

## Detektion und Tracking von Tauchern

Dietmar Stiller

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

### Einleitung

Die Einheiten unserer Marine sind im Rahmen von Einsätzen in Häfen und auf Reede einer zunehmenden asymmetrischen Bedrohung ausgesetzt. Die Detektion im Unterwasserbereich wird mit einem aktiven hochfrequenten Experimentalsonar untersucht. Mit Hilfe der Signalverarbeitung wird die Falschalarmrate reduziert, und durch einen Zielverfolgungsalgorithmus werden die Zielspuren generiert. Die asymmetrische Bedrohung von Schiffen kann im Bereich unter Wasser zum Beispiel durch Taucher (mit und ohne Verbringungsgerät), durch AUVs (Autonomous Underwater Vehicle) oder auch durch Mini-Uboote erfolgen. Der schwierigste Bedrohungstyp ist ein Taucher, da er sich am langsamsten fortbewegt und das kleinste Zielmaß besitzt.

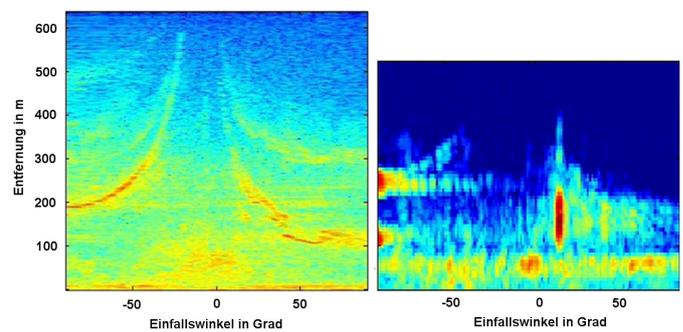
Als Sensor für die hier vorgestellten Detektionsversuche im Hafengebiet wurde ein aktives hochfrequentes Sonar verwendet. Es handelt sich um ein Fächerlot, das speziell für die Taucherdetektion angepasst wurde. Um Ziele mit sehr kleinem Zielmaß detektieren zu können, werden Sonare mit hoher Auflösung benötigt. Die Entfernungsauflösung wird durch eine hohe Bandbreite des Sonars vergrößert. Eine möglichst gute Richtungsauflösung wird durch eine hohe Anzahl an Antennenelementen erreicht.

Da die Bedrohung im Hafen und auf Reede permanent besteht, ist eine durchgehende Überwachung der Lage erforderlich. Durch die extremen Flachwasserbedingungen im Hafen und auf Reede treten bei der aktiven Ortung sehr viele Falschalarme auf. An das Gesamtsystem werden sehr hohe Anforderungen bezüglich einer möglichst geringen Falschalarmrate gestellt, um die Überlastung des Operators in dieser Situation zu verhindern. Gleichzeitig wird eine möglichst hohe Detektionssicherheit angestrebt. Die Reichweite ist allerdings stark von den variablen Umgebungsbedingungen abhängig und entzieht sich damit teilweise der Beeinflussung durch das Systemdesign.

### Signalverarbeitung

Ein wesentliches Element im Systemdesign sind die verwendeten Sendesignaltypen. Es wurden ein Linear Frequenz Modulierter Puls (LFM), bei dem die Frequenz während der Pulsdauer ansteigt, abwechselnd mit einem längeren Puls konstanter Frequenz (CW) eingesetzt. Der LFM-Puls wird zur genauen Lokalisierung, der CW-Puls durch Bildung einer Moving Target Likelihood (MTL) zur Unterdrückung nicht bewegter Ziele verwendet (siehe Abbildung 1 rechts). Dargestellt sind die Rohdaten aus einem Hafenversuch nach dem Beamforming. Die Kurven

starker Rückstreuung in der linken Abbildung werden durch die Berandung des Hafenbeckens erzeugt. Die Ellipse starker Rückstreuung in der rechten Abbildung wird durch den sich bewegenden Taucher hervorgerufen. Anschließend werden die Daten zusammengefasst und zur Detektion einer speziellen Form der Schwellwertentscheidung (Page-Test) unterzogen, der Mehrwegeausbreitung berücksichtigt.



