

Entwurf einer Signalverarbeitung für räumlich verteilte MIMO-SONAR-Systeme

Frederik Kühne¹, Tim Owe Wisch¹, Bastian Kaulen¹, Christian Kanarski¹, Karoline Gussow¹, Gerhard Schmidt¹

¹Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118 Kiel, Deutschland, Email: {frk, timw, bk, chk, kars, gus}@tf.uni-kiel.de

Einleitung

Räumlich verteilte MIMO-SONAR-Systeme haben das Potential, Unterwasserbereiche mit einer erhöhten Auflösung zu überwachen. Nicht nur der hinzugewonnene Freiheitsgrad durch Triangulation über verteilte Sender- und Empfängerpaare führt zu einer präziseren Zieldetektion, auch verwinkelte Gebiete, wie zum Beispiel Hafenanlagen, lassen sich mit einer solchen Struktur vollumfänglicher überblicken. Neben einer komplexeren Signalübertragung zwischen den einzelnen Knotenpunkten werden vor allem angepasste Algorithmen benötigt, die eine Erzeugung eines einzelnen SONAR-Bildes aus dem verteilten System ermöglichen. In diesem Beitrag wird dazu zunächst die Signalverarbeitung beschrieben und exemplarisch ein bistatisches Setup vorgestellt. Dabei wird zwischen MISO-, SIMO- und MIMO-SONAR-Systemen unterschieden. In einem weiteren Schritt wird ein Konzept zur Fusion der Ergebnisse der einzelnen bistatischen Subsysteme zu einem ganzheitlichen multistatischen System vorgestellt.

Grundlagen

Aktive SONAR-Systeme sind in der Lage, durch das Aussenden eines bekannten Signals und anschließender Empfangssignalverarbeitung die Reflexionen an Unterwasserzielen Positionen auf einer Karte zuzuordnen. Dabei wird für die genauere Entfernungsauflösung meist ein signalangepasstes Filter (*matched filter*) genutzt, während für die Richtungsbestimmung Sensorarrays und Beamforming eingesetzt werden. Über die Anzahl an empfangenen und gesendeten Signalen lässt sich das SONAR-System charakterisieren: Ein System mit einem einzelnen Empfänger wird bezeichnet als *single input, SI*. Mehrere empfangene Signale werden bezeichnet als *multiple input, MI*. Analog lässt sich ein kohärentes Sendesignal als *single output, SO* bezeichnen. Hierunter fallen auch lediglich phasenverschobene Versionen des selben Signals aus mehreren Sendeelementen. Werden hingegen voneinander weitgehend unabhängige, gegenseitig orthogonale Signale gesendet, wird von *multiple output, MO* gesprochen. Grundlegende SONAR-Systeme verfügen über einen monostatischen Aufbau, bei dem das Signal aussendende Projektorarray am selben Punkt oder wenigstens sehr nahe dem Ort des empfangenden Hydrophonnarrays positioniert ist. Eine Verteilung der Sender- und Empfängerknoten wird dagegen als bistatisches SONAR-System bezeichnet. Fügt man weitere Knoten hinzu, so wird von einem multistatischen Aufbau gesprochen. Diese Verteilung hat mehrere Vorteile. Unter dem Sicherheitsaspekt betrachtet bietet die örtliche Trennung der Sendehardware dem Träger der Empfangshardware eine geringere Gefahr, entdeckt zu werden.

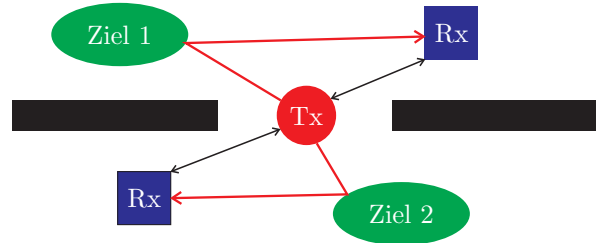


Abbildung 1: Beispielsetup eines verteilten SONAR-Systems.

Praktische Aspekte lassen sich Abbildung 1 entnehmen. Besonders in verwinkelten Gebieten wie zum Beispiel Hafenanlagen lässt sich durch eine geschickte Verteilung der Hardware eine vollumfängliche Überwachung gewährleisten. Besonders bei Benutzung der MISO-Technologie, bei der gerade mal ein Hydrophon für den Empfänger nötig ist, lässt sich ein Gebiet mit vielen einfachen Hardwareknoten ausstatten, die alle von einem großen Sender profitieren. Durch die verteilte Anordnung mehrerer Knoten ist zudem durch Triangulation eine bessere räumliche Auflösung zu erwarten, die allerdings erst ab einer bestimmten Anzahl von Knoten auftritt. Ein Nachteil gegenüber dem klassischen, monostatischen SONAR ist die komplexere Signalverarbeitung, die erforderlich ist, um eine ganzheitliche Karte von detektierten Zielen zu erstellen. Die folgenden Berechnungen werden für ein zweidimensionales SONAR-System in der x/y -Ebene durchgeführt.

