

Adