

Ultrawideband-Burst-Kommunikation in heterogenen Netzwerken unter Wasser

- ein Ansatz -

Ivor Nissen

Forschungsbereich für Wasserschall und Geophysik (FWG) der WTD 71, Kiel Germany

Email: IvorNissen@Bundeswehr.org, in@is.informatik.uni-kiel.de

Akustische Burst-Kommunikation bietet sich in kabellosen mobilen Unterwasser-Kommunikationsnetzwerken (UW-MANET, siehe [2015M]) an, da durch die kurze Transmissionszeit wenige Kollisionen entstehen, zudem die autonomen Geräte wenig Energie verbrauchen. Durch die natürlich vorgegebene frequenzabhängige Absorption im Wasser existiert für eine gegebene maximale Reichweite ein optimales Frequenzband, das dann die Baugrößen der Sendewandler und der Energieversorgung bestimmt, wie auch die Abstraten. Doch kann nicht jeder Teilnehmer diese Ressourcen auch zur Verfügung stellen. In diesem Beitrag soll ein neuer Ansatz zur akustischen Multiband-Technik für den Unterwasserbereich vorgestellt werden, mit dem es möglich ist, Teilnehmer mit stark unterschiedlichen Ressourcen in einem Netzwerk gleichrangig zu verbinden. So verfügen bemannte Plattformen wie Schiffe und Uboote über Sendeleistung, Rechenkapazitäten und mit den Hydrophonantennen über Raumdiversität und große Apertur; Taucher und kleinste autonome Einheiten wie Roboterfische jedoch über komplementär geringste Ressourcen. Zur Überwindung wird ein Ultrawideband-Ansatz vorgestellt.

Einführung in die Problematik

Unser Gehirn kann in Luft gesprochene Worte korrekt zuordnen, Anfänge und Worttrennungen scheinbar mühelos detektieren und das auch bei unterschiedlichen Sprechern und geschlechtsbezogenen Formantlagen - beim Mehrfachen der Grundfrequenz.

Frequenz-Diversity-Beispiel 1

In der STANAG 1074 wird analoge Unterwasserkommunikation (siehe [2015J]) beschrieben. Diese ist vom individuellen Sprecher abhängig. Im Allgemeinen ist eine Frauenstimme im Bereich 140-400 Hz und damit hochfrequenter im Grundton, als die eines Mannes bei 70-200 Hz. Das menschliche Gehirn kann den Frequenzversatz dennoch ausgleichen. Gesang ist vom Sprechen grundlegend durch ein größeres Klangspektrum, dynamische Unterschiede beispielsweise bei den Tonhöhen unterscheidbar und überträgt sich bei der frequenzselektiven Unterwasserkommunikation daher weniger fehleranfällig zum Empfänger. Auch eine rhythmische Struktur nicht nur im Zeitbereich, sondern auch bei den Tonhöhen hat einen höheren Wiedererkennungswert. Die Nutzung eines möglichst großen Frequenzbereiches ist daher eine sinnvolle Vorgehensweise bei der Signalgenerierung.

Im Wasser gelingt es Walen und Delphinen ebenfalls in einer rauschüberlagerten Mehrwege-Mehr-Doppler-Umwelt unterschiedlichste individuelle Signale aufzulösen, es wird anscheinend zweidimensional in der Zeit-Frequenzebene synchronisiert und dekodiert.

Aus dem Mobilfunkbereich kennt man mit GSM/EDGE-COST 207, fünf typische Kanalmodelle, mit denen sich unsere Telefone auf die Mehrwegeumwelt und die unangenehme Verschmierung von nachfolgenden Symbolen in den Entzerrern mit maximalen Echolaufrufen von $20\mu s$ einstellen. Für den diversitiven Wasserschall hingegen ist eine Clusterung in wenige typische Kanalkonstellationen nicht möglich. Die ausgeprägte zeitliche Spreizung ist um zwei bis drei Größenordnungen höher als die Dopplerspreizung. Auch wenn die zugehörigen mathematischen Beziehungen von Intersymbol-Interferenz und Multi-Spreaded-Channels mittels schlechtgestellter Toeplitz-Gleichungssysteme bekannt sind, fehlt derzeit die Rechenressource in Modems oder sie entartet zu Rechenclustern, die überzogen hohe Energiebedürfnisse haben. Es ist daher bei den Übertragungsverfahren eine Balance zwischen Realisierung in energiesparsamen DSP-Modems und Dekodiererfolg bei weltweitem und allwettertauglichen Einsatz zu gewährleisten; die perfekte teilsamplenaue Fein-Synchronisation ist dabei das Kernstück einer erfolgreichen Kommunikation unter Wasser, bei möglichst wenigen Detektions-Falschalarmen.

Burst-FMT-Verfahren

Ein Lösungskonzept der Meeressäuger, Fische aber auch in den Khoisan-Sprachen ist die Verwendung von Klicklauten, zeitlich sehr kurz und breitbandig, welche die Mehrwegeausbreitung von der Ortung bis hin zur Koordinierung bei Echelon-Formationen ausnutzen und nicht unterdrücken. Diese haben wir in Form einer impulsartigen Burst-Kommunikation unter der Bezeichnung TU-WACS (Transient UnderWater Acoustical Communication System) realisiert [2009]. Die Filterd MultiTone-Modulation (FMT - Obermenge der DMT/OFDM-Familie bei Rechteckimpulsen) wird in der Darstellung des Breitband-Ansatzes als Grundlage dienen. Statt Intersymbol-Interferenz, wird nur noch ein Symbol gesendet und damit in sich verschmiert, auf Kosten des Transportvolumens, welches auf 128 User-Bit zusammenschrumpft. Für viele Anwendungen unter der Wasseroberfläche ist das ausreichend. Das Verfahren zeichnet sich durch Verratsarmut und lange Stehzeiten der verwendenden Systeme aus. Durch den geringeren Sound Exposure Level (SEL) sind auch die Auswirkungen im Hinblick auf den Schutz der Meeressäuger geringer.

Abstrakte, Hz: 36000

Bandbreite, Hz: 4500

kodierbare Bytes/Päckchen brutto: 16

Bytes/s brutto: 70

akustischer Link, bits/s: 1969 mittels QPSK

Effizienz brutto, bits/Hz (%): 12,5

Crestfaktor before / after clipping: 3,35 / 2,34
 RMS- and CF-gain by clipping: 1,43 (3,1 dB)

Auf jedem ungeraden Träger wird ein Pilot gesendet, so dass eine Kanalschätzung möglich ist. Derzeit können bis zu vier Hydrophonkanäle und zeitlich eng aufeinanderfolgende Duplikate mittels der Kanalvermessung durch die Piloten in einem Maximum Ratio Combining im Modem zusammengefaßt werden. Auf jedem Träger $j = 1..N$ wird durch die Burst-Eigenschaft ein „Flat-Slow-Channel“ angenommen, so daß das gesendete QPSK-Symbol s_j an jedem Hydrophon $R_i, i = 1..μ$ nach einer perfekten Synchronisation und nach erfolgter Kanal-Vermessung und -Korrektur das Empfangssymbol vorliegt, als $y_{ij} = h_{ij}s_j + n_{ij}$ mit n_{ij} als Rauschen in der j -ten Frequenzzelle und h_{ij} als zugehörigem interpolierten Kanal Korrekturwert. Der Maximum-Ratio-Kombinierer wird definiert als:

$$W_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^{\mu} |h_{ij}|^2} [h_{ij}^*]^T$$

Nach der Multiplikation erfüllt das Empfangssymbol die Gleichung:

$$\begin{aligned} \bar{s}_j = W_j[y_{ij}] &= \frac{\sum_{i=1}^{\mu} h_{ij}^* y_{ij}}{\sum_{i=1}^{\mu} |h_{ij}|^2} = \frac{\sum_{i=1}^{\mu} h_{ij}^* (h_{ij} s_j + n_{ij})}{\sum_{i=1}^{\mu} |h_{ij}|^2} \\ &= s_j + \frac{\sum_{i=1}^{\mu} h_{ij}^* n_{ij}}{\sum_{i=1}^{\mu} |h_{ij}|^2} \end{aligned}$$

Durch die inkohärenten Rauschanteile entsteht ein Processing-Gewinn.

