Hydroakustik-Messung im Bornholmbecken zur lokalen Stationaritätsmodellierung beim Unterwasserschallkanal

Ivor Nissen[a] und Iwona Kochańska[b]

[a] *Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik (FWG) der WTD 71, Kiel, Germany*
IvorNissen@Bundeswehr.org, in@is.informatik.uni-kiel.de

[b] *Gdansk University of Technology, Faculty of Electronics, Telecommunications and Informatics, Department of Marine Electronic Systems, Poland, iwokocha@pg.gda.pl*

Populär ist die Nutzung der WSSUS-Übertragungskanal-Modellierung (Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering) zur stochastischen Beschreibung der Übertragung von Bandpasssignalen im GSM-Mobilfunk, da diese Annahme die Modell-Dimension halbiert. Für Unterwasserschallanwendungen wie Detektion, Navigation und Kommunikation liefert dieser Ansatz nur eingeschränktes A-priori-Wissen für adaptive Algorithmen bei bewegten Teilnehmern. Das ist bekannt [Kochanska13]. Der FWG der WTD71 sammelt seit 2001 phasengenaue Kanalvermessungen aus unterschiedlichen Seegebieten in unterschiedlichen Zeit- und Anwendungsszenarien mit bewegten und stationären getauchten Teilnehmern. In diesem Beitrag wird ein SIMO-Experiment aus dem Jahr 2010 vorgestellt, bei dem über einen elf Stunden andauernden Beobachtungszeitraum von der Wasseroberfläche abgekoppelt zwei stationäre Bodenknoten die Übertragungsstrecke hochgenau ausmessen. Diese erstreckt sich über zwei Seemeilen in dem Bornholmbecken der Ostsee. Die Schallgeschwindigkeit wurde räumlich kontinuierlich erfasst. Mit diesen stationären Messungen kann gezeigt werden, dass selbst eine durch Strömung nur maginal bewegte Wassersäule unterstellte Stationarität bei gleichzeitiger Annahme der Unkorreliertheit der Streukomponenten nicht gewährleistet wird. In der mobilen Unterwasserkommunikation vervielfacht sich dieser Effekt. Eine Feinabstufung zwischen ,,local-sense stationarity" und ,,non-stationarity" sowie eine Quasi-Korreliertheit sind zu berücksichtigen. Es wird eine Indikation benötigt, die einem Modem erlaubt, selber festzustellen, ob in-situ die Annahmen erfüllt sind. Modellierungsansätze wie Unsymmetrieapproximation, LSSUS und Chude-Okonkwo Idee wurden entwickelt, um als A-priori-Wissen für Maschinen auch in hochvariablen Übertragungskanälen nutzbar zu sein.

Einführung in die Problematik

Technische Systeme in einer hochdynamischen Umwelt wie der Unterwasserwelt müssen sich anpassen können. Jeder Detektions-Ping, jeder Navigations- oder Kommunikationsklick stellt eine Messung dar, kann den Übertragungskanal vermessen, kostet jedoch Energie und Bandbreite. Es ist daher nicht nur zwischen Umwelteinfluß und verhaltensbedingter Signalveränderung zu unterscheiden, ideal wäre auch eine Prädiktion, um mittels stochastischem A-priori-Wissen die Anzahl der Messungen zur Kanalschätzung zu minimieren.

Eine wichtige Klasse zur Beschreibung von linearen *zeitvarianten* stochastischen Übertragungskanälen für mehrwegebehaftete Signale sind WSSUS-Modelle. Die im terrestrischen bei gängigen Fahrzeuggeschwindigkeiten physikalisch sinnvolle Grundannahme der schwachen Stationarität (WSS) und unkorrelierter Streuer auf einzelnen Ausbreitungswegen (US), wurde bereits von Philip A. Bello 1963 [Bello63] hinreichend erörtert. Die schwache Stationarität führt dazu, dass die Korrelationswerte nur noch von der Verschiebung abhängen, nur noch Differenzen von Zeiten und Frequenzen betrachtet werden müssen. Die US-Bedingung unkorrelierter Mehrwege führt mathematisch zu einer über die Fourier-Transformation eineindeutigen Austauschbarkeit der Beschreibungsfunktionen und damit zu einer populären fast ausschließlichen Anwendung im frequenzselektiven Mobilfunkbereich. Es ist aber auch bekannt, dass die strikte statistische Beschreibung mittels WSSUS-Annahme im Mobilfunk nicht erfüllt wird, schon gar nicht bei Hochgeschwindigkeitsfahrzeugen [Matz03].

