

Numerische Simulation von Synthetic Aperture Sonar

Jan Ehrlich, Holger Schmaljohann

Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe, Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung WTD 71,
24340 Eckernförde, E-Mail: JanEhrlich@bundeswehr.org

Einleitung

Synthetisches Apertur Sonar (SAS) ist ein abbildendes Sonarverfahren, das zum Beispiel für die akustische Minenjagd unter Wasser verwendet wird. Wie ein klassisches hochfrequentes Seitensichtsonar wird es auf einen Schleppkörper oder autonomen Unterwasserfahrzeug (AUV) installiert, das sich auf möglichst gradlinigem Weg durch das Wasser bewegt und den Boden mit Sonarpulsen abtastet. Im Unterschied zum Seitensichtsonar, das mit langen Sonarantennen einen möglichst schmalen Sonarbeam erzeugt und einzeln prozessiert, werden bei der SAS-Verarbeitung alle Echos aus einer Entfernungszelle, die während der Vorbeifahrt registriert wurden kohärent aufsummiert. Dazu wird mit elektronischem Beamforming der Empfangsantenne auf die jeweiligen Zielpositionen fokussiert. Die Methode erfordert einen hohen Rechenaufwand und stellt hohe Anforderungen an die Positionsgenauigkeit des Fahrzeugs. Dafür ist die erreichbare Auflösung auf dem Boden theoretisch unabhängig von der Frequenz und wird in Fahrtrichtung nur durch die Länge der Sendeantenne bestimmt. Als Zellenlänge ergibt sich als Maximalwert die halbe Senderbreite. Somit lassen sich sehr kleine Auflösungszellen in der Größenordnung von wenigen Quadratzentimetern erreichen.

Die SAS-Verarbeitung ist jedoch sehr anfällig gegenüber Mehrwegeausbreitung. Insbesondere bei glatter Meeresoberfläche kommt es zu kohärenter Reflexion von Schallstrahlen an der Meeresoberfläche und somit zu Mehrwegeausbreitung, die bei stark reflektierenden Objekten zu Schattenzielen führt und generell zur Reduzierung bis hin zum Verlust der Kohärenz führt, die für die SAS-Verarbeitung erforderlich ist.

Es werden SAS Messungen der WTD 71 mit einem AUV der Firma Atlas Elektronik präsentiert, bei denen starke Mehrwegeeffekte zu erkennen waren. Um dieses beispielhaft zu erklären, wurde eine numerische Modellierung für die Bilder eines zylindrischen Körpers aus der Messkampagne bei zwei unterschiedlichen Frequenzen durchgeführt.

SeaOtter Mk II AUV mit Triple-Frequenz SAS

Die Messungen, die im folgenden Kapitel gezeigt werden, erfolgten mit dem AUV SeaOtter Mk II der WTD 71, das mit einem Drei-Frequenz SAS System ausgerüstet war.

Das ursprüngliche SAS System VISION 1200 von Atlas Elektronik [1] besteht aus zwei unterschiedlichen SAS Sonaren, einem hochfrequenten Sonar (HF) mit einer Mittenfrequenz von $f_{c,HF} = 150\text{kHz}$ und einem mittelfrequenten Sonar (MF) mit einer Mittenfrequenz von $f_{c,MF} = 75\text{kHz}$. Für die Tests war ein drittes, tieffrequentes Sonar

(LF) mit einer Mittenfrequenz von $f_{c,LF} = 20\text{kHz}$ installiert. Das tieffrequente Sonar wurde gewählt, um für die Suche nach versunkenen Grundminen in den Boden hinein schauen zu können. Das SeaOtter Mk II AUV mit den drei Sonaren wird in Abbildung 1 gezeigt.