**Abbildung 1:** Rohdaten beider Signalanteile nach Richtungsbildung. LFM (links) und MTL (rechts).

Ergänzend zum stationären Einsatz in Häfen ist bei Experimenten auf Reede eine Bewegungskompensation durchzuführen. Diese kann auf Rohdatenebene oder auch auf Ebene der Kontaktdaten durchgeführt werden. Bisher ist die Bewegungskompensation auf Kontaktebene realisiert worden.

### Tracking

In der Signalverarbeitungskette schließt sich an die Detektion die Zielverfolgung an. Dabei werden die Detektionsergebnisse zeitlich aufeinander folgender Lotperioden kombiniert. Der Zielverfolgungsalgorithmus reduziert die große Anzahl an möglichen Zielspuren auf diejenigen Zielspuren, die dem gewählten Dynamikmodell entsprechen und denen mehrere Messungen zugeordnet werden können. Für jede Zielspur wird eine Kalman-Filterung zur Minimierung des Fehlers durchgeführt. Das Filterergebnis beeinflusst die Bildung und die Aufrechterhaltung der Zielspur.

Das Ziel der gesamten Verarbeitungskette ist es, möglichst nur Zielspuren von eindringenden Tauchern zu erhalten und keine falschen Zielspuren aus den übrigen Detektionen zu bilden.

In der nachfolgenden Abbildung ist der prinzipielle Aufbau eines Tracking-Systems dargestellt.

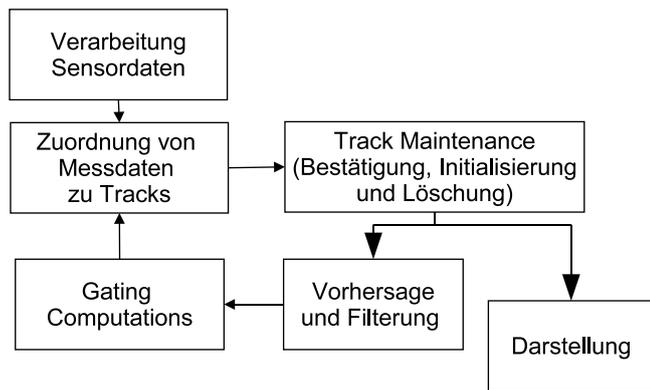


Abbildung 2: Prinzipieller Aufbau eines Multi-Target-Tracking Systems nach [3].

Zwei wichtige Schritte beim Tracking sind Prädiktion und Filterung. Diese werden für jeden Zustandsvektor  $z$  mit der Menge aller bis dahin vorliegenden Messwerte  $Y^k$  geschätzt:

$$\text{Prädiktion: } p(z_{k-1}|Y^{k-1}) \xrightarrow{\text{Zieldynamik}} p(\tilde{z}_{k-1}|Y^{k-1})$$

$$\text{Filterung: } p(\tilde{z}_{k-1}|Y^{k-1}) \xrightarrow{\text{Sensormodell}} p(z_k|Y^k)$$

Beim Multi-Hypothesen-Tracking wird prinzipiell die Zuordnung zwischen allen Kontakten einer Lotperiode (Messungen) zugelassen. Jede Messung wird als Hypothese für die potentielle Bildung eines Tracks betrachtet. Jede Hypothese wird mit einer Wahrscheinlichkeit ausgestattet, die praktisch durch die Mahalanobis-Distanz zwischen Messung  $y_k$  und prädizierter Zustandsschätzung  $z_{k-1}$  aus der vorangegangenen Lotperiode berechnet wird[1]. Dabei findet ein Individual-Gating statt, d.h. die Mahalanobis-Distanz zwischen Messung und prädizierter Zustandsschätzung der entsprechenden Hypothese bestimmt, ob eine neue Messung der bestehenden Hypothese zugeordnet wird oder nicht. Die Schwelle für das Gating  $\lambda^2$  lautet:

$$\left(y_k^j - \mathbf{H}z_{k-1}^i\right)^T \mathbf{G}^{-1} \left(y_k^j - \mathbf{H}z_{k-1}^i\right) < \lambda^2, \quad (1)$$