Beim hochvarianten Unterwasserschallkanal versagt das WSSUS-Modell überwiegend, wie die phasengenauen FWG-Messungen der letzten eineinhalb Jahrzehnte belegen. Keine verschwindenden Bandbreite/ Trägerfrequenz-Quotienten (Schmalbandannahme) und unterschiedliche Dopplerausprägungen auf den Ausbreitungspfaden (doubly spread channels) sowie die nichtlineare Mehrfach-Ausbreitung über unreflektierte Pfade sind nur einige Gründe. Aber es gibt auch driftende Situationen, bei denen die WSSUS-Annahme erfüllt wird. Doch wo ist die Grenze der Einsetzbarkeit des WSSUS-Modells? Es ist daher zu untersuchen, welchen Einfluß die Nichtstationarität und die Korreliertheit der Streuer auf den Gesamtprozess der Übertragung haben. Dazu wurde in 2010 ein Experiment durchgeführt, das für diese Fragestellung notwendige Messdaten zur Verfügung stellt. Es wurde darauf geachtet, dass alle vom Menschen generierten zeitlichen Variationen reduziert und Umwelteinflüsse genauestens erfasst werden und das bei möglichst wenigen Rayclustern im realen Seeversuch, mit wenig Umgebungslärm und einer ausgeprägten Sprungschicht am Meeresboden, die zu Beugungseffekten führen sollte, jedoch nicht zu schwer modellierbaren Phasendrehungen bei beispielsweise Bodenreflektionen.

Das stationäre SIMO-Experiment A40

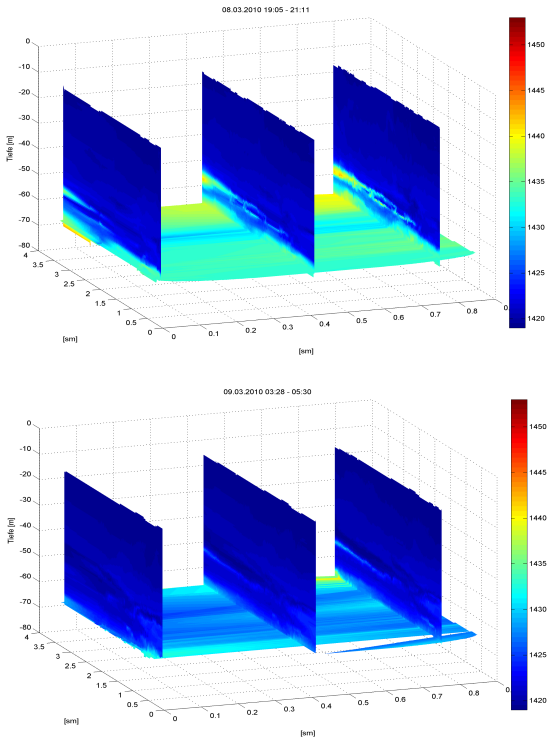
Am 8. März 2010 wurde im Bornholmbecken ein Experiment mit einem fünf Meter hohen Sendeturm und einem ebenso hohen Empfangsturm aufgebaut. Beide Türme wurden als Enden der akustischen Meßstrecke in einer Wassertiefe von 75 m in einer Distanz von $3680m$ (zirka $2sm, 6‰$-Abweichung) zueinander installiert. Der

Sendeturm war mit einem spherischen Flachwasser-Wandler ITC 4008 mit einer Resonanzfrequenz von 5.5 kHz ausgestattet, der Empfangsturm mit einer Lanze mit sieben äquidistant aufgereihten Hydrophonen mit einem Abstand von 32 ± 0.5 cm (der achte Kanal wurde für Triggersignale verwendet). Das unterste Hydrophon (Kanal 1) war dadurch 2.42m über dem Meeresboden fest plaziert. Sender und Empfänger waren damit *zeitinvariant* in der Wassersäule positioniert. In der Mitte der akustischen Meßstrecke wurde ein 300 kHz ADCP zur Messung der Strömung versenkt, seitlich nicht störend zur Erfassung des Wellenspektrums eine Waveriderboje verankert. Zudem wurden MicroCat-CTD-Sonden beim Sender und Empfänger installiert. Die akustische Meßstrecke wurde fern ab von befahrenen Schifffahrtsrouten am Rande eines Sperrgebietes geplant, um das Umgebungsgeräusch bei der Vermessung zu minimieren.

In der elfstündigen Sendephase von 19.30h bis zum nächsten Tag am 09.03.2010 um 6:30h wurde alle 15 Minuten die Kanalvermessungssignalsequenz des Transmitters kontinuierlich in dem Frequenzband von $2.1-5.6kHz$ (vier Lotperioden pro Stunde) in den sieben Hydrophonen empfangen. Die damit 41 Mal ausgesendete Vermessungssequenz hatte eine Gesamtlänge von 4 Minuten 30 Sekunden. Die Hydrophondistanz wurde so gewählt, dass zwei benachbarte Hydrophonkanäle bei einer Wellenlänge von 25-60 cm als kohährent, der nächste Hop als inkohärent vorausgesetzt werden kann. Während der Sendezeit fuhr das Forschungsschiff Planet mit der FWG-CTD-Schleppkette Ovale um die Meßstrecke, um simultan an 85 äquidistant verteilten Punkten über die Tiefe kontinuierlich die Schallgeschwindigkeit in der Wassersäule zu messen. Eine Umrundung des Aufbaus mit dem Schiff dauerte zwei Stunden. Damit kann die Schallgeschwindigkeit, die zwischen 1420 und 1440m/s variierte, dreidimensional in dem Wasserkörper über die Experimentzeit extrapoliert werden (siehe Abbildung 1). Das ist das Alleinstellungsmerkmal dieses Schallkanal-Datensatzes und der Wert für eine Phasen- und Energie-Validierung von Modellen.

Durch Salzwassereinbrüche über das Skagerrak und die anzutreffende Salzlake am Grund des Bornholmbeckens ist eine starke Sprungschicht im März am Meeresboden beobachtbar, die die Schallenergie zur Oberfläche hin beugt; der schlickige Meeresboden hat damit wenig Einfluß auf den Übertragungsprozess. Dieses Natur-Phänomen sollte ausgenutzt werden. Dadurch entstehen bei der Bodenknotenkommunikation nur wenige Cluster mit korrelierten Mehrwegepfaden am Empfänger. Zur phasengenauen Schallkanalausmessung wurden vier 30-Sekunden-Signale verwendet: A) LFM-Signale der Länge einer Sekunde über unterschiedliche Frequenzbänder (beispielsweise in [GerdesGoerler16] beschrieben), B1) OFDM-Signal mit 512 Hadamard-Piloten und einem CP von 0.9 [Nissen08], B2) PRBS-Signal (PN2N25, ähnlich zu [Stiller16]) und B3) synthetisches Rauschen. Die aufgezählten B-Signale weisen eine Bandbreite von 3500Hz auf. Damit konnten durch Korrelation von Empfangs- und Sendesignal alleine beim PRBS-Signal in den sieben parallelen Schallkanälen insgesamt 287 Verzögerungs-Doppler-Leistungsdichtespektrum bestimmt werden. Diese verzeichnen einen und zwei Cluster von Pfaden mit einer großen Diversität in Zeit, Frequenz und dem Aufzeichnungsort bis hin zur Komplettauslöschung (Total-Fading). Am Anfang des Experimentes war ein schmaler Schallkanal für hohe Frequenzen in der Sendertiefe vorhanden. Die Strömung in der direkten Ausbreitungsstrecke (LOS) kann mit $1/10m/s$ vernachlässigt werden, ebenso der Wind- und Welleneinfluß - es lag ruhige See vor.