Auftrennung in Teilsysteme

Um die Daten der verteilten SONAR-Knotenpunkte korrekt zu verarbeiten, ist die Wahl einer Fusionsebene erforderlich. Grundlegend ist es möglich, die aufgenommenen Rohsignale zu einem zentralen System zu übertragen, um aus diesen Informationen zu extrahieren. Das bringt den Nachteil der Notwendigkeit einer schnellen und vor allem zeitlich synchronisierten Datenübertragungsstruktur mit sich. Abstrahiert man die Daten und übergibt nur die Zielmatrix, dann lockert sich die strenge zeitliche Synchronisationsvorgabe und die zu übertragenden Datenmengen sind komprimiert. Eine weitere Abstraktion, bei der beispielsweise nur die detektierten Zielpositionen übertragen werden ist ebenfalls möglich, verringert die zur Verfügung stehende Datenmenge für diese Aufgabe und führt aber zu einer potentiell schlechteren Detektionsgenauigkeit. Die hier ausgewählte Methode ist deshalb eine Übertragung der berechneten Zielmatrix. Das System aus allen Knoten kann zu diesem Zweck aufgeteilt werden in mehrere Teilsysteme, die jeweils immer aus je einem Sender- und einem Empfängerknoten bestehen

müssen. Bei M_{tx} Sendeknoten und M_{rx} Empfängerknoten gibt es somit $M_{rx,tx} = M_{tx} \cdot M_{rx}$ Kombinationen aus bistatischen und potentiell auch monostatischen Systemen, die jeweils eine eigene Zielmatrix erzeugen können.

Bistatische SONAR-Signalverarbeitung

Für monostatische Teilsysteme kann auf konventionelle Weise eine Zielmatrix berechnet werden, die mit dem Gesamtsystem direkt geteilt werden kann. Bistatische Systeme benötigen durch die physikalische Anordnung eine angepasste Signalverarbeitung.

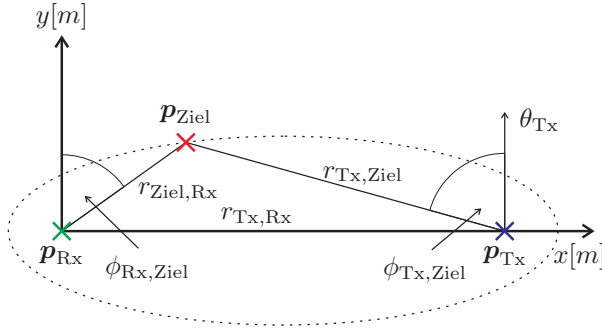


Abbildung 2: Bistatische Anordnung der Sender- und Empfängerknoten (blaues und grünes Kreuz) mit einem beispielhaften Ziel (rotes Kreuz).

Abbildung 2 zeigt ein generelles bistatisches Setup. Um die nötigen Berechnungen zu vereinfachen, wird die Position des Empfängerknotens p_{Rx} auf den Koordinatenursprung mit Ausrichtung entlang der y-Achse gelegt. Die Position des Sendeknotens p_{Tx} wird durch die relative Entfernung vom Empfängerknoten $r_{Tx,Rx}$ bestimmt auf die x-Achse gelegt, mit der Ausrichtung θ_x relativ zur y-Achse, wobei in diesem Beitrag von mathematisch positiver Drehrichtung mit 0° auf der y-Achse gerechnet wird. Ein Reflexionspunkt p_{Ziel} erzeugt nun abhängig von seiner Entfernung vom Sender $r_{Tx,Ziel}$ und vom Empfänger $r_{Rx,Ziel}$ bei idealisierter, fester Schallgeschwindigkeit c über den Zusammenhang

$$\tau_{Tx,Ziel,Rx} = \frac{r_{Tx,Ziel} + r_{Ziel,Rx}}{c} \quad (1)$$

ein um $\tau_{Tx,Ziel,Rx}$ verzögertes Sendesignal am Empfänger. Sind die Winkel des Ziels zum Sender $\phi_{Tx,Ziel}$ und Empfänger $\phi_{Rx,Ziel}$ unbekannt, so lässt sich aus der Verzögerung schließen, dass das Ziel auf einer Ellipse liegen muss, dessen Brennpunkte gerade die Sender- und Empfängerpositionen sind [1].