Die Rohdaten von diesem System wurden sowohl in einem on-board SAS Prozessor im Fahrzeug als auch off-line in einem PC verarbeitet. Dazu wurde ein Algorithmus verwendet, der auf den Arbeiten von M. Pinto und A. Belletini vom NATO Centre for Maritime Research and Experimentation (CMRE) basiert [2]. Diese Verarbeitung wurde für die hier gezeigten Untersuchungen verwendet.

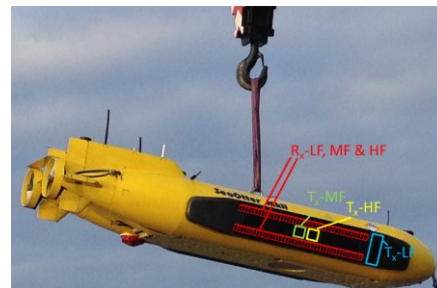


Abbildung 1: SeaOtter MkII AUV ausgerüstet mit einem interferometrischen VISION1200 Synthetic Aperture Sonar mit zusätzlicher LF Komponente

Messungen

Die hier vorgestellten Messungen wurden am 25.11.2014 während eines Sonartests in der Eckernförder Bucht in einem vorher angelegten „Minengarten“ durchgeführt, in dem verschiedene minenartige Testobjekte ausgelegt waren. Während der Mission bewegte sich das AUV in einer Tiefe von etwa 12 m bei einer Wassertiefe von 17 m. Wegen des geringen Windes und einer sehr glatten Meeresoberfläche war es sehr wahrscheinlich, dass die Messungen durch kohärente Mehrwegeausbreitung behindert sein würden. Für die Messungen wurden das mittelfrequente und das tieffrequente Sonar betrieben, die in etwa die gleichen Entfernungsbereiche abgetastet haben. Deswegen sind beide Datensätze unter den gleichen Umweltbedingungen entstanden. Für diese Untersuchung wurden die Bilder von einem zylindrischen Objekt ausgewählt, das parallel zur Fahrtrichtung des AUV in 22,7 m Entfernung lag. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der SAS-Aufnahmen des mittelfrequenten-Sonars mit dem direkten Bild des Objekts und zwei weiteren Bildern, die durch Mehrwegeausbreitung entstanden sind.

Abbildung 3 zeigt die Echos des Objekts noch einmal vergrößert und farblich anders codiert. Auf beiden Bildern sind bei 22,7 m die Echos des direkten Pfads zu erkennen.

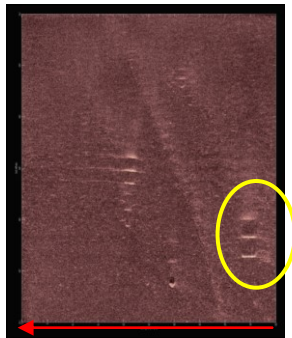


Abbildung 2: SAS Bild des mittelfrequenten Sonars mit dem näher betrachteten zylindrischen Objekt in der unteren rechten Ecke, parallel zur Fahrtrichtung des AUVs in 22,7 m Entfernung.

Bei 26,5 m liegen die Echos eines Mehrwegepfads über die Oberfläche. Der weitere Mehrwegepfad bei etwa 30 m ist in den MF Daten klar zu erkennen, wobei er in den LF Daten nur ansatzweise zu erkennen ist, vermutlich wegen des geringeren Signal-zu-Rausch Verhältnisses. Dafür sieht man im LF Signal eine schwache Reflexion von der Rückseite des Zylinders, da die Welle bei der geringeren Frequenz nicht vollständig von der Frontfläche reflektiert wird.

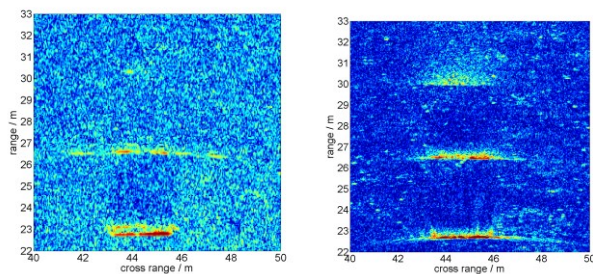


Abbildung 3: Vergrößerte SAS Bilder des zylindrischen Objekts (links: LF, rechts: MF). Der farblich codierte Dynamikumumfang der Bilder beträgt jeweils 40 dB.