Selbst singuläre Echos können vollständig und korrekt dekodiert werden, beispielsweise in Hafen-, Archipel-Regionen mit den Scheren, Fjord-, oder Tiefwassersituationen. Es liegt damit ein zum JANUS-Verfahren [2015J] komplett gegenteiliger Zugang vor: statt viele schmalbandige Einzeltöne wird nur ein einziger Mehrfrequenzton erzeugt. Alle anderen Übertragungsverfahren liegen konstruktiv dazwischen. Durch die eingefügte Kodierung kann auch bei unterdrückter Bandbreite noch korrekt dekodiert werden:

Frequenz-Diversity-Beispiel 2

Gegeben sei eine Transmission mit einer Bandbreite von 4,5 kHz. Da in gängigen Übertragungsverfahren vor der Sendung mittels Kanalkodierung Redundanz absichtlich eingebracht wird¹, kann auf einen Teil des Bandes verzichtet werden, da über den Frequenzbereich durch das Coding gespreizt wurde. In diesem Beispiel wird ein Rate 1/2-Turboencoding verwendet.

Band (kHz)	Breite (kHz)	TUWACS errors	empfangenes Päckchen
3.5-8.0	4.5	0	D00E17F48720F80D38312038D7A59CCD
3.6-8.0	4.4	0	D00E17F48720F80D38312038D7A59CCD
...
4.3-8.0	3.7	0	D00E17F48720F80D38312038D7A59CCD
4.4-8.0	3.6	0	D00E17F48720F80D38312038D7A59CCD
4.5-8.0	3.5	17	D0CA03FE0E20600D0E3120387F2D9C05
4.6-8.0	3.4	21	D09B03F68720600D0E2D2038772C3F05

¹nachdem zuvor mittels Quellenkodierung Redundanz (bei z.B. verlustfreier Komprimierung) entfernt wurde

Damit kann mit dieser vorgegebenen Redundanz bei einem Verlust von 20% der Bandbreite und ohne weitere Störeffekte dennoch fehlerfrei dekodiert werden.

Das Szenario

Wir werden nun als ersten Schritt Energiebilanzierungen vornehmen. Die am Empfänger ankommende Energie lässt sich mittels der SONAR-Gleichung als Signalüberschuß $SE = SL_{TX} + DI_{RX} - (TL_{TX \rightarrow RX} + NL_{RX} + DT_{RX})$ beschreiben [2008], mit SL :Source Level, DI :Directivity Index, TL :TransmissionLoss, NL : NoiseLevel und DT :DetectionThreshold.

Bemannte Schiffe und Uboote unter und über der Wasseroberfläche verfügen verglichen mit autonomen Systemen über viel Kapazität bezüglich Leistung („SL high“), tieffrequente und damit weitreichende Sendesysteme mit entsprechend großer Apertur. Aber auch dank entsprechender Datenaufbereitung mittels Beamforming sind durch die Antennen auch leiseste Signale noch auffaß- und dekodierbar („DI, Gain high“). Setzt man hypothetisch voraus, daß alle Teilnehmer im heterogenen Netzwerk „het net“ unter Wasser den gleichen Frequenzbereich bedienen könnten, so sind Defizite der autonomen Systeme („SL low, DI=0“) und damit die Energie-Bilanzen der Kommunikation komplett ausgeglichen. Beim Eigengeräusch treten jedoch Unterschiede auf. So sind gerade Uboote so gebaut, dass sie sehr leise sind, für viele Schiffe gilt das nicht.

