

Untersuchung des Einflusses verschiedener Array-Öffnungswinkel bei MIMO-SONAR-Systemen

Karoline Gussow¹, Bastian Kaulen¹, Frederik Kühne¹, Christian Kanarski¹, Finn Röhrdanz¹,
Marco Driesen¹, Stephan Rautenberg², Jan Abshagen³, Erik Mackensen⁴, Dirk Meyners⁴,
Eckhard Quandt⁴, Gerhard Schmidt¹

¹ *Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel,*
Email: {kars, bk, frk, chk, finr, madr, gus}@tf.uni-kiel.de

² *ATLAS ELEKTRONIK GmbH, Email: stephan.rautenberg@atlas-elektronik.com*

³ *Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD71),*
Email: janabshagen@bundeswehr.org

⁴ *Anorganische Funktionsmaterialien, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Email: {erm, dm, eq}@tf.uni-kiel.de*

Kurzfassung

Die MIMO-Technologie (Multiple-Input Multiple-Output) ist ein vielversprechender Ansatz zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von SONAR-Systemen. Anstelle eines einzelnen Projektors werden Projektor-Arrays verwendet, über die orthogonale Signale ausgesendet werden. Dadurch wird (Send-) Beamforming auf der Empfangsseite ermöglicht, wodurch u.a. die Lokalisierung und Überwachung von Zielen verbessert werden. Allerdings konnten die theoretischen Vorteile bisher nur teilweise durch eigene Messungen bestätigt werden. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass diese Systeme empfindlich auf Reflexionen reagieren, die an der Wasseroberfläche oder am Meeresboden entstehen. Insbesondere bei geringen Wassertiefen, wie z.B. in Häfen, treten vermehrt Reflexionen auf, welche die Vorteile der MIMO-Signalverarbeitung beeinträchtigen können.

Es wird daher untersucht, ob der vertikale Öffnungswinkel des Projektor-Arrays einen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit von MIMO-SONAR-Systemen in flachen Gewässern hat. Dazu wird in einem Echtzeit-Signalverarbeitungsprogramm eine möglichst realitätsnahe Simulationsumgebung verwendet. Durch Hinzufügen einer Reihe von Sendeelementen in vertikaler Richtung können verschiedene vertikale Beamöffnungen eingestellt werden. Der Einfluss der Reflexionen wird anhand des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses ermittelt und für unterschiedliche Konfigurationen verglichen.

Multiple-Input Multiple-Output SONAR-Systeme

MIMO-Systeme bestehen aus mehreren Projektoren und Hydrophonen. Häufig kommen hierbei monostatische Systeme zum Einsatz, bei denen sowohl die Sender als auch die Empfänger möglichst an derselben Stelle platziert werden. Über die Projektoren werden gleichzeitig ungerichtet orthogonale Signale ausgesendet. Aufgrund der Eigenschaften dieser Signale kann auf der Empfangsseite ein Sendebeamforming stattfinden [1]. Die Empfangssignale werden entsprechend ihrer Laufzeit zu den jeweiligen Hydrophonen in Abhängigkeit von der be-

trachteten Richtung verzögert. Somit kann eine hohe Winkelauflösung erzielt werden. Zusätzlich werden signalangepasste Filter verwendet, um die Entfernung der Ziele zu bestimmen. Durch das gleichzeitige Aussenden der Signale ist allerdings die Leistung, die in eine Richtung gesendet werden kann, geringer, als beim klassischen Sendebeamforming, bei dem zur selben Zeit nur in eine Richtung Schall ausgesendet wird. Dadurch ergibt sich ein geringeres Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR), wodurch Ziele schwieriger vom Hintergrundrauschen unterschieden werden können.