Modellierung

Die Sonarbilder wurden mit einem numerischen Modell auf Basis von Raytracing modelliert. Dazu wurde das Modell MSM (Minehunting Software Modell) verwendet, das von E. Krömer von Atlas Elektronik und D. Kraus von der Hochschule Bremen (City University of Applied Sciences, Instituts für Wasserschall, Sonartechnik und Signaltheorie) zur Analyse und Design von Minenjagdsonaren [3]. entwickelt wurde Für das Raytracing nutzt MSM den Ansatz des dynamischen Raytracings nach Cerveny [4] oder des Gaussian Beam Tracing. MSM ist ein zweidimensionales Modell über Range und Tiefe, das im Frequenzbereich arbeitet, aber Bandbreiteneffekte mit berücksichtigt. Der MSM-Code hat einen modularen Aufbau, der es erlaubt, verschiedene Submodelle für die Interaktion mit Boden und Wasseroberfläche zu integrieren. Das hier verwendete Modell wurde vom Applied Physics Laboratory of the University of Washington erstellt und ist allgemein als APL-UW Modell bekannt [5]. Es basiert auf physikalisch begründeten Annahmen für die Interaktion des

Schalls mit den Grenzflächen und gilt allgemein als zuverlässig für hohe Frequenzen.

Ein besonderer Focus von MSM ist die Modellierung des bistatischen Nachhalls. Das Modell berechnet alle Eigenpfade vom Sonar zu einem gegebenen Ziel bis zu einer einstellbaren Ordnung und berechnet auf allen resultierenden Pfaden für Hin- und Rückweg die bistatische Streuung am Ziel. Für die bistatische Streuung wird das Modell von Ellis and Crowe [6] verwendet.

Obwohl die konventionelle Sidescan Verarbeitung als auch die SAS Verarbeitung wurden mit MSM modelliert. Für die erste wurde die Rechnung mit dem physikalischen 3dB-Öffnungswinkel von 30° für den MF-Sender und 37° für den LF-Sender gemacht (jeweils für die Mittenfrequenz). Für die SAS-Verarbeitung wurde eine von der Frequenz unabhängige, konstante Zellenbreite von 2 cm für die synthetische Apertur angenommen. Die Auflösung in Range betrug durch Pulskompression des Sonarsignals 2,5 cm für MF und 5 cm für LF.

Die Modellierung des Nachhalls von Boden und Oberfläche wurde mit der Standard Raytracing Formulierung realisiert, die den Raum mit Schallstrahlen füllt und die rückgestreute Energie von Oberfläche und Boden aus den jeweiligen Reflexionshistorien der Strahlen berechnet. Für die Reflexionen vom Ziel wurde der parallel zur Fahrtrichtung des AUVs liegende Zylinder als Zylinderscheibe modelliert, die in einzelnen Facetten diskretisiert wurde.

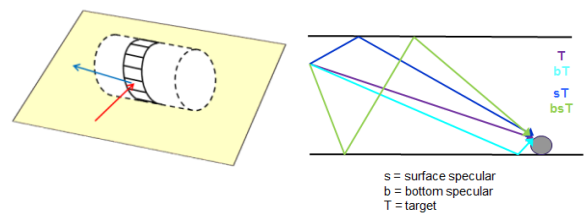


Abbildung 4: Links: Prinzipskizze des Zylinders, von dem ein Ring mit Facetten diskretisiert wurde. Rechts: Schema der Mehrwegeausbreitung zum Zylinder. Die einzelnen Wege werden über ihre Reflexionshistorie benannt

In Abbildung 4 wird das Prinzip der Diskretisierung eines Rings des Zylinders dargestellt, sowie die unterschiedlichen Wege, die vom Sonar zum Zylinder führen. Der direkte Weg zum Zylinder wird mit „T“ bezeichnet (für Target). Die anderen Wege erhalten ein „s“ oder „b“ (für surface reflection oder bottom reflection), vor dem „T“.

