledge is essential for a correct contact generation. If several waveforms are used for transmission each of these waveforms is processed in an individual signal processing chain. The resulting contacts can be fused in an explicit contact fusion procedure or within the multitarget tracking to achieve an increasing localization accuracy of the targets.

A central problem in target tracking is demonstrated by the fact, that the uncertainty in the generation of sonar contacts affects the position of target tracks proportionally. The accuracy and probability of detection of sonar contacts can be mitigated by a loss of coherence in the transmitted signal waveforms and by a maneuver of the towing ship (and thus of the towed array). The purpose of this work is the study of a feedback of tracking information back to the contact generation for an improvement of the target localization. The contact fusion and the parameter estimation within the contact generation are possibilities to use the information provided by the feedback.

Within the context of this work, a so called semicoherent contact fusion is developed which counteracts the loss of coherence in the signal forms. This fusion technique contains an association of contacts generated from hyperbolic frequency modulated waveforms by using target state information from the target tracking as additional input. It is shown, that the semicoherent contact fusion leads to increasing tracking performance while suffering from multitarget situations. Within a parameter estimation for approximating the hydrophone positions the semicoherent contact fusion is used for calculating multitarget likelihoods. Within this work, the estimation of hydrophone positions is realized in a self-tracking routine which also uses target state information from the target tracking. The focus of the estimation of hydrophone positions is on the moment of a towing ship maneuver. It turns out, that a self-tracking during a maneuver is possible and neither knowledge of non acoustical sensor data of the hydrophone array nor prior knowledge about sources of opportunity in the environment are necessary. The discussion of the new developed algorithms is based on Monte-Carlo simulations generating track metrics which describe the quality of the tracks at the output of the multitarget tracker. The results of the semicoherent contact fusion are compared with the iterative update procedure within the cardinalized PHD-filter. The results of the self-tracking procedure is compared with tracking results based on different knowledge about the maneuver of the array. As shown in the results, the feedback of information from the multitarget tracker back to the contact fusion and parameter estimation is a capable approach for increasing the performance of an active sonar system.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen und Notation</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Zielsetzung	2
1.2 Umsetzung und Analyseverfahren	5
1.3 Liste eigener Veröffentlichungen	5
1.4 Aufbau der Arbeit	6
<b>2 Aufbau und Signalverarbeitung eines Aktivsonarsystems</b>	<b>7</b>
2.1 Sonargleichung	8
2.2 Signalverarbeitung im Aktivsonarsystem	9
2.2.1 Hydrofon-Empfangssignalmodell	9
2.2.2 Position der Hydrofone während einer Schiffsdrehung	11
2.2.3 Aktivsonar-Signalverarbeitungskette	13
2.2.4 Semikohärente Signalverarbeitungskette	20
2.2.5 Komponenten der Sonarkontakte	22
2.3 Hyperbolisch Frequenzmodulierte Signale und Doppler-Invarianz	23
2.4 Zusammenfassung von Kapitel 2	25
<b>3 Verfahren für die Mehrzielverfolgung</b>	<b>27</b>
3.1 Sequenzielle Mehrzielverfolgung	29
3.1.1 Random Finite Sets	29
3.1.2 RFS-Formulierung von Mehrzielzustand und Mehrzielmessung	29
3.1.3 Sequenzielle Mehrziel-Bayes-Rekursion	30
3.2 PHD-Filter	31
3.3 CPHD-Filter	32
3.4 Formulierung in Gauß-Mixturen	33
3.5 Implementierungsaspekte	36
3.6 Datenfusion im CPHD-Filter	37
3.7 Beschreibung der Zieldynamik	38
3.7.1 Messgleichung	39
3.7.2 Systemdynamik im Kalman-Filter	40
3.8 Zusammenfassung von Kapitel 3	41
<b>4 Umgebung für die Simulation von Hydrofonsignalen</b>	<b>43</b>
4.1 Komponenten des Hydrofonsignal-Simulators	44
4.2 Simulierte Szenarien als Datenbasis	46
4.2.1 Benchmark-Szenarios B1 und B2	46
4.2.2 Mehrziel-Szenario M1	47
4.2.3 Kontaktbasierte Szenarien	49
4.3 Kriterien zur Bewertung von Zielverfolgungsverfahren	52
4.4 Zusammenfassung von Kapitel 4	54