Unterwasserkanal

Der Unterwasserkanal bringt einige Herausforderungen für die SONAR-Signalverarbeitung mit sich, welche auch die Leistungsfähigkeit der MIMO-SONAR-Systeme beeinflussen können. Schallwellen besitzen im Wasser deutlich bessere Ausbreitungseigenschaften als zum Beispiel elektromagnetische Wellen, weshalb diese für SONAR-Systeme eingesetzt werden [2]. Allerdings gibt es viele akustische Störungen im Unterwasserkanal. Dazu gehört das Umgebungsrauschen, welches unter anderem durch Wellenbewegungen, Niederschläge, die Schifffahrt oder Meerestiere verursacht wird [3]. Bei aktiven SONAR-Systemen, die nicht nur Schallwellen empfangen sondern auch selbst aussenden, kommen weitere Störquellen hinzu. Dies können Reflexionen oder Rückstreuungen des ausgesendeten Schalls an anderen Objekten als den zu detektierenden Zielen sein, wie zum Beispiel die Wasseroberfläche und der Boden. Bei einer glatten Oberfläche wird der größte Teil der Leistung reflektiert, ist diese jedoch rau wird die Leistung in alle Richtungen gestreut [3]. Somit wird der Anteil, der zurück in die Richtung der Hydrophone gestreut wird, wieder vom SONAR-System empfangen, wodurch das SNR verringert wird. Ähnlich verhält es sich mit dem Boden, wobei von der Bodenbeschaffenheit abhängt, wie viel Leistung zurückgestreut wird [3]. Vor allem in flachen Gewässern tritt dieser Effekt auf.

Einfluss des Projektor-Array-Öffnungswinkels

Ein wichtiger Designparameter des MIMO-SONAR-Systems ist der Öffnungswinkel bzw. die Breite der Hauptkeule des Sendearrays. Dieser ist entscheidend dafür, wie konzentriert der Schall ins Wasser gesendet wird und wie viel Energie entsprechend gegen die Wasseroberfläche oder den Boden gestrahlt wird. Dies ist in Abbildung 1 dargestellt. Der Winkel kann über die

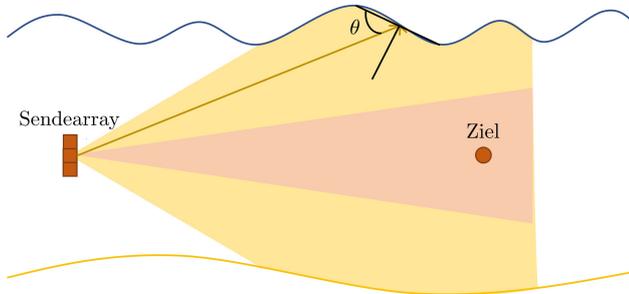


Abbildung 1: Darstellung der Öffnungswinkel zweier Array-Konfigurationen (rot besitzt mehr vertikal angeordnete Projektoren als gelb) eines MIMO-SONAR-Systems.

Anzahl an übereinander parallel geschalteten Projektoren beeinflusst werden. Je mehr Projektoren eingesetzt werden, desto mehr Leistung wird Richtung Ziel gesendet und desto geringer ist der Öffnungswinkel und somit die Rückstreuung von Wasseroberfläche und Boden. Dadurch sollte ebenfalls ein besseres SNR erzielt werden können. Jedoch ist dabei zu beachten, dass je schmaler die Hauptkeule ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass das zu detektierende Ziel verfehlt wird. Daher wird Vorwissen über das Szenario benötigt.

Simulationsumgebung

Die Entwicklung von Signalverarbeitungsmethoden für SONAR-Systeme ist aufwendig, da das Aufnehmen von Daten im Wasser zum Testen der Algorithmen sehr zeitintensiv ist. Daher wurde am Lehrstuhl für Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel eine Simulationsumgebung entwickelt, welche in das Echtzeitrahmenwerk KiRAT (Kiel Real-time Application Toolkit) eingebunden ist. In diesem werden Signale blockweise in Echtzeit prozessiert. In der Simulation wird der Unterwasserkanal möglichst realitätsnah abgebildet. Mit Hilfe dieser Simulation wurde der Einfluss verschiedener Array-Öffnungswinkel untersucht. In Abbildung 2 ist die verwendete Simulationsumgebung zu sehen. Diese hat eine Länge von 500 m, eine Breite von 500 m und eine Tiefe von 25 m. Das Send- und Empfangsarray befindet sich mittig auf einer Seite der Umgebung in einer Tiefe von 10 m. Das Sendearray ist ein gleichförmiges lineares Array (engl.: uniform linear array (ULA)), welches aus 8 bzw. 32 Projektoren besteht. Die Anzahl der in vertikaler Richtung zusammengeschalteten Projektoren variiert zwischen 3 und 31 Elementen. Das Empfangsarray ist ebenfalls ein ULA und besteht aus einer horizontalen Reihe von 32 Hydrophonen. 100 m von den Arrays entfernt und in gleicher Tiefe ist zudem