Abbildung 1: Interpolation eines Schallgeschwindigkeitsschnittes in der Ebene des akustischen Experiments basierend aus den beiden gemessenen 2D-Flanken mittels der CTD-Schleppkette des FWG, oben mit kleinem Schallkanal in den ersten Stunden des Experimentes, in der zweiten Hälfte (unten) nur mit starker Sprungschicht am Meeresboden.



Am Anfang des Akustik-Experimentes ist ein einziger Pfad in den 30s-Impulsantwort-Evolutionen sichtbar, der oft durch einen 2ms-Verzugscluster überlagert und bereits nach wenigen 15-Minuten-Lotperioden durch einen zweiten Cluster mit einer Verzögerung von 16ms ergänzt wird. In den sieben Hydrophondatensätzen sind die Ausprägungen unterschiedlich stark vertreten. Ein Beamforming mit den wenigen vertikal angeordneten Hydrophonen kann abhängig von der Frequenz nur schematisch drei Hauptpfade andeuten, den direkten Weg mit einer Länge von $d_0 = 3680m$, einen nach oben ausgerichteten 45°-Umwegecluster über die Wasseroberfläche von $d_1 = 3682.66m$, durch eine diffusen Reflektion mehrfach gestreut, und einen nach unten ausgerichteten 45° Pfadcluster. Letzterer könnte durch die ausgeprägte Sprungschicht am Meeresboden zu einer Mehrfach-Beugung zur Oberfläche und multiplen Streuungen an der tieffrequent glatten Meeresoberfläche führen. Die Verzögerungszeit wurde mittels der

GPS-getriggerten Sende- und Empfangsaufzeichnung zwischen 2.620 und 2.638s gemessen. Das spricht für eine Länge des ersten Streuzentrumsweges von $d_7 = 8 \cdot \sqrt{(d0/8)^2 + 70^2} \approx 3722.36m$ und des zweiten Weges $d_9 = 10 \cdot \sqrt{(d0/10)^2 + 70^2} \approx 3745.98m$, also gegen ein LOS. Geometrieinterpretation und Messung bestätigen sich mit $(d_9 - d_7)/1420m/s \approx 16.5ms$; eine genaue akustische Modellierung mit dem Rechenkern *bellhop* steht noch aus. Dieses Wissen kann sich jedoch ein kognitives Modem nicht erarbeiten, da mit dem Fehlen von hochgenauer Zeitsynchronisierung und dem Defizit über Schallgeschwindigkeitsverteilungen in der Wassersäule die Ausbreitungspfade nicht bestimmt werden können. Jedoch kann die Stationarität geschätzt werden. Bis auf die kurze erste Phase der Schallkanalausprägung als Wellenleiter und der damit ausschließlichen Ein-Wege-Übertragung zwischen den stationären Bodenkommunikationsteilnehmern ist das WSSUS-Modell in diesem Experiment nicht anwendbar. Die Abbildung 2 zeigt eine 30s-Situation am Ende des ersten Drittels.

Adaptive Systeme

Ein adaptives System kann mit A-priori-Wissen zur weltweiten Bodenbeschaffenheit in Form von Datenbanken ausgestattet werden. Die Schallgeschwindigkeit in der gesamten Wassersäule ist dem System jedoch nicht zugänglich, es muss durch in-situ-Messungen A-posteriori-Kanalwissen ableiten und das Kanalmodell entsprechend gut wählen, um Prädiktionen über die Realität nutzen zu können [Kochanska13].

Ein bekannter Weg zur Vermessung des Kanals bei Mehrträgersystemen ist das Einstreuen von Pilottönen während der Übertragung [Nissen08], Impulsantwort respektive Übertagungsfunktion werden in-situ bestimmt. Die Korrelation über unterschiedliche Messzeitpunkte liefert dann die zeitliche Kohärenz. Diese und das zugehörige Doppler-Power-Spektrum können als Exponentialfunktionen approximiert werden, wie es in Abbildung 2 zu sehen ist. Dazu wird die linke und rechte Seite der Spektren mittels

$$M(\lambda) = e^{-\left(\frac{|\lambda|}{\kappa_1 + \kappa_2 f_T + \kappa_3 f_T^2}\right)^{\kappa_0}}$$

durch Ausgleichen approximiert, die komplexen Parameter κ_i werden bestimmt. Aus diesen Funktionen können Systemparameter wie die optimale Symbollänge, und damit die Trägeranzahl sowie die maximale Bandbreite bestimmt werden.

