

## Untersuchungen zur Zielverfolgung bei der Detektion von Tauchern

Dietmar Stiller

WTD 71, Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik,  
Berliner Straße 115, 24340 Eckernförde, Deutschland, Email: dietmarstiller@bundeswehr.org

### Einleitung

Schiffe und Einrichtungen in Häfen können durch Angreifer aus dem Unterwasserbereich bedroht werden. Mögliche Angreifer sind Taucher mit und ohne Schwimmhilfe oder auch autonome bzw. ferngesteuerte Unterwasserfahrzeuge. Zwei gemeinsame Eigenschaften dieser Zieltypen sind die geringe Zielgeschwindigkeit und das geringe Zielmaß. Diese Eigenschaften erschweren die Detektion neben den sich örtlich und zeitlich verändernden Ausbreitungsbedingungen, die wesentlich durch die vertikal inhomogene Schallgeschwindigkeit  $c$  im Wasser beeinflusst werden. Zur Ortung wird als Überwachungssensor ein Sonar eingesetzt, das mit einem Zielverfolgungsalgorithmus Zielspuren von Tauchern bildet.

Für die Reduktion der verbleibenden Falschalarme auf Trackebene ist die Betrachtung eines separaten Zielverfolgungssonars, ähnlich dem Radarbereich möglich. Das Zielverfolgungssonar soll dabei die Fähigkeit zum sendeseitigen Beamforming besitzen, um den Nachhall zu reduzieren. In diesem Beitrag werden die Eigenschaften eines solchen Zielverfolgungssonars in Verbindung mit geeigneten Sendepulsen dargestellt.

### Überwachungssonar

Als Sensor für die Überwachung des Unterwasserbereichs wurde ein aktives hochfrequentes Sonar in einer Hafenumgebung verwendet. Zwar werden zur Detektion unter Wasser auch passive akustische Verfahren eingesetzt, allerdings werden bei Tauchern mit einem geschlossenem Atemgerät nur sehr geringe Reichweiten erreicht.

Da die Bedrohung im Hafen und auf Reede permanent besteht, ist eine durchgehende Überwachung erforderlich. Durch die extremen Flachwasserbedingungen im Hafen treten bei der aktiven Ortung sehr viele Falschalarme auf. Zudem ist die Reichweite stark von den variablen Umgebungsbedingungen abhängig und entzieht sich damit teilweise der Beeinflussung durch das Systemdesign [1]. An das Gesamtsystem werden sehr hohe Anforderungen bezüglich einer möglichst geringen Falschalarmrate gestellt, weil eine weitgehend automatisierte Überwachung angestrebt wird. Auch unter der Verwendung fortschrittlicher Tracking-Algorithmen [2] werden im Dauerbetrieb Falschtracks extrahiert. Die Verwendung von Zieleigenschaften innerhalb des Tracking-Verfahrens zur Verringerung der Anzahl an Falschtracks kann zur Verringerung der Anzahl an Falschtracks herangezogen werden [3]. Dazu bieten sich Sendepulse mit einer geschwindigkeitssensitiven Mehrdeutigkeitsfunktio-



Abbildung 1: Überwachungssonar Cerberus Mod2.

on an. Mit marktverfügbaren Sonaren lassen sich solche Sendepulse häufig nicht abstrahlen, was hier in Verbindung mit sendeseitigem Beamforming zur Konzeption eines Zielverfolgungssonars führt.

### Zielverfolgungssonar

Die Signalverarbeitungskette des Zielverfolgungssonars ist in Abbildung 2 mit der Verbindung zum Überwachungssonar dargestellt.

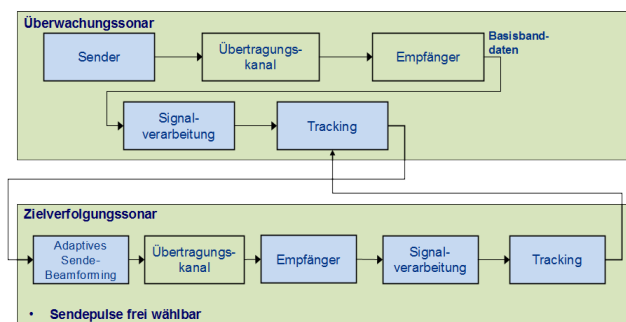


Abbildung 2: Blockschaftbild der Signalverarbeitungskette mit Kombination von Überwachungssonar und Zielverfolgungssonar.