Schiffe und Uboote haben mit hohem Antennen- und Processing-Gewinn die Möglichkeit, Aussendungen autonomer Systeme aufzufangen, umgekehrt profitieren letztere mit ihrem Einzelhydrophon („DI=0“) vom hohen SL der bemannten Plattform und vom niedrigen Eigengeräusch. Damit ist der Signalüberschuß, der sich im Signal-zu-Rauschverhältnis niederschlägt, im „het net“ ähnlich hoch. Einzig in der Kommunikation der Ressourcenschwachen wird die vorgegebene Distanz unterschritten. Im Netzwerkverbund über das Relais der Ressourcenstarken wird dieser Punkt kompensiert.

Das setzt jedoch den gleichen gemeinsam genutzten maximalen Frequenzbereich und eine gemeinsame maximale Abtastrate aller Teilnehmer (als kleinster gemeinsamer Teiler) voraus und schränkt auf nur größere Tauchroboter und Bodenknoten ein, die über entsprechende Batterienenergiekapazitäten im Bereich von Kilowattstunden verfügen, sowie Sendewandler mit Massen einiger Kilogramm (im Wasser) und Leistungsverstärker in Kühlschranksgröße tragen können. Taucher oder auch kleinste Roboterfische können aktiv jedoch nur im hohen Ultraschallbereich >30 kHz operieren.

Multiband-Ansätze

Gängige Lösung bei unterschiedlichen Frequenzbereichen und Hardware sind Mehrband-Kommunikationssysteme, die für unterschiedliche Teilbänder eigene Modems mit zugehörigen abgestimmten Sendewandlern besitzen. Die

Einsatzdauer wird durch die Modem-Anzahl pro Teilnehmer dezimiert, der Verbindungsaufwand (wer über welche Ressourcen verfügt) wird auf eine intelligente Netzwerkverwaltung verlagert. Wie auch beim Multi-band cognitive radio networks [2014] bekannt, führt das zudem zu einer parallelen Überwachung (Synchronisation) und Bearbeitung (Dekodierung) unterschiedlicher Teilfrequenzbänder und den damit einhergehenden unterschiedlichen Übertragungsverfahren. Die hierfür notwendige M-fache Rechenkapazität, auch wenn nur durch ein Gerät geschultert, um nicht nur im Zeitbereich die Nachricht zu detektieren, sondern zusätzlich auch noch eine diskrete Synchronisierung im Frequenzbereich durchzuführen (siehe Abbildung 1), vergrößert wieder den Energiebedarf und läßt diesen Zugang unpraktikabel erscheinen, Falschalarme steigen durch die Energie in benachbarten Kommunikationsbändern.

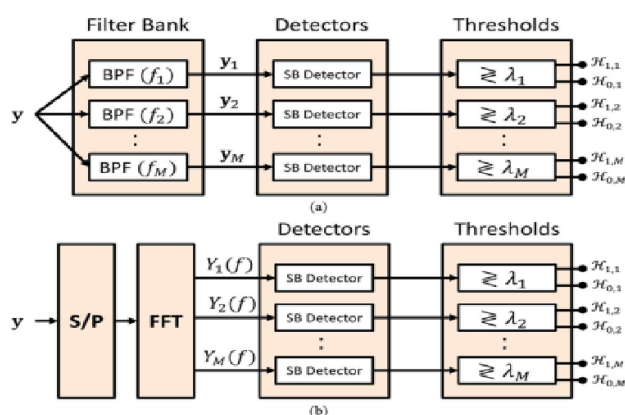


Abbildung 1: Klassische rechenintensive Vorgehensweise, parallele Detektoren zur Synchronisation im Zeitbereich a) oder im Frequenzbereich b) durch Filterbanken [2014].