Betrachtet man nun ein SIMO-SONAR-System, das über Empfangsbeamforming den Winkel $\phi_{Rx,Ziel}$ schätzen kann, dann ist die Position des Ziels gegeben durch die Bestimmung des Schnittpunktes der Ellipse

$$\sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{(x - r_{Tx,Rx})^2 + y^2} = r_{Tx,Ziel} + r_{Ziel,Rx} \quad (2)$$

und der Geraden durch den Ursprung mit entsprechendem Winkel

$$y = -\frac{x}{\tan(\phi_{Rx,Ziel})}. \quad (3)$$

Eine Berechnung der Zielmatrix für das genannte System kann erfolgen, indem zunächst der konventionelle, monostatische Ansatz gewählt wird und die errechnete SONAR-Matrix in einem zweiten Schritt entzerrt wird. Diese zweidimensionale Matrix χ_{mono} hat in der ersten Dimension so viele Einträge, wie Beams gerechnet werden (N_{beams}) und in der zweiten Dimension so viele Einträge, wie Abtastpunkte in einer festgelegten Ping-Periode aufgezeichnet wurden ($N_{samples}$). Eine Abbildungsvorschrift zur entzerrten Zielmatrix χ_{bi} kann gewonnen werden aus der Abbildung des Kreises, auf dem zum Sender und Empfänger äquidistante Ziele in einem monostatischen Setup liegen, zu einer Ellipse. Da der Empfangsbeamformer unabhängig ist von der Position des Senders, bleibt der Zielwinkel $\phi_{Rx,Ziel}$ gleich dem Winkel im bistatischen Fall. Die einzige Änderung ergibt sich durch die veränderte Abbildung der Laufzeit. Für jeden Zielpunkt in der Matrix χ_{bi} kann also – nach entsprechender Interpolation – ein Quellpunkt in der Matrix χ_{mono} gefunden werden durch

$$\phi_{mono,SIMO} = \phi_{bi} \quad (4)$$

$$r_{mono} = \frac{r_{Ziel,Rx} + r_{Tx,Ziel}}{2}. \quad (5)$$

Nach Iteration durch jeden Punkt in der Zielmatrix χ_{bi} mit dazugehörigem Winkel ϕ_{bi} und Radius r_{bi} , anschließender Abbildung der Werte und beispielsweise einer Interpolation nullter Ordnung kann eine entzerrte Matrix erzeugt werden:

$$\chi_{bi}(\phi_{bi}, r_{bi}) = \chi_{mono}(\phi_{mono,SIMO}, [r_{mono}]). \quad (6)$$

Betrachtet man dagegen ein MISO-SONAR-System, das die Winkelbestimmung über das Sendearray erreicht, ändert sich die Abbildungsvorschrift minimal. Während der zurückgelegte Weg des gesendeten Signals sich nicht verändert, muss der Winkel $\phi_{Rx,Ziel}$ der Zielmatrix χ_{bi} an den Sendewinkel $\phi_{Tx,Ziel}$ angepasst werden. Für jeden Zielpunkt kann der Quellwinkel unter Berücksichtigung der Ausrichtung des Sendearrays ϕ_{Tx} errechnet werden aus

$$\phi_{mono,MISO} = -\text{atan}\left(\frac{x_{bi} - r_{Tx,Rx}}{y_{bi}}\right) - \phi_{Tx}. \quad (7)$$

Zusammen mit Gleichung (6) ergibt sich dann

$$\chi_{bi}(\phi_{bi}, r_{bi}) = \chi_{mono}([\phi_{mono,MISO}], [r_{mono}]). \quad (8)$$

Für den Fall des bistatischen MIMO-SONARs kann keine einfache Entzerrung nach konventioneller Signalverarbeitung durchgeführt werden, da jeder Punkt der Zielmatrix