Die aus dem Überwachungssonar gebildeten Tracks werden für das adaptive Sendebeamforming des Zielverfolgungssonars genutzt. Zur Richtungsmessung und zur Verringerung des Einflusses von Nachhall bzw. Umgebungsruschen ist eine hohe azimutale Auflösung erforderlich. Diese wird durch die Verwendung von vielen Antennenelementen erreicht. Dies gilt ebenso für die Richtungsbildung auf der Empfangsseite. Um bei hoher Bandbreite ausreichend Sendeenergie abstrahlen zu können, wer-

den häufig Pulse mit guten Autokorrelationseigenschaften verwendet. Daraus resultiert mit der Matched Filterung eine hohe Auflösung für die Radialentfernung, die notwendig ist, um Ziele mit sehr kleinem Zielmaß detektieren zu können. Eine hohe Radialauflösung ist ebenfalls notwendig, um Merkmalen zur Klassifikation extrahieren zu können.

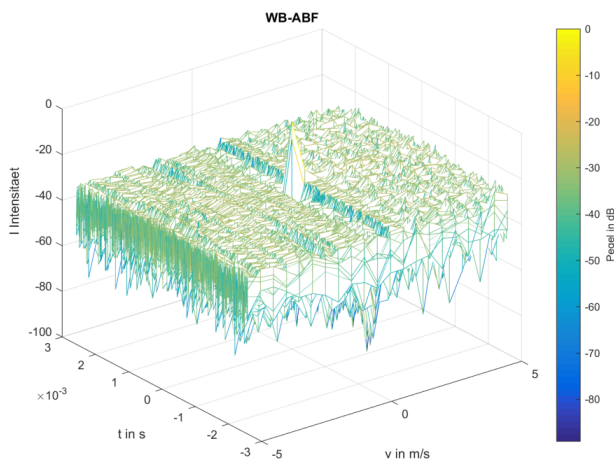
## Sendesignale

Das wichtigste Kriterium für das Sendesignal  $s(t)$  sind gute Eigenschaften in der Mehrdeutigkeitsfunktion. Diese ist unter Berücksichtigung der für den Sonar-Bereich häufig nicht zutreffenden Näherung  $BT \ll \frac{c}{2v_r}$  als Breitband Ambiguity-Funktion wie folgt definiert [5]. Dabei ist  $B$  die Bandbreite des verwendeten Signals,  $T$  die Sendesignaldauer,  $c$  die Ausbreitungsgeschwindigkeit und  $v_r$  die radiale Zielgeschwindigkeit. Bei der Breitband Ambiguity-Funktion wird der Doppler-Effekt durch eine Skalierung berücksichtigt:

$$W_{WB}(\tau, \alpha) = \frac{1}{2\pi} \int s(t)s^*(\alpha(t + \tau)) dt \quad (1)$$

Dabei wird der Skalierungsfaktor  $\alpha = \frac{1}{1 \pm \frac{2v_r}{c}}$  durch die Ziel- und die Ausbreitungsgeschwindigkeit bestimmt.

Als Beispiel für einen Pulstyp mit einer nadelförmigen Mehrdeutigkeitsfunktion kann eine Pseudo-Noise (PN) Sequenz verwendet werden. Diese wird als digitale Folge mit Hilfe von rückgekoppelten Schieberegistern gebildet. In Abbildung 3 ist die Ambiguity-Funktion ( $W_{WB}$ ) einer PN-Sequenz dargestellt. Die Folge ist mit  $N = 10$  Schie-