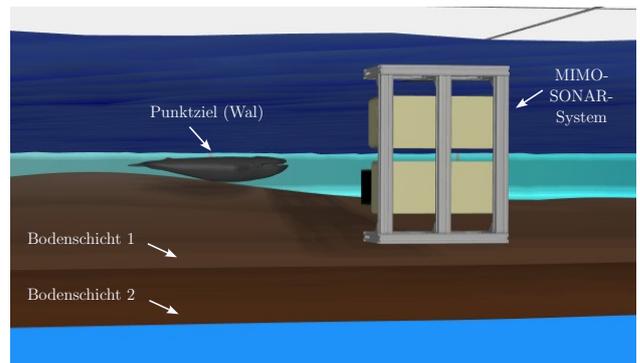


Abbildung 2: Genutzte Simulationsumgebung im Echtzeitrahmenwerk KiRAT.

ein Punktziel, das optisch als Wal dargestellt wird, platziert. Diesem Ziel kann eine Reflexionsstärke zugewiesen werden, die im simulierten Fall -10 dB beträgt. Des Weiteren wird Umgebungsrauschen simuliert. Dazu gehören unter anderem Schiffs-, Wind-, Turbulenz- und thermische Geräusche. Zudem wird die geometrische Dämpfung und die Dämpfung durch Absorption nach dem Francois-Garrison-Modell berücksichtigt.

Ein weiterer Bestandteil der Simulation sind die Wasseroberfläche und der Meeresboden. Für die Wasseroberfläche werden Wellen simuliert. Dabei können die Windgeschwindigkeit und -richtung eingestellt werden, welches einen Einfluss auf die Ausbreitungsrichtung der Wellen und deren Höhe hat. Außerdem können ein oder mehrere Bodenprofile in die Simulation geladen werden, um unterschiedliche Bodenschichten darzustellen. Um die Reflexionseigenschaften zu simulieren, werden Zufallspunkte verwendet, die in jedem Block neu generiert werden. Die Anzahl der Punkte und der Bereich, in dem sie auftreten können, sind einstellbar. In diesem Fall wurden 500 Zufallspunkte gewählt, die über eine Fläche von 100 m links und rechts der Arrays im Abstand von 20 m bis 250 m verteilt sind. Die Höhe der Punkte hängt von der jeweiligen Höhe der Wasseroberfläche bzw. des Bodens ab. Diesen kann eine individuelle Reflexionsstärke zugeordnet werden. Für die Berechnung wird ein einfaches Modell verwendet, welches als Lamberts Gesetz bezeichnet wird. Hierbei wird davon ausgegangen, dass der Schall an einer rauen Oberfläche diffus gestreut wird [2]. Die Stärke ist dabei abhängig vom Einfallswinkel, da die Streufläche mit abnehmendem Einfallswinkel größer wird, und wird laut [2] mit Hilfe von

$$\sigma(\theta) = \mu \sin^2(\theta) \quad (1)$$

und

$$BS(\theta) = 10 \log_{10}(\mu) + 10 \log_{10}(\sin^2(\theta)) \quad (2)$$

berechnet. Dabei ist σ der Streukoeffizient, μ der Lambert-Parameter, θ der Glanzwinkel (engl.: grazing angle), welcher den Winkel zwischen der Oberfläche und der einfallenden Schallwelle darstellt, und BS die Rückstreustärke. Der Lambert-Parameter μ unterscheidet sich je nach Medium. Während der Lambert-Parameter der Wasseroberfläche $\mu \approx -5$ dB ist [3], ha-

ben Sand, Schlick und Lehm $\mu \approx -15$ dB und Stein $\mu \approx -4$ dB [2]. Es werden allerdings in der Literatur unterschiedliche Werte angegeben, welche zum Teil auch frequenzabhängig sind. In dieser Publikation wird für alle Frequenzen derselbe Lambert-Parameter angenommen.