<b>5 Semikohärente Kontaktfusion von HFM-Kontakten</b>	<b>55</b>
5.1 Kohärenzverlust in HFM-Signalformen . . . . .	56
5.2 Semikohärente Kontaktfusion . . . . .	56
5.3 Anwendung auf Szenarien . . . . .	60
5.3.1 Bistatischer und multistatischer Einsatz . . . . .	60
5.3.2 Einfluss von erhöhtem Kontaktrauschen . . . . .	62
5.3.3 Korrekte Assoziationen in der Lagrange-Relaxierung . . . . .	63
5.4 Zusammenfassung von Kapitel 5 . . . . .	64
<b>6 Automatische Zielverfolgung als Grundlage von Parameterschätzung</b>	<b>77</b>
6.1 Parameterschätzung durch Selbstverfolgung des Hydrofonarrays . . . . .	80
6.1.1 Manöver-Analyse . . . . .	82
6.1.2 Track-Analyse . . . . .	82
6.1.3 Modellierung des Referenzhydrofonzustands . . . . .	82
6.1.4 Bewegung der Schleppantenne . . . . .	84
6.1.5 Selbstverfolgung mittels Gauß-Summen-Filter . . . . .	85
6.1.6 Entwicklung der Jacobi-Matrix . . . . .	94
6.1.7 Trackauswahl . . . . .	94
6.1.8 Trackidentifikation . . . . .	95
6.1.9 Initialisierung der Schleppantenne . . . . .	96
6.1.10 Neuinitialisierung der Schleppantenne . . . . .	96
6.1.11 Diskussion von ausgewählten Parametern . . . . .	97
6.2 Anwendung der Selbstverfolgung in Szenarien . . . . .	98
6.2.1 Sensitivitätsanalyse mit <i>a priori</i> bekannten Zielen . . . . .	98
6.2.2 Sensitivitätsanalyse mit Zielklassifikation . . . . .	104
6.2.3 Streuung der Position des Referenzhydrofons . . . . .	106
6.2.4 Zielverfolgungsergebnisse . . . . .	108
6.2.5 Zielverfolgung mit verschiedener Klassifikation von Tracks . . . . .	116
6.3 Zusammenfassung von Kapitel 6 . . . . .	124
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>127</b>
7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse und Algorithmen . . . . .	127
7.2 Ausblick auf weiterführende Arbeiten . . . . .	129
<b>Anhang</b>	<b>131</b>
<b>A Berechnung der Jacobi-Matrix in der Selbstverfolgung</b>	<b>133</b>
<b>B Parametrisierung der Szenarios</b>	<b>137</b>
<b>C Multistatische Ergebnisse der Semikohärenten Kontaktfusion</b>	<b>139</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>145</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>153</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>155</b>

# Abkürzungen

AG	Array Gain
CPHD	Cardinalized probability hypothesis density
CT	Coordinated turn
CW	Continuous wave
CWNA	Continuous white noise acceleration
DCT	Detection, classification and tracking
EM	Expectation maximization
FIR	Finite impulse response
FISST	Finite set statistics
FKIE	Fraunhofer Institut für Kommunikation, Information und Ergonomie
FM	Frequenzmoduliert
FS	Filter-and-sum
FTR	Falschtrackrate
GM	Gauß-Mixtur
GMPHD	Gaussian mixture probability hypothesis density
GMCPHD	Gaussian mixture cardinalized probability hypothesis density
GS	Gauß-Summe
HFM	Hyperbolisch frequenzmoduliert
HSS	Hydrofonsignal-Simulation
INA	Iterative Nachführung
ISIF	International Society of Information Fusion
JPDA	Joint probability density association
LAT	Latenz
LFTAS	Low Frequency Towed Array Sonar
MC	Monte-Carlo
MDA	Multidimensional assignment
ML	Maneuvering loss
MLE	Maximum Likelihood estimator
MLFT	Mittlere Länge von Falschtracks
MSTWG	Multistatic Tracking Working Group
NCV	Nearly constant velocity
PCA	Percent correct association
PHD	Probability hypothesis density
PPP	Poisson Punkt Prozesse
RFS	Random finite set
RMSE	Root mean squared error
SKF	Semikohärente Kontaktfusion
Sonar	Sound navigation and ranging
SNR	Signal to noise ratio
TDOA	Time difference of arrival
TKO	Track-Kontinuität