Es soll nun ein anderer Ansatz vorgestellt werden, bei dem das generelle Axiom aufgehoben wird, dass Sender und Empfänger immer das exakt gleiche Frequenzband zum Senden und Empfangen zu nutzen haben:

Statt das jeder Teilnehmer im „het net“ nur vorher festgelegte Frequenzbereiche nutzt und somit Cluster von Verständigungs-Kombinationen entstehen, soll das Senden und Empfangen scharf von einander getrennt werden. Was bedeutet das: Analog wie Mann und Frau trotz unterschiedlicher Sendefrequenzbereiche kommunizieren können, da jeder den gleichen Gesamtfrequenzbereich überwacht, wird nun im gesamten Netzwerk eine maximale Abtastrate und ein Übertragungsverfahren für alle fest vorgegeben. Der Empfänger ist damit bei allen Teilnehmern gleich, nutzt nur eine einzige Synchronisation, wie bisher bei der Ein-Band-Realisierung. Jedoch wird nun im gesamten Frequenzband nach der Symboldetektion simultan kombiniert. Auf der Sendeseite wird ein Breitbandsignal generiert, welches dann aber durch die Sendecharakteristik eingeschränkt wird. Dabei ist jedoch, wie im Beispiel 1 vorgestellt, auf eine Maximierung des Frequenzbandes abzielen. Wie im Beispiel 2 ausgeführt, wäre ein Spreizen der Information über das Breitbandsignal sinnvoll. Es kann jedoch weiterhin auch nur ein beliebiges Band, oder übergreifende Fragmente

davon genutzt werden.

Breitband-Burst-FMT-Verfahren

Anhand der eingeführten Burst-Kommunikation soll das Konzept konkret vorgestellt werden. Es wird die Trägerzahl um den Faktor 8 erhöht, gleichzeitig aber auch die Bandbreite, somit bleibt die Symbollänge unverändert. Alle Teilnehmer nutzen damit die folgenden Parameter:

Abtastrate $\times 4$, Hz: 144000 Bandbreite $\times 8$, Hz: 36000
 kodierbare Bytes/Päckchen brutto: 16 Bytes/s brutto: 70
 akustischer Link, bits/s: 1723
 Effizienz brutto, bits/Hz (%): $1,6 = 12,5/8$
 Crestfaktor before ($\times 3$)/ after clipping ($\times 2$): $9,56 / 3,99$
 RMS- and CF-gain by clipping: 2.39 (7.6 dB)

Die kritische ressourcenbestimmende Größe ist hierbei die vierfache Abtastrate. Der Inhalt der sieben hinzugekommenen Bänder kann aus dem ersten repetierend kopiert oder mittels einer Kanalkodierung sinnvoll gespreizt werden [1985]. Für eine technische Realisierung im akustischen Modem wurde sich in einem ersten Schritt für eine wiederholende Strategie entschieden. Damit sind nun acht identische Teilbänder als Kopien des ersten Grundbandes entstanden, aufsteigend mit dem ersten 4,5 kHz-Band. Ein Senden des Gesamtsymbols über das Band $8 \times 4,5 = 36$ kHz ist nicht möglich, da Breitbandwandler derzeit nicht existieren², der Crestfaktor trotz Clipping sehr hoch ist und die notwendige Energie zur Verfügung stehen muss.

Dabei wird der gefilterte Frequenzbereich vom genutzten Sendeequipment determiniert, das Sendesignal wird der individuellen Wandlercharakteristik mit ggf. zuvor durchgeführter Filterung und Normalisierung unterworfen. Möchte man beispielsweise keinen höheren Crestfaktor als in der Ausgangssituation, so löscht man im Gesamtfrequenzband alle Trägerinhalte außerhalb des betrachteten Einzelbandes ($=0$). Auch eine adaptive Ausblendung von zuvor gemessenen Störbändern wäre möglich, soll jedoch der Einfachheit halber hier nicht erörtert werden.

Jeder Teilnehmer sendet damit in dem Bereich, den sein Equipment ihm ermöglicht.