Dabei wird die sogenannte Innovationskovarianzmatrix  $\mathbf{G}$  berechnet durch  $\mathbf{G} = \left(\mathbf{H}\hat{\mathbf{P}}_{k-1}^i\mathbf{H}^T + \mathbf{R}\right)$ . Sowohl die Messmatrix  $\mathbf{H}$  als auch Fehlerkovarianzmatrix der Messungen  $\mathbf{R}$  werden als konstant angenommen. Der Parameter  $\lambda^2$  wird empirisch festgelegt. Der Index  $k$  ist der Index für die diskrete Zeit. Der Index  $i$  bezeichnet die betrachtete Messung zum Zeitpunkt  $k$ , der Index  $j$  bezeichnet die betrachtete Hypothese. Die Interpretation des Gatings als die Zuordnung einer Messung mit der Wahrscheinlichkeit Null zu einer Hypothese ist insofern auch nach dem Bayesschen Formalismus sinnvoll und vermindert den Rechenaufwand.

Darüber hinaus werden weitere Methoden zur Verhinderung eines kombinatorischen Desasters angewendet. Nahe aneinander liegende Tracks, d.h. Tracks deren mittlere Zustandsgrößen sehr nah aneinander liegen, werden zusammengeführt. Diese Zusammenführung wird als „Mer-

ging“ bezeichnet. Außerdem werden Hypothesen mit zu geringer Wahrscheinlichkeit gelöscht (Pruning)[3].

Die Verbindung aller dieser Maßnahmen führt zur Generierung einer Zielspur, bei der – für die Anwendung in der Taucherdetektion mit zu erwartender geringer Zielgeschwindigkeit – das Tracking-Verfahren so ausgelegt ist, dass eine höhere Extraktionsdauer zugunsten einer geringeren Track-Fragmentierung akzeptiert wird. Eine aus Daten zu Detektionsversuchen im Hafenbereich extrahierte Zielspur ist in Abbildung 3 in Überlagerung zu einer Seekarte des Versuchsgebiets dargestellt.

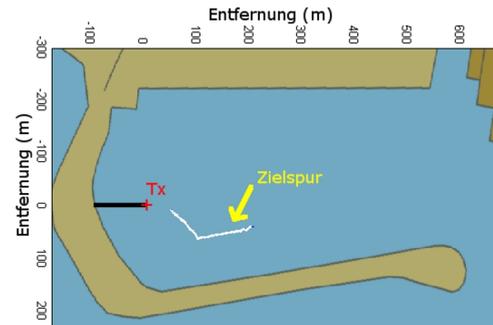


Abbildung 3: Zielspur eines sich annähernden Tauchers (weiß) als Ergebnis der gesamten Signalverarbeitungskette. Das Sonar befand sich am Ort Tx.

## Zusammenfassung und Ausblick

In Seeversuchen mit Szenarien zur Detektion von Tauchern in einem Hafenbereich wurden Algorithmen zur Ortung und Zielverfolgung untersucht. Ein aktives, hochfrequentes Taucherdetektionssonar wurde zur Erzielung ausreichender Reichweiten eingesetzt. Durch die Verwendung von sowohl LFM- als auch CW-Sendesignalen wurden die Anzahl an Falschalarmen erheblich reduziert. Eine weitere Verminderung der Rate an Falschalarmen wurde durch Zielspurbildung mit Hilfe eines Multi-Hypothesen-Trackers erreicht. Die Ausweitung der Algorithmen für die Anwendung bei Ortung von Tauchern von einem auf Reede liegenden Schiff aus führte zu brauchbaren Ergebnissen. Allerdings sind durch die vertikale Schallgeschwindigkeitsvariation Ausbreitungsbedingungen möglich, bei denen Aktivsonare in vertikaler Orientierung keine ausreichenden Detektionsreichweiten zulassen. Daher findet im Rahmen der EDA (European Defence Agency) eine Kooperation statt, bei der die in internationalen Hafen- bzw. Seeversuchen gewonnenen Daten unterschiedlicher Sensoren fusioniert werden.

## Literatur

- [1] Ulmke, M., Koch, W.: Road-map assisted ground-moving target tracking, IEEE Transactions on Aerospace and Electronical Systems, vol. 42, pp. 1264-1274, October 2006
- [2] Urick, J.: Principles of Underwater Sound, 3d ed., McGraw-Hill, New York, 1983.
- [3] Blackman, S., Popoli, R.: Design and Analysis of Modern Tracking Systems, Artech House, Boston, 1999.