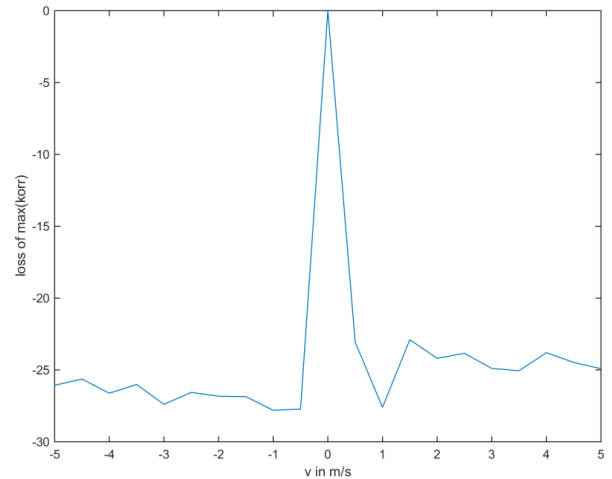


**Abbildung 3:** Ambiguity-Funktion ( $W_{WB}$ ) einer PN-Sequenz ( $N=10$ ).

beregistern berechnet worden und besitzt eine Länge von  $M = 2^N - 1$ . Zur Rückkopplung wird das Signal nach den Verzögerungselementen 3 und 10 abgegriffen, um eine Folge mit guten Eigenschaften der Mehrdeutigkeitsfunktion zu erzeugen. PN-Sequenzen ermöglichen auch einen mehrfachen Zugriff auf den Übertragungskanal, die Separierung erfolgt über unterschiedliche Codes. Es wird

also ein CDMA-Ansatz (Code Division Multiple Access) verfolgt.

Aus Gleichung 1 ergibt sich als Schnitt durch die Ambiguity-Funktion für alle Zielgeschwindigkeiten für eine PN-Sequenz der in Abbildung 4 dargestellte Verlauf des Korrelationsmaximums. LFM Signale sind nicht ex-



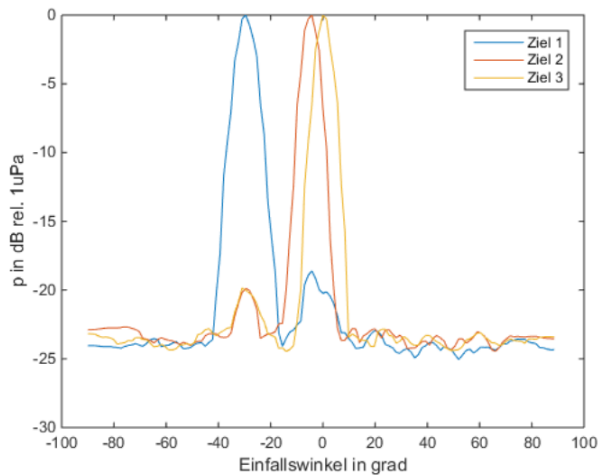
**Abbildung 4:** Schnitt durch die Ambiguity-Funktion ( $W_{WB}$ ) einer PN-Sequenz für alle Zielgeschwindigkeiten.

plizit als dopplereempfindliche Signale ausgelegt, aber der Effekt ist deutlich vorhanden, wie in Abbildung 4 dargestellt. Die Nutzbarkeit der Dopplerabhängigkeit des LFM in Messungen wird im nächsten Abschnitt beschrieben. Neben LFMs existieren auch andere dopplereempfindliche Sendesignale, die einerseits der Bedingung guter Autokorrelationseigenschaften genügen und andererseits auch eine Geschwindigkeitsschätzung ermöglichen. Bei diesen Signalen ist die Dopplereempfindlichkeit ein wichtiges Kriterium des Signaldesigns [6].

## Sendebestrahmung

Der Nachweis der Nutzbarkeit der PN-Sequenzen für das sendeseitige Beamforming wird über Simulationen mit einem einfachen Kanalmodell (AWGN) vorgenommen. Es werden 32 Sendekanäle und ebenso viele Empfangskanäle angenommen. PN-Sequenzen mit den Parametern des vorangegangenen Abschnitts werden verwendet. Es ergibt sich für die Annahme von 3 Zielen mit den Peilungen  $-30^\circ$ ,  $-5^\circ$  und  $0^\circ$  der in Abbildung 5 dargestellte Verlauf der Richtwirkung am Empfänger nach der Matched Filterung.