Durchführung

Für die Betrachtung des Einflusses des Projektor-Array-Öffnungswinkels auf die Leistung von MIMO-SONAR-Systemen werden verschiedene Projektor-Array-Konfigurationen simuliert. Wie oben schon erwähnt, bestehen die Arrays aus 8 bzw. 32 horizontal angeordneten Projektoren. In vertikaler Ebene werden 3, 5, 11 oder 31 Reihen übereinander geschaltet. Außerdem werden zwei Szenarien für diese Array-Konfigurationen betrachtet. Bei beiden Szenarien werden zwei Bodenschichten simuliert, wobei die erste aus Kies mit einem Lambert-Parameter von $\mu = -19$ dB und die zweite aus Sand mit $\mu = -15$ dB besteht [2]. Für die zweite Schicht wird die Dämpfung durch die obere Schicht berücksichtigt, wodurch sich $\mu = -15$ dB $- 19$ dB = -34 dB ergibt. In Szenario 1 ist nur das Umgebungsrauschen eingeschaltet, jedoch keine Reflexionen von Wasseroberfläche und Boden. Diese werden dann in Szenario 2 aktiviert. Die Zufallspunkte werden für jede Konfiguration gleich erzeugt, um eine Vergleichbarkeit herzustellen. Um einen Vergleich der Konfigurationen durchführen zu können, wird zunächst eine Maßzahl benötigt. Hierfür wurde das SNR gewählt, da dieses ein wichtiges Maß für die Performanz von SONAR-Systemen ist. Dieses wird aus den SONAR-Daten berechnet. Diese werden wiederum gewonnen, indem die ausgesendeten Signale mit der Simulationsumgebung gefaltet werden, um die Empfangssignale zu erhalten. Anschließend findet das Empfangsbeamforming statt. Hier werden die Empfangssignale für jeden Winkel, der betrachtet werden soll, verzögert, mit Hilfe eines Filters gewichtet und anschließend aufaddiert. Zudem wird auf der Empfangsseite der Sendebeamformer berechnet. Anschließend wird der Ausgang des Empfangsbeamformers mit dem des Sendebeamformers korreliert, was die SONAR-Matrix ergibt. Um die Dimensionen der entstehenden Matrix zu verringern, damit diese grafisch dargestellt werden kann, findet ein Pooling statt. Dabei wird die „MaxPooling“-Methode verwendet. Aus den Werten dieser Matrix wird das SNR mit Formel 3

$$\text{SNR} = \frac{\bar{P}_S}{\bar{P}_R} \quad (3)$$

berechnet. Dabei wird über eine vorgegebene Anzahl an Blöcken gemittelt, um ein Ergebnis zu erhalten, das robust gegenüber kurzfristigen Änderungen ist. Daher ist \bar{P}_S die gemittelte Signalleistung und \bar{P}_R die gemittelte Rauschleistung. Zunächst werden entweder über die Konfigurationsdatei oder über die Benutzeroberfläche die Bereiche der SONAR-Matrix ausgewählt, die betrachtet werden sollen. Dies ist in Abbildung 3 dargestellt. Der in pink umrandete Signalbereich reicht von -2° bis 2° mit einem Radius von 99,5 m bis 100,5 m, weil sich das

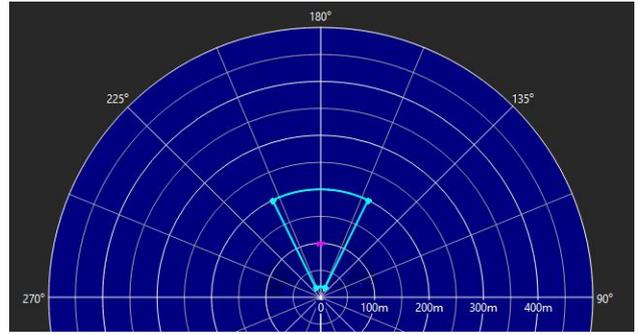


Abbildung 3: Abbildung der SONAR-Matrix in KiRAT, wobei die für die SNR-Berechnung verwendeten Bereiche blau (Rauschen) und pink (Signal) gekennzeichnet sind.