Doch kann die Theorie von WSSUS angewendet werden? Wo ist die Grenze der Einsetzbarkeit des WSSUS-Modells? Kann das adaptive System selbst identifizieren, wie stark schwache Stationarität (WSS) und Unkorreliertheit der Streuer auf einzelnen Ausbreitungswegen (US) ausgeprägt sind? Ja - es kann mit den Funktionen eine Indikation berechnet werden. Bereits in [Bello63] in Gleichung (2) wird mit (4) eine Indikation angegeben, jedoch nicht weiter verfolgt. Empfangs- und Sendesignal r, s seien über die *zeitvariante* Impulsantwort H zu jedem Sendezeitpunkt t miteinander verbunden, dann kann für WSS folgender Indikationswert angegeben werden:

$$Ind^2_{WSS} := \frac{\overset{mean}{\Delta t} E\{E\{H_i(t,\tau)|H_i(t+\Delta t,\tau)\}|E\{H_q(t,\tau)|H_q(t+\Delta t,\tau)\}\} \cdot \overset{mean}{\Delta t} E\{E\{H_i(t,\tau)|H_q(t+\Delta t,\tau)\}|E\{H_i(t,\tau)|H_q(t-\Delta t,\tau)\}\}}{1 + \overset{var}{t} \overset{mean}{\tau} H(t,\tau)}$$