χ_{bi} abhängig von beiden Winkeln $\phi_{Rx,Ziel}$ und $\phi_{Tx,Ziel}$ ist. In diesem Fall muss zumindest empfangsseitig ein zeitvarianter Sendebeamformer gerechnet werden. Dieser kann durch geschickte Wahl und Verzögerung der Prototypensignale mit dem signalangepassten Filter kombiniert werden [2]. Anstatt nun eine Korrelation über die gesamte Zeit durchzuführen, muss für jede Entfernung das Filter an den veränderten Sendewinkel $\phi_{Tx,Ziel}$ angepasst werden:

$$\chi_{bi}(\phi_{bi}, r_{bi}) = \mathbf{s}_{rx}(\phi_{Rx,Ziel}, r_{bi}) \mathbf{s}_{prot}^T(\phi_{mono,MISO}), \quad (9)$$

mit $\mathbf{s}_{rx}(\phi_{Rx,Ziel}, r_{bi})$ als die letzten L_{prot} Abtastpunkte des Empfangsbeamformer für den Winkel $\phi_{Rx,Ziel}$, mit L_{prot} als Filter-Länge und $\mathbf{s}_{prot}(\phi_{mono,MISO})$ als Prototyp für das signalangepasste Filter mit integriertem empfangsseitigem Sendebeamformer für den Winkel $\phi_{mono,MISO}$ [2].

Fusion der Teilsystemmatrizen

Für das Zusammenführen der Ergebnisse mehrerer Knotenpunkte ist Kenntnis über Position und Ausrichtung jedes Teilsystems nötig. Eine einfachere Fusion der Matrizen, die Ergebnisse in Polarkoordinaten zeigen, führt über die Transformation der Datenpunkte in kartesische Koordinaten. Gibt es eine hinreichend genaue Schätzung der Knotenparameter, so können die dazugehörigen Datenpunkte mit einfachen Translations- und Rotationsbewegungen relativ zueinander abgebildet werden. Für die Fusion der Daten bietet sich eine multiplikative Überlagerung bzw. eine Addition der logarithmierten Beiträge an:

$$\chi_{glob,kart} = \sum_{k=0}^{N_{bi}-1} 10 \cdot \log_{10}(\Xi\{\chi_{bi,k}\}). \quad (10)$$

Dabei steht $\chi_{bi,k}$ für die Ergebnismatrix des k -ten aus N_{bi} Knotens, $\Xi\{\cdot\}$ für die Translations- sowie Rotationsoperationen und $\chi_{glob,kart}$ für die zusammengeführte Ergebniskarte in kartesischen Koordinaten.

Simulationsergebnisse

Die entwickelten Abbildungsvorschriften für bistatische SIMO-, MISO-, und MIMO-SONAR-Signalverarbeitung in einem ersten Teil, sowie die Superposition der Ergebnismatrizen einzelner Knoten in einem zweiten Teil wurden in einer idealen Simulationsumgebung getestet. Dabei wurden in verschiedenen Kombinationen ein oder 32 Hydrophone und Projektoren genutzt.

Tabelle 1 listet die Positionen der Sender- und Empfängerhardware und von drei verteilten Punktzielen für den ersten Teil auf. Dabei steht ϕ für die Ausrichtung des Arrays. Die berechneten Simulationen sind alle mit dem selben Signaltyp – nämlich bandbegrenztem Rauschen mit einer Mittenfrequenz von 50 kHz und einer Bandbreite von 20 kHz – durchgeführt worden, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Tabelle 1: Positionen der Elemente in der bistatischen SONAR-Simulation

Typ	Position (x y ϕ)
Empfängerarray \mathbf{p}_{Rx}	(0 m 0 m 0)
Sendearray \mathbf{p}_{Tx}	(10 m 0 m 0)
Ziel 1 $\mathbf{p}_{Ziel,1}$	(0 m 10 m –)
Ziel 2 $\mathbf{p}_{Ziel,2}$	(5 m 5 m –)
Ziel 3 $\mathbf{p}_{Ziel,3}$	(15 m 5 m –)

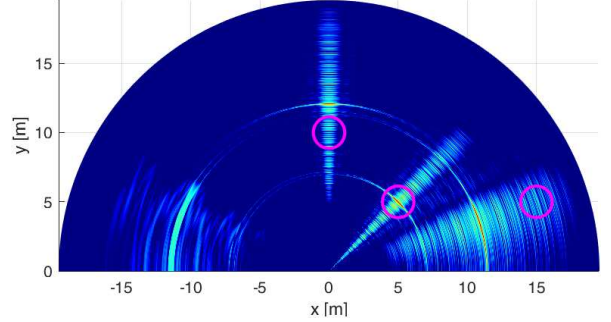


Abbildung 3: Durch konventionelle, monostatische Signalverarbeitung berechnete SONAR-Zielmatrix χ_{mono} des bistatischen SIMO-SONAR-Setups. Magenta umkreist sind die Zielpositionen.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch das nicht entzerrte Ergebnis χ_{mono} einer bistatischen SIMO-Simulation. Es ist zu erkennen, dass zwar drei verschiedene Ziele mit den richtigen Winkeln lokalisiert werden können, aber die ablesbaren Positionen nicht den vorgegebenen Koordinaten entsprechen.