Ziel bei 0° in einer Entfernung von 100 m befindet. Der in blau umrandete Rauschbereich erstreckt sich von -26° bis 26° mit einem Radius von 20 m bis 200 m, da somit alle Beams im Simulationsbereich erfasst werden. Für die Berechnung der Signalleistung wird das Maximum des Signalbereichs verwendet. Für die Rauschleistung wird der Mittelwert aller Werte des markierten Bereichs ohne die Werte innerhalb des Signalbereichs bestimmt.

Auswertung

Zunächst wird das Szenario 1 ohne Reflexionen an Wasseroberfläche und Boden betrachtet. Zur Veranschaulichung sind die SONAR-Daten für die Konfiguration 8 x 11 in Abbildung 4 dargestellt. Tabelle 1 zeigt die für \bar{P}_S ,

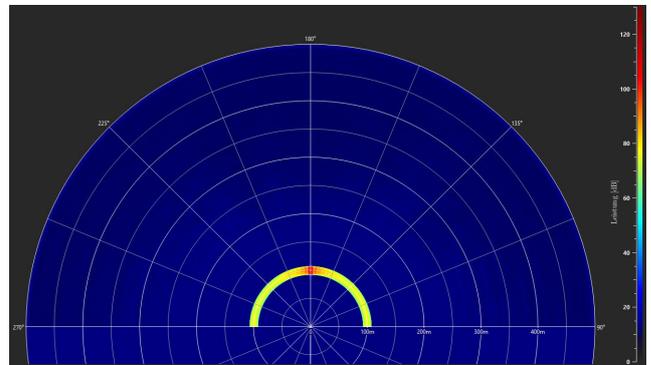


Abbildung 4: SONAR-Daten für das Szenario 1 mit der Konfiguration 8 x 11 ohne Reflexionen an Wasseroberfläche und Boden.

\bar{P}_R und das SNR über 30 s gemittelten Werte in Dezibel. Das SNR ist für alle Konfigurationen gleich. Es ändert sich jedoch die Signal- und die Rauschleistung. Da mehr Leistung ausgesendet wird, wird auch mehr Leistung vom Ziel reflektiert. Außerdem beeinflussen die Randeffekte des Beamformers die Rauschleistung. Die Plausibilität der Daten lässt sich überprüfen, indem die Signalleistung betrachtet wird. Diese muss im Verhältnis zur Anzahl der hinzugeschalteten Projektoren steigen. Dies lässt sich anhand von Formel 4 berechnen

$$\Delta \bar{P}_{S_{1,2}} = 20 \log_{10} \left(\frac{N_2}{N_1} \right). \quad (4)$$

Tabelle 1: Ergebnisse Szenario 1

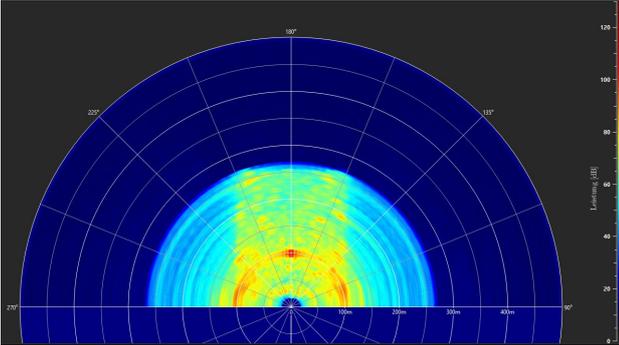
Konfig.	\bar{P}_S [dB]	\bar{P}_R [dB]	SNR [dB]
8 x 3	115	55	60
8 x 5	120	60	60
8 x 11	127	67	60
8 x 31	136	76	60
32 x 3	115	55	60
32 x 5	120	60	60

Als Beispiel werden die Konfigurationen 8 x 5 und 8 x 11 betrachtet. Für diese ergibt sich

$$\Delta \bar{P}_{S_{8 \times 5, 8 \times 11}} = 20 \log_{10} \left(\frac{11}{5} \right) \approx 7 \text{ dB.}$$

Genau dieser Wert ist in Tabelle 1 mit 127 dB – 120 dB = 7 dB wiederzufinden. Eine weitere Beobachtung ist, dass eine Vergrößerung des ULA in horizontale Richtung keine Verbesserung im SNR bewirkt.