TLE	Track localization error
TVE	Track velocity error
TMA	Track- und Manöveranalyse
TPD	Track probability of detection
TPL	Track performance loss
TOS	Turn of ship
WDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
WP	Water-Pulley

## Notation

### Konventionen und Operatoren

$\neg$	Platzhalter für den Ausdruck "nicht"
$\hat{N}$	Approximierte Anzahl
$\mathbf{a}^*$	Konjugiert-komplexer Vektor $\mathbf{a}$
$\mathbf{A}^T$	Transponierte einer Matrix $\mathbf{A}$
$\dot{x}$	Geschwindigkeitskomponente
$f(\cdot)$	Übergangsfunktion von einem Zeitschritt in den nächsten
$\mathcal{F}(\mathcal{X})$	Stichprobe aus allen endlichen Untermengen des Raumes $\mathcal{X}$
$\mathcal{F}[\cdot]$	Fouriertransformation
$\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$	Inverse Fouriertransformation
$C_a^b$	Binomialkoeffizient mit Parametern $a$ und $b$
$E\{\cdot\}$	Erwartungswertoperator
$u[\cdot]$	Zeit-diskretes Signal
$u(\cdot)$	Zeit-kontinuierliches Signal
$\underline{u}(\cdot)$	Komplexwertiges Signal
$\mathbf{u}(\cdot)$	Reellwertiger Signalvektor
$\underline{\mathbf{u}}(\cdot)$	Komplexwertiger Signalvektor
$\rho[n]$	Diskrete Wahrscheinlichkeitsfunktion
$p(\cdot)$	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
$\mathcal{N}(\mathbf{x}; \bar{\mathbf{x}}, \mathbf{P})$	Normalverteilung des Vektors $\mathbf{x}$ mit Mittelwert $\bar{\mathbf{x}}$ und Kovarianz $\mathbf{P}$
$\mathbf{0}$	Nullmatrix
$\emptyset$	Nicht assoziierter Track
$\langle \cdot, \cdot \rangle$	Skalarprodukt zwischen zwei Sequenzen
$\ \cdot\ $	Euklidische Norm

### Formelzeichen

$a$	Beschleunigungskomponente
$\mathbf{A}$	Menge von Assoziationen

$b$	Bandbreite
<b>B</b>	RFS neu entstehender Ziele
$c$	Schallgeschwindigkeit
<b>C</b>	Komponente einer Gauß-Mixtur
$\underline{d}$	Komplexwertige Richtcharakteristik
$D$	Richtdiagramm
<b>E</b>	RFS von Clutterkontakten
$E$	Einhüllende eines Signals
$f$	Frequenz
$f_0$	Mittelfrequenz
$f_m$	Momentanfrequenz
<b>F</b>	Übergangsmatrix
$g$	Messungs-Einzelziel-Likelihood
$G$	Gauß-Summe
$H_{\ell,h}$	Hydrofon in Kette $\ell$ und Position $h$
$h(\cdot)$	Messfunktion
$h$	Laufindex für Hydrofone
$i$	Allgemeiner Laufindex
$j$	Laufindex für Komponenten einer Gauß-Summe
<b>J</b>	Austauschmatrix
$k$	Zeit-diskreter Zeitindex
<b>K</b>	Kalman-Verstärkung
$l_C$	Länge des Schleppkabels
$N_M$	Dauer eines Manövers relativ zur Pingperiode
$l_K$	Länge einer Hydrofonkette
<b>m</b>	Mittelwert
$n$	Index einer Folge oder Sequenz
$N_{\emptyset}$	Anzahl von Tracks ohne assoziiertem Kontakt
$N_a$	Anzahl von Assoziationen
$N_d$	Anzahl von Tracks mit assoziiertem Kontakt
$N_u$	Anzahl überlebender Gauß-Komponenten
$N_j$	Anzahl von Gauß-Komponenten
$N_{\Gamma}$	Anzahl neu entstehender Gauß-Komponenten
$N_{\mathcal{T}}$	Anzahl von Tracks
$N_r$	Anzahl von Reflektionen
$N_h$	Anzahl von Hydrofonen
$N_e$	Anzahl von Empfängern
$N_t$	Anzahl Zeitschritte
$N_{MC}$	Anzahl Monte-Carlo-Simulationen
$N_q$	Anzahl von Zielen
$N_O$	Anzahl identifizierter Tracks
$N_z$	Anzahl von Kontakten
$N_u$	Anzahl Abtastwerte eines Signalvektors
$o$	Laufindex von extrahierten Trackzuständen
$p_f$	Falschalarmwahrscheinlichkeit
$p_d$	Detektionswahrscheinlichkeit
$p_u$	Überlebenswahrscheinlichkeit
$P$	Eckpunkt eines Dreiecks