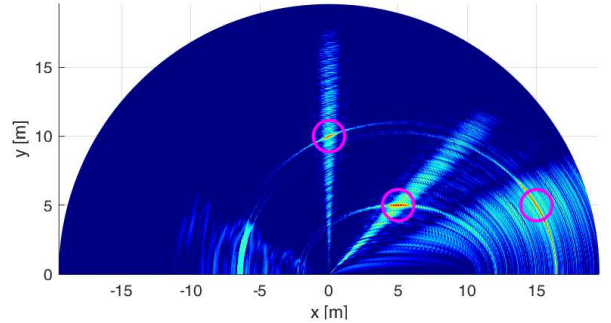


Abbildung 4: Entzerrte SONAR-Zielmatrix χ_{bi} des bistatischen SIMO-SONAR-Setups.

Abbildung 4 zeigt die entzerrte Matrix χ_{bi} . Die Einflüsse der Nebenkeulen des gerechneten Empfangsbeamformers deuten die charakteristischen Äquidistanzellipsen [1] an. Es ist weiterhin erkennbar, dass die Zielkoordinaten auf die erwarteten Positionen abgebildet wurden, während die Zielwinkel konstant geblieben sind. Es ist zudem ersichtlich, dass das Ziel mit dem steilsten Winkel $\phi_{Rx,Ziel}$ zum Empfänger eine besonders ungenaue Winkelauflösung erzeugt im Gegensatz zu Zielen mit kleineren Winkeln.

Abbildung 5 zeigt die Zielmatrix χ_{bi} des selben Szenarios aus Tabelle 1, jedoch diesmal für eine MISO-SONAR-Simulation. Über dem deutlich erhöhten Rauschteppich

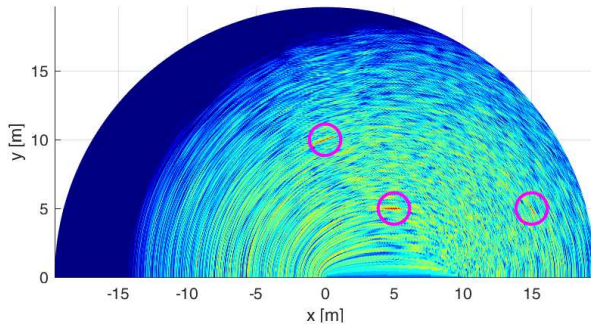


Abbildung 5: Entzerrte SONAR-Zielmatrix χ_{bi} des bistatischen MISO-SONAR-Setups.

als Folge der nicht vollständig orthogonalen Sendesequenzen sind die gegebenen Ziele an den richtigen Koordinaten erkennbar. Analog zur SIMO-SONAR-Simulation weisen Ziele mit kleinem Einfallswinkel gegenüber dem Sendearray eine höhere Winkelauflösung auf.

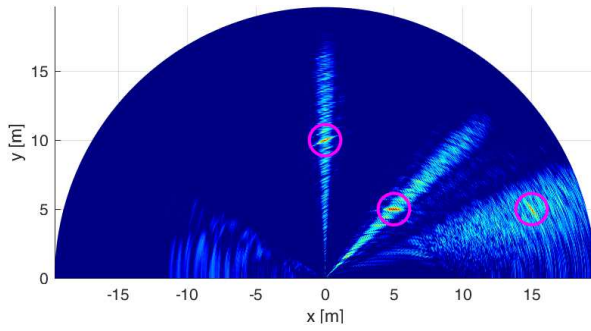


Abbildung 6: Entzerrte SONAR-Zielmatrix χ_{bi} des bistatischen MIMO-SONAR-Setups.

Die bistatische MIMO-SONAR-Simulation ist in Abbildung 6 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Ziele auch hier an den vorgegebenen Koordinaten lokalisiert werden können. Zusätzlich ist der Vorteil der verteilten Beamformer an der besseren Winkelauflösung aller Ziele erkennbar. Für den zweiten Teil der Simulationen wurden die Matrizen von sechs verschiedenen Systemen überlagert.