Schritte auf Seiten des Senders:

- 1) Generierung wie im Einbandfall
- 2) Füllen der sieben Zusatzbänder (repetierend oder mit anderer sinnvoller Kodierung)
- 3) Filtern ggf. Anpassen an Wandlercharakteristik und Normierung des Gesamtsignals

Auf der Empfangsseite findet die gleiche einmalige Synchronisation im Zeitbereich wie zuvor statt, durch Grob- und Feinsynchronisation werden die beiden Zeitsample identifiziert, zwischen denen das Symbol anfängt. Ein Resampling befreit dann von einer vorhandenen Dopplerverschiebung. Es hat sich jedoch die maximale FFT-Längen vervierfacht und es stellt sich die Fra-

²Konzeptstudien zur Breitbandkommunikation 10-50kHz, 2005

ge, ob ein Echtzeitbetrieb mit der derzeitigen Hardware noch möglich ist. Das ist derzeit aktueller Forschungsstand. Der Mehrträger-Vektor, in dem sich die komplexen Signalraumdaten und die Piloten zur Kanalvermessung befinden, ist um den Faktor 8 angewachsen. Nun können nicht naiv alle Trägerinhalte ausgelesen werden. Dort wo keine Bandinformation gesendet wurde, würden Rauschwerte das Ergebnis verfälschen. Daher muss die Wertigkeit des Mappings um ein NULL-Symbol (-) erweitert werden, wie in der folgenden Abbildung skizziert:

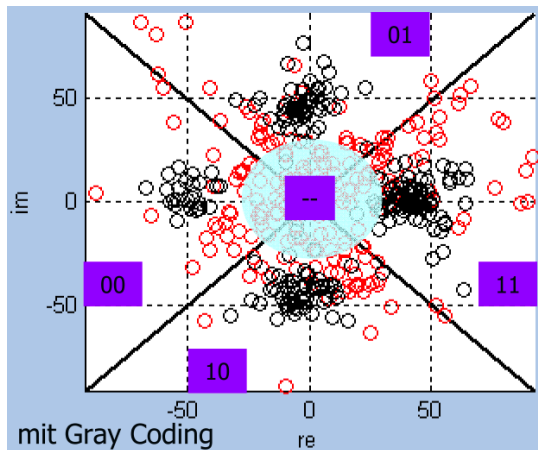


Abbildung 2: Klassisches QPSK-Mapping und Gray-Coding der Dibits wurde um ein NULL-Symbol (-) zu einer fünfwertigen Entscheidung angereichert, damit dort, wo keine Energie vorhanden ist, die zugehörigen Träger ausgeblendet werden können, nicht in das Gesamtergebnis einfließen.

In einem Blockungsprozess werden nun singuläre Trägerinformationen (linker und rechter Nachbar NULL) mit dem NULL-Symbol überschrieben. Also dort, wo durch die Kanalvermessung große Kanal Korrekturwerte ermittelt werden, durch fehlende Energie nichtausgesendeter Piloten, dort werden pauschal $h_{ij} := 0$ und $y_{ij} := 0$ zurückgesetzt. Dabei ist auf eine Zurückführung auf das Grundband der Indizes höherer Bänder (2-8) durch die Abbildung $j - (\text{Bandnummer} - 1) * N$ zu achten. Am Ende dieser Iteration sind nur noch zusammenhängende Belegungsfelder und NULL-Belegungsfelder vorhanden, Störungen auf Einzelträgern eliminiert. Das Maximum-Ratio-Combining

$$\begin{aligned} \bar{s}_j &= \frac{\sum_{BN=1}^8 \sum_{i=1}^{\mu} h_{i(j+N(BN-1))}^* y_{i(j+N(BN-1))}}{\sum_{BN=1}^8 \sum_{i=1}^{\mu} |h_{i(j+N(BN-1))}|^2} \\ &= s_j + \frac{\sum_{BN=1}^8 \sum_{i=1}^{\mu} h_{i(j+N(BN-1))}^* n_{i(j+N(BN-1))}}{\sum_{BN=1}^8 \sum_{i=1}^{\mu} |h_{i(j+N(BN-1))}|^2} \end{aligned}$$