$\mathbf{p}$	Positionsvektor
$\mathbf{P}$	Kovarianzmatrix
$\mathbf{Q}$	Prozessrauschkovarianzmatrix
$r$	Entfernung
$\mathbf{R}$	Kovarianzmatrix des Messrauschens
$S_{\mathcal{X}}$	Region in einem Raum $\mathcal{X}$
$\mathbf{S}$	Innovationsmatrix des Kalman-Filters
$T_M$	Dauer eines Manövers in Sekunden
$T_P$	Zeit zwischen zwei ausgesendeten Pings
$t$	Zeit-kontinuierlicher Zeitindex
$N(\cdot)$	Detektorausgang
$\mathbf{T}$	Triple aus HFM <sup>+</sup> -, HFM-Kontakt und Track
$\mathbf{U}$	RFS der überlebenden Ziele
$\mathbf{v}$	Geschwindigkeitskomponente
$v_D$	Geschwindigkeitsverlust
$\mathbf{v}$	Geschwindigkeitsvektor
$x$	Kartesische Zustandskomponente
$\mathbf{x}$	Zustandsvektor
$\mathbf{X}$	RFS des Mehrzielzustands
$\mathbf{X}_T$	RFS extrahierter Ziele
$y$	Kartesische Zustandskomponente
$\mathbf{z}$	Kontaktvektor
$\mathbf{Z}$	RFS der Kontakte
$\alpha_R$	Dämpfung einer Reflexion
$\alpha_w$	Breitbandkompressionsfaktor
$\beta$	Entstehende Zustände in einem Zeitschritt
$\gamma$	Sich abspaltende Zustände in einem Zeitschritt
$\gamma_{NP}$	Schwelle im Neyman-Pearson-Detektor
$\mathbf{\Gamma}$	RFS sich abspaltender Ziele
$\delta$	Distanz
$\Delta_{TPL}$	Relativer Verlust der Trackqualität
$\Delta\psi$	Änderung der Kursänderungsrate innerhalb einer Pingperiode
$\Delta v$	Änderung der Geschwindigkeit innerhalb einer Pingperiode
$\zeta$	Referenzhydrofon
$\eta$	Frequenz-Faktor im HFM-Signal
$\theta$	Kurs
$\Theta_b$	Beamwinkel
$\Theta_s$	Steuerungswinkel
$\Theta$	RFS von durch Ziele generierte Kontakte
$\kappa(z)$	Clutterintensität am Ort des Kontakts $z$
$\mu$	Abweichung von einem wahren Wert
$w$	Rauschkomponente
$\xi$	Zustand im letzten Zeitschritt
$\varrho^{a,b}$	Räumlicher Korrelationskoeffizient zwischen Hydrofon $a$ und $b$
$\sigma$	Standardabweichung
$\tau$	Verzögerungskomponente
$v$	Intensität einer Mehrzieldichte

---

$\phi$	Einfallswinkel relativ zum Referenzhydrofon
$\varphi$	Azimuth einer Reflexion
$\Phi$	Komplexwertiger Phasenterm
$\underline{\Phi}$	Komplexwertiger Vektor aus Phasentermen
$\psi$	Kursänderungsrate
$\Psi$	Volumen des Überwachungsgebiets
$\underline{\omega}$	Komplexwertiges Gewicht zur Richtungssteuerung
$\omega$	Trackgewicht
$\boldsymbol{\omega}$	Vektor für die Steuerung eines Richtungsformers
$\mathcal{H}$	Hypothese
$\ell$	Index für die Kette des Hydrofonarrays
$\mathcal{L}$	Likelihood
$\mathcal{X}$	Zustandsraum
$\mathcal{Z}$	Messraum