Tabelle 2: Positionen der Elemente in der bistatischen SONAR-Simulation

SONAR-Typ	Rx-Position (x y ϕ)	Tx-Position (x y ϕ)
Monost. SIMO	(0 m 0 m $-\frac{\pi}{4}$)	(0 m 0 m $-\frac{\pi}{4}$)
Bist. SIMO	(0 m 0 m $-\frac{\pi}{4}$)	(20 m 0 m $\frac{\pi}{4}$)
Monost. MISO	(20 m 0 m $\frac{\pi}{4}$)	(20 m 0 m $\frac{\pi}{4}$)
Bist. MISO	(20 m 0 m $\frac{\pi}{4}$)	(20 m 20 m $\frac{3\pi}{4}$)
Monost. MIMO	(20 m 20 m $\frac{3\pi}{4}$)	(20 m 20 m $\frac{3\pi}{4}$)
Bist. MIMO	(20 m 20 m $\frac{3\pi}{4}$)	(0 m 20 m $-\frac{3\pi}{4}$)

Tabelle 2 listet den SONAR-Typ zusammen mit den Positionen der Knoten auf. Die Zielpositionen sind identisch zu denen in Tabelle 1.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis der mit Gleichung (10) zusammengeführten Matrizen auf. Die magentafarbenen Kreise deuten die Position der Knotenpunkte an. Die zu

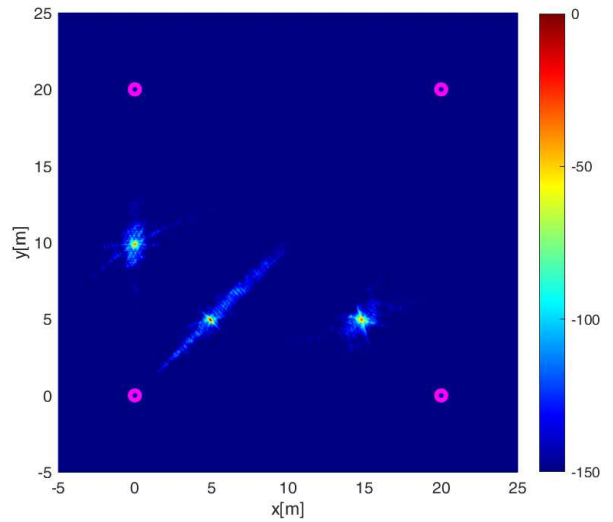


Abbildung 7: Überlagerte Kombination der Zielmatrizen χ_{bi} aus sechs verschiedenen, simulierten SONAR-Szenarien.

erkennenden Zielpositionen stimmen mit den vorgegebenen Parametern überein. Auch ist zu erkennen, dass die Ziele sehr genau auf einem spezifischen Punkt lokalisiert werden können und das System nur sehr geringe Fehlerleistung erzeugt. Mit einer Detektionsgrenze von etwa -50 dB lassen sich bereits nahezu alle Nebenkeulen herausfiltern.

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Signalverarbeitung für räumlich verteilte MIMO-SONAR-Systeme vorgestellt. Die Trennung komplexer Gesamtsysteme in viele bistatische Teilsysteme wurde gezeigt und eine Entzerrung bzw. eine angepasste Signalverarbeitung mittels zeitvariantem Filter wurde durchgeführt. Eine Kombination der einzelnen SONAR-Matrizen in eine globale, kartesische Karte wurde mittels Koordinatentransformation sowie Translations- und Rotationsoperationen gezeigt. Während der Algorithmus zur Entzerrung der bistatischen SIMO- und MISO-SONAR-Zielmatrizen bereits in ein echtzeitfähiges System [3] eingebunden ist, muss die bistatische MIMO-SONAR-Prozessierung noch entsprechend beschleunigt werden. Ein Test in realer Umgebung wurde für einzelne Teilsysteme durchgeführt, jedoch nicht für ein Gesamtsystem mit mehreren verteilten Knotenpunkten.

Literatur

- [1] H. Cox, Fundamentals of bistatic active sonar. Underwater acoustic data processing: 3-24, 1989
- [2] T. Kaak, J. Abshagen und G. Schmidt, Real-time capable multiple-input-multiple-output SONAR systems – An algorithmic approach, IET Radar, Sonar & Navigation 15.9: 985-1000, 2021
- [3] F. Kühne, B. Kaulen, T. O. Wisch und G. Schmidt, Entwurf und Implementierung einer modularen Softwarearchitektur für kognitive verteilte Echtzeit-MIMO-SONAR-Systeme, DAGA Stuttgart, 2022