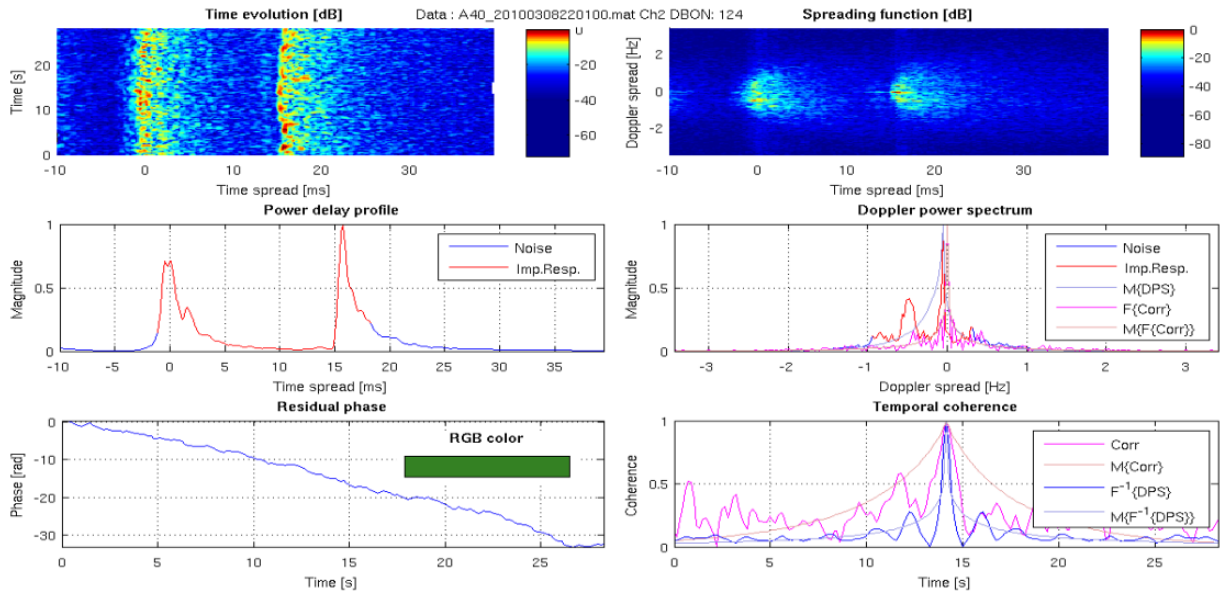


Abbildung 2: Kanalfunktionen einer 30s-Messung um 22 Uhr am 8. März 2010. Die grüne Kanalfarbe [Nissen08] illustriert eine ungewohnt geringe zeitlich Spreizung im ms-Bereich, wenige Mehrwege bei gutem Signal-zu-Rauschverhältnis jedoch mit signifikanter Dopplerspreizung trotz der Stationarität von Sender und Empfänger sowie der fehlenden Strömungs- und Oberflächenanregung. Es sind mit einer zeitlichen Verzögerung von 16 ms zwei Pfadcluster gemessen worden, im ersten Cluster ist neben dem schnellsten Weg ein Umweg nach 2 ms sichtbar. Das Doppler-Power-Spektrum ist entgegen der WSSUS-Theorie nicht symmetrisch ($T_D = 20.28ms, B_D = 1.36Hz, T_C = 0.29s, B_C = 20.5Hz, RGB : 54 \quad 139 \quad 36$) siehe auch [Brechetsbauer11].

unter Ausnutzung der Kreuzkorrelation $E\{\cdot|\cdot\cdot\}$ und des Zusammenhanges

$$r(t) = ((H_q + \hat{\imath}H_i)s)(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(t,\tau)s(t-\tau)d\tau,$$

mit den Real- und Imaginär-Anteilen H_q und H_i. Analog kann im Frequenzbereich ein Indikationswert für US angegeben werden. Für das Experiment A40 ergibt sich für die sieben Hydrophonkanäle der Verlauf in Abbildung 3.

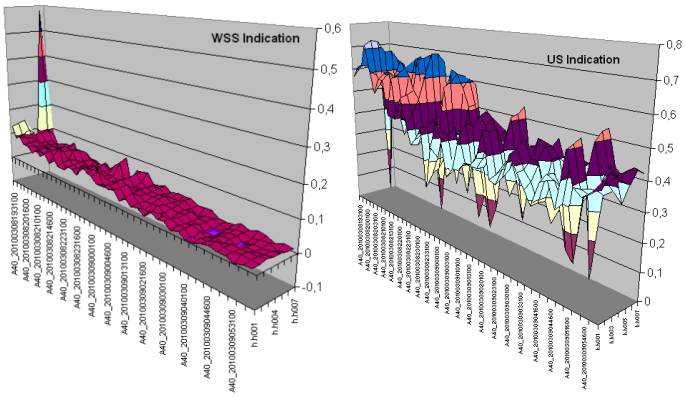


Abbildung 3: Quadrate der Indikationsfunktionen für das Experiment A40 für den WSS-Anteil (links) und den US-Anteil (rechts) über die elf Stunden bei sieben Hydrophonkanälen. Kurzzeitig am Anfang des Experimentes erkennt man die Erfüllung der WSS-Eigenschaft, jedoch bricht diese dann auf fast null zusammen. Die US-Eigenschaft wird am Anfang des Experimentes deutlich erfüllt, ist dann über die Stunden noch mit Werten $0.4 - 0.5$ signifikant vorhanden.

Die Indikationswerte zu WSS und US können auch in einem Diagramm zusammengeführt werden, wie in Abbildung 4 dargestellt. Der Ursprung (links unten) weist auf das Fehlen, die gegenüberliegende Ecke $(100\%, 100\%)$ auf die Erfüllung der WSSUS-Eigenschaft hin, in A40 überwiegen non-WSS aber US-Indikationen, der Schallkanal ist im weiteren Sinn nicht stationär, trotz ortsfester *zeitinvarianter* Installation.

Zusammenfassung

Dieses Experiment zeigt als ein Gegenbeispiel, dass selbst bei gutem windlosen Wetter und damit ohne Anregung der Wasseroberfläche, bei vernachlässigbarer Strömung und vor allem bei bewegungsinvarianten Kommunikationsteilnehmern die Voraussetzung der von Bello vorgestellten 'wide-sense' Stationarität verletzt wird. Das wird bei mobilen und damit zeitvarianten Teilnehmern verstärkt. Die Anwendung des WSSUS-Modells für den Unterwasserschallkanal ist damit sorgfältig zu prüfen. Hierfür ist ein Indikator entwickelt worden. Modellierungsansätze, wie beispielsweise in [HlawatschMatz11] angegeben, sind in der Hydroakustik auf ihre Wirksamkeit hin zu prüfen, um als A-priori-Wissen für Maschinen auch im hochvariablen Übertragungskanal Wasserschall nutzbar zu sein.