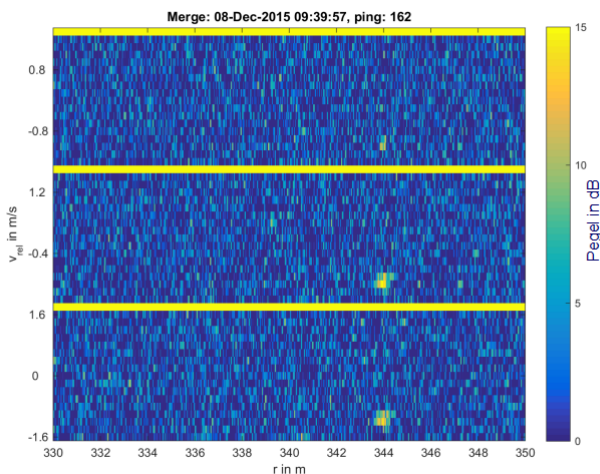
Die Nebenpegelunterdrückung von zwei unterschiedlichen PN-Sequenzen entspricht dem aus der Mehrdeutigkeitsfunktion zu erwartenden Wert von etwa 20 dB. Eng benachbarte Ziele sind über den CDMA-Ansatz trennbar, was bei einer Verwendung von z.B. HFM nicht möglich wäre. Ist nur ein Ziel im Überwachungsbereich vorhanden, kann ein HFM für die Zielverfolgung eingesetzt werden. Allerdings können die Vorteile der direkten Geschwindigkeitsmessung, wie sie durch die Ambiguity der PN-Sequenzen möglich sind, nicht genutzt werden.



**Abbildung 5:** Verlauf der Richtwirkung mit 3 Zielen in einem AWGN-Kanal mit einem SNR von 0 dB am Empfänger.

## Messungen

Ohne Sendebestimmung konnten Ortungsversuche mit PN-Sequenzen durchgeführt werden. Zur Ortung von Tauchern werden die Sendesignale ausgesendet und die Rückstreuungen entsprechend des Blockschaltbildes aus Abbildung 2 ausgewertet. Der Übertragungskanal gleicht einem frequenzselektiven Mehrwegekanal. In jeder Pulsperiode wird für gesamte Empfangszeit  $T$  die Ambiguity-Funktion berechnet. Dabei lässt sich die maximale Entfernung  $R$  über die Beziehung  $R = c \frac{T}{2}$  bestimmen. Beispielhaft ist hier ein Ergebnis eines solchen Experiments dargestellt. In Abbildung 6 sind die Rückstreuungen eines Ziels über der Entfernung  $r$  und der Radialgeschwindigkeit  $v_{rel}$  für drei Einfallswinkel dargestellt.



**Abbildung 6:** Messung mit PN-Sequenz. Rückstreuung über Entfernung und Radialgeschwindigkeit für drei Winkel.

Die Analyse der Rückstreuungen mit der Ambiguity-Funktion ist dabei nach Betrachtung der Gleichung 1 äquivalent zur Analyse mit einer Filterbank von Matched-Filtern, bei denen der Doppler-Effekt durch Skalierung berücksichtigt wird. Aus der Verwendung der

Dopplerfilterbank ergibt sich als Basis für die Ermittlung von Zieleigenschaften nicht nur die Entfernungs- und Richtungsebene, sondern auch die Entfernungs- und Radialgeschwindigkeitsebene.

## Zusammenfassung und Ausblick

Eine Ortung von Tauchern ist auch mit codierten Folgen möglich. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass mit Hilfe eines CDMA-Ansatzes beim sendeseitigen Beamforming die räumliche Trennung von benachbarten Zielen möglich ist. Darüber hinaus können Zieleigenschaften, die mit der Ambiguity-Funktion berechnet werden, für die Zielspur-Generierung genutzt werden. Die Erstellung eines prototypischen Zielverfolgungssonars ist geplant, um das adaptive Sendebestimmung bei Messungen berücksichtigen zu können.

## Literatur

- [1] Urick, J.: Principles of Underwater Sound, 3d ed., McGraw-Hill, New York, 1983.
- [2] Blackman, S., Popoli, R.: Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artech House, Boston, 1999.
- [3] van Keuk, G., Multihypothesis Tracking using Incoherent Signal-Strength Information, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 32, No. 3, 1996.
- [4] Cohen, L.: Time-Frequency-Analysis, Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- [5] van Trees, H.: Detection, Estimation, and Modulation Theory, Part III, Wiley-Interscience, New York, 2001.
- [6] Levanon, N.: Radar Signals, Wiley-Interscience, New Jersey, 2004.