Für Szenario 2, bei dem sowohl der Boden als auch die Wasseroberfläche reflektieren, sind die SONAR-Daten für die Konfiguration 8 x 11 in Abbildung 5 abgebildet. Die Reflexionen sind im Vergleich mit Abbildung 4 deutlich zu erkennen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt.

**Abbildung 5:** SONAR-Daten für das Szenario 2 mit der Konfiguration 8 x 11 mit Reflexionen an Wasseroberfläche und Boden.

Es ist zu erkennen, dass die Reflexionen an Wasseroberfläche und Boden eine große Störquelle darstellen. Dabei wird auch der Einfluss des Öffnungswinkels auf die Leistungsfähigkeit eines MIMO-SONAR-Systems deutlich. Vor allem bei den Konfigurationen mit einem ULA bestehend aus 8 Elementen ist der Anstieg des SNR mit zunehmender Anzahl an zusammengeschalteten Projektoren zu sehen. Hierbei lässt sich das SNR mit der Hinzunahme von 28 Senderreihen um 10 dB verbessern. Dies bestätigt die Annahme, dass die Hauptkeule in vertikaler Richtung mit zunehmender Anzahl parallel geschalteter Projektoren schmaler wird und somit die Reflexionen von Boden und Wasseroberfläche einen geringeren Einfluss haben. Besonders deutlich ist dies im Vergleich der Konfigurationen 8 x 11 und 8 x 31. Hier nimmt die Rauschleistung nur um 3 dB zu, wobei sich das SNR um 6 dB verbessert.

Tabelle 2: Ergebnisse Szenario 2

Konfig.	\bar{P}_S [dB]	\bar{P}_R [dB]	SNR [dB]
8 x 3	115	68	47
8 x 5	120	72	48
8 x 11	127	76	51
8 x 31	136	79	57
32 x 3	115	70	45
32 x 5	120	73	47

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Publikation wurden kurz das MIMO-SONAR-System und die zugehörige Signalverarbeitung vorgestellt. Außerdem wurden die Herausforderungen des Unterwasserkanals beschrieben und wie diese in einer Simulation umgesetzt wurden. Anschließend wurde anhand verschiedener Array-Konfigurationen und Szenarien eine erste Untersuchung des Einflusses des Öffnungswinkels von MIMO-SONAR-Systemen auf deren Leistungsfähigkeit durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass die Reflexionen an Wasseroberfläche und Boden einen hohen Einfluss auf das SNR haben. Dies kann erklären, warum bisher teilweise bei eigenen Messungen mit MIMO-SONAR-Systemen Schwierigkeiten auftraten. Das SNR konnte mit zunehmender Projektoranzahl verbessert werden. Allerdings erhöht sich dadurch auch die Rechenlast und die Beanspruchung der Hardware, die dafür ausgelegt sein muss. Diese Ergebnisse können als Grundlage für weitere Untersuchungen genutzt werden.

Zukünftig könnte zum Beispiel überlegt werden, ob durch eine Drehung des Öffnungswinkels in Richtung Boden ein besseres SNR erzielt werden kann, wenn die Bodenschicht weniger zurückstretet als die Wasseroberfläche, z.B. bei witterungsbedingt starkem Wellengang. Außerdem könnten weitere Maße betrachtet werden, um eine spezifischere Aussage über die Leistungsfähigkeit von SONAR-Systemen treffen zu können. Zum Beispiel könnte überprüft werden, wie gut die Entfernungs- oder Winkelauflösung zwei nahe beieinanderliegender Ziele ist. Des Weiteren kann anhand von Messungen überprüft werden, ob die Modellannahmen realitätsnah sind.

Literatur

- [1] T. Kaak, J. Abshagen, G. Schmidt: Real-time capable multiple-input-multiple-output SONAR systems - An algorithmic approach, IET Radar Sonar Navig., 985-1000, 2021
- [2] M. Ainslie: Principles of Sonar Performance Modeling, Springer Berlin, Heidelberg, 2010
- [3] R. P. Hodges: Underwater Acoustics: Analysis, Design and Performance of Sonar, John Wiley & Sons Ltd, 2010