Danksagung

Die genaue Plazierung der Messsysteme durch Schiffsbesatzung FS Planet und Kollegen der Messtechnik hat diesen wertvollen Datensatz erst ermöglicht, allen Teilnehmern der gelungenen Expedition sei gedankt. Michael Krüger danken wir für die Erstellung der Graphiken und Dr. Schäfke für die nachträgliche Ausbreitungsmodellierung.

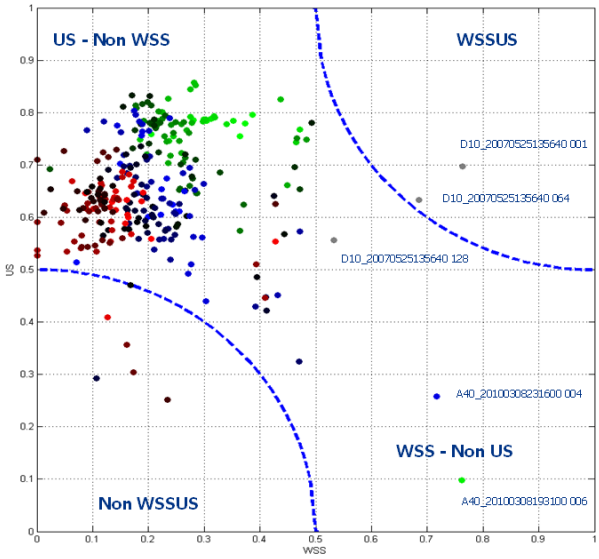


Abbildung 4: Darstellung von WSS- und US-Koordinate der Verzögerungs-Doppler-Leistungsdichtespektren zeitlich von grün über blau zu rot. Es ist eine Verschiebung der Farbcluster über die elf Stunden ausgeprägt zu sehen. Die drei grauen Punkte stellen eine driftende Nahbereich-Messung im Mittelmeer (CCUP 2007, Run D10 20070525135640) an der Oberfläche, am Boden und in der Mitte der Wassersäule als Referenz eines quasi-erfüllten WSSUS-Kanals dar.

Literatur

[Bello63] Philip A. Bello. *Characterization of Randomly Time-Variant Linear Channels. IEEE Transactions on Communications Systems* Volume:11, Issue: 4, December 1963.

[Brechetsbauer11] Timo Brechetsbauer. *Zuordnung von Unterwasserschallkanalkenntnissen in Impulsantwort-Cluster*, Fachhochschule Kiel University of Applied Sciences, Kiel, Master-Thesis bei der FWG, August 2011.

[GerdesGoerler16] Frank Gerdes, Max Görler,*Untersuchung der zeitlichen Variabilität der Unterwasserschallausbreitung in der Nordsee* DAGA 2016 Aachen, 2016.

[HlawatschMatz11] Franz Hlawatsch, Gerald Matz. *Wireless Communication over Rapidly Time-Varying Channels*, 2011.

[Matz03] Gerald Matz. *Characterization of non-WSSUS fading dispersive channels.* Proc IEEE ICC, Anchorage, 2003.

[Kochanska13] Iwona Kochańska. *Considerations of adaptive digital communications in underwater acoustic channel.* Hydroacoustics 16. 113-120. 2013.

[Nissen08] Ivor Nissen. *Adaptive Systems for Mobile Underwater Communications with a p(oste)riori Channel Knowledge, Lecture Notes* FWG-Report 59/61, First Half page 107 (V/XV 13), December 2008. Second Half page 73 (XII/XV 7), December 2009.

[Sadowsky98] John Sadowsky. *On the Correlation and Scattering Functions of the WSSUS Channel for Mobile Communications* 1998.

[Stiller16] Dietmar Stiller. *Untersuchungen zur Zielverfolgung bei der Detektion von Tauchern.* DAGA 2016 Aachen, 2016.