fällt mit der Bandanzahl $BN = 1$ auf das Grundverfahren zurück, wobei für jeden Träger durch die gelöschten Empfangsdaten $y_{ij} := 0$ und Kanal Korrekturwerte $h_{ij} := 0$ in nicht genutzten Bandanteilen faktisch kürzere Summenbildungen vorliegen. Damit sieht das Konzept auf der Empfängerseite ebenfalls zwei Zusatzschritte vor:

Schritte auf Seiten des Empfängers:

1) Synchronisation, Resampling, wie im Einbandfall im

Grundband

2) Iterative Dekodierung nun jedoch mit dem achtfachen Datenumfang und erweitertem Mapping um das NULL-Symbol

3) Combining von Daten- und NULL-Symbolen und Weiterleitung an den EC-Layer

Zusammenfassung

Es wurden das Ressourcen-Sende-Problem in „het nets“ und ein simultaner statt paralleler Breitband-Lösungs-Ansatz vorgestellt, um in heterogenen Verbänden ressourcenunterschiedliche Teilnehmer vernetzen zu können. Dabei wurde das klassische Prinzip, nachdem Sender und Empfänger technisch immer in dem gleichen Frequenzband senden und empfangen, aufgebrochen.

Anhand der eingeführten Burst-Kommunikation wurde dafür die Gesamtbandbreite um den Faktor 8 aufgestockt, durch Inkaufnahme höherer Abstraten im Gesamtnetzwerk. Da jedoch in Unterwassertelefonen Abstraten von bis zu 240 kHz vorliegen, ist das keine echte Einschränkung, einzig das vielelementige tieffrequente Beamforming stellt derzeit die Beschränkung dar, wird durch den technischen Fortschritt jedoch kompensiert. Den algorithmische Herausforderungen konnte begegnet werden. Es steht noch aus, ob nach der Implementierung auf dem DSP in dem hydroakustischen Modem ein Echtzeitbetrieb aufgrund der vervielfachten Rechenressourcen möglich ist und wo ggf. Vereinfachungen durchgeführt werden könnten. In diesem Ansatz werden derzeit nur identische Spiegelungen des Grundbandes berücksichtigt, komplexere Kodierungen, auch ohne feste äquidistante Bandgrenzen, sind mögliche Flexibilisierungen.

Literatur

- [2015J] Justus Fricke, Ivor Nissen. *Experiment zur Untersuchung der Auswirkung von digitaler Kommunikation mit JANUS auf die Verständlichkeit analoger Sprachkommunikation nach STANAG 1074 unter Wasser*. DAGA, Nürnberg, März 2015
- [2015M] Michael Goetz, Ivor Nissen. *Akustisches mobiles ad-hoc Netzwerkprotokoll - GUWMANET*. DAGA, Nürnberg, März 2015
- [2014] Ghaith Hattab, Mohamed Ibnkahlia. *Multiband Spectrum Access: Great Promises for Future Cognitive Radio Networks*. in Special issue Future Radio Spectrum Access, Proceedings of the IEEE, Volume 102, Number 3.
- [2009] Ivor Nissen. *Alternativer Ansatz zur verratsarmen Unterwasserkommunikation durch Verwendung eines Transienten im Kontext von IFS und JUWEL*. FWG, Technischer Bericht TB2009-3. Januar 2009.
- [2008] Ivor Nissen. *Adaptive Systems for Mobile Underwater Communications with a p(oste)riori Channel Knowledge, Lecture Notes First Half.*, FWG-Report 59, Kiel, Dezember 2008.
- [1985] David Chase. *Code Combining - A Maximum-Likelihood Decoding Approach for Combining an Arbitrary Number of Noisy Packets*, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS., VOL. COM-33, NO. 5, MAY 1985