Für alle Facetten, die vom Sonar erreicht wurden, wurden alle Kombinationen der Eigenstrahlen auf den Hin- und Rückweg ausgewertet und der jeweilige rückgestreute Schall zeitlich korrekt sortiert kohärent aufaddiert. Die Streustärke der Reflexion von den Facetten wurde mit einer Helmholtz-Kirchhoff Näherung bestimmt. Dabei kam eine analytische Näherung für die Streuung an einer rechtwinkligen, ebenen Platte zur Anwendung, die es ermöglicht, große Facetten unabhängig von der Wellenlänge des Schalls zu verwenden [7]. Die Streustärke hängt dabei nur von der Plattengröße, dem Einfallswinkel und Ausfallswinkel des Schalls und dem

Ergebnisse der SAS-Verarbeitung

Die Modellierung der synthetischen Apertur Verarbeitung stellt zusätzliche Anforderungen. Aufgrund der virtuellen Antenne mit wählbarer Länge wird die horizontale Antennenkeule sehr schmal im Vergleich zum Sidescan Sonar. Für die Verarbeitung wurde unabhängig von der Range-Entfernung eine Auflösung von 2 cm in Fahrtrichtung des AUVs gewählt. Das bedeutet, dass mit zunehmender Entfernung eine höhere Anzahl von Pings aufsummiert werden muss, um eine konstante Auflösung behalten zu können. Somit steigt die Intensität mit der Entfernung, was den Effekt der steigenden Ausbreitungsdämpfung ausgleicht.

In Abbildung 8 ist dieser Effekt in den gemessenen SAS-Daten auf der linken Seite zu sehen. Für das tieffrequente Sonar ergibt sich sogar ein Anstieg für höhere Entfernungen. Die Daten der SAS Modellierung auf der rechten Seite können dies jedoch nicht vollständig nachbilden. Zudem gibt wieder einen Offset zwischen Messdaten und simulierten Daten, hier allerdings mit 20 dB geringer als in der Sidescan Verarbeitung.

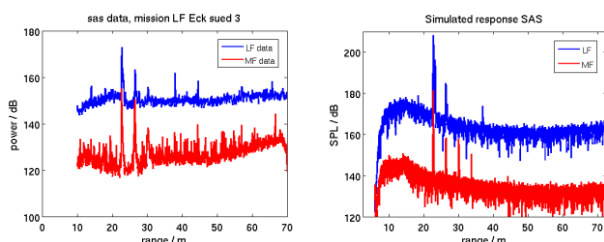


Abbildung 8: Links: SAS Verarbeitung- der Sonar Returns über der Range Entfernung für das MF Sonar (rot) und das LF Sonar (blau), Rechts: Simulierte SAS Daten für einen Ping querab zur Mitte des Zylinders über Range

Um die Zunahme der Intensität mit des vom Boden rückgestreuten Signals mit der Entfernung zu simulieren wurde ein Korrekturterm von $20 \cdot \log_{10}(N \cdot r)$ verwendet. Dabei sind r die Entfernung in Range und N die Anzahl der addierten Pings, die sich aus $N = L_{SA} \cdot prf / v_{AUV}$ ergibt. L_{SA} ist die Länge der synthetischen Antenne, prf die Puls wiederholrate und v_{AUV} die Geschwindigkeit des AUVs. Die nötige Länge der synthetischen Antenne wird durch die gewünschte Auflösung in Fahrtrichtung dx , die Wellenlänge λ und die Range r bestimmt als $L_{SA} = \lambda / 2 \cdot dr \cdot r$. Mit dieser Korrektur für die SAS Verarbeitung konnte eine relativ konstante Intensität über der Entfernung erreicht werden. Es bleibt jedoch ein Peak im Bereich zwischen 10 m und 20 m.

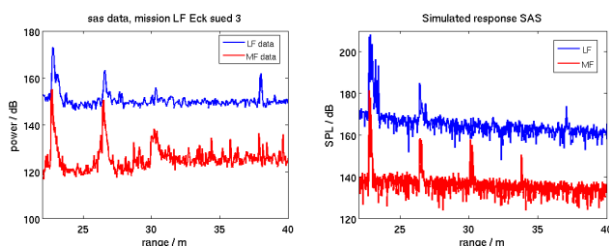


Abbildung 9: Vergrößerung des Bereichs von 20 m bis 40 m aus Abbildung 8 für die SAS Verarbeitung (links: Messdaten, rechts: Simulation).

Außerdem scheint die Simulation den ersten Peak zu überschätzen, wie in der Vergrößerung der Entfernung zwischen 20 m und 40 m in Abbildung 9 zu sehen ist. Ansonsten wird die Peakstruktur in der Simulation gut wiedergegeben, wiederum mit der Einschränkung, dass die Peaks in der Messung breiter sind als in der Simulation.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden Minenjagd Messungen parallel mit einem mittelfrequenten und einem tieffrequenten synthetischen Apertur Sonar Vision 1200 an einem AUV SeaOtter MkII präsentiert. Die Messungen zeigten eine starke Mehrwegeausbreitung, die zu zusätzlichen Zielechos geführt hat. Am Beispiel eines zylindrischen, minenartigen Körpers auf dem Meeresboden wurde die SAS Signalverarbeitung und die klassische Sidescan Sonar Verarbeitung mit dem numerischen Raytracing Simulationsmodell MSM simuliert. Die generelle Peakstruktur durch die Mehrwegeausbreitung konnte in der Simulation reproduziert werden. Die hohe Intensität der Mehrwegepeaks konnten jedoch nicht vollständig erklärt werden. Eine Verfeinerung der Modellierung, die die große Bandbreite der Sonare mit einbezieht und gemessene Beampattern der Sonare berücksichtigt, könnte weitere Verbesserungen bringen. Zudem kann die Modellierungsmethode weiter ausgebaut werden zu einem echten dreidimensionalen SAS Szenengenerator ausgebaut werden.

Literatur

- [1] J. Groen et al., Synthetic aperture sonar fusion for images with dissimilar physical content due to differences in acoustic frequency, Proceedings of the 3rd Underwater Acoustics Conference, 121-128, 2015
- [2] M. Pinto and A. Belletini, Design and Experimental Results of a 300-kHz Synthetic Aperture Sonar optimized for Shallow-Water Operation, IEEE Journal of Oceanic Engin. 34 (2009), 285-293
- [3] J. Ehrlich, Calculations for scenario A1 with the MSM code, Proc. IOA, Vol. 32. Pt 2. 2010
- [4] V. Cerveny, Ray tracing algorithms in three-dimensional laterally varying layered structures, in *Seismic Tomography*, ed. G. Nolet, Reidel, Boston, 1987.
- [5] APL-UW High-Frequency Ocean Environmental Acoustic Models Handbook, APL-UW TR9407, AEAS 9501, Seattle, 1994
- [6] D.D. Ellis, D.V. Crowe, Bistatic reverberation calculations using a three-dimensional scattering function, J. Acoust. Soc. Am., 89 (1991), 2207-2214
- [7] B. Nolte et al., Numerical Methods for wave scattering phenomena by means of different boundary integral formulations, J. Comp. Acoust. 15 (2007), 495
- [8] L.M. Brekhovskikh, Waves in Layered Media, Academic Press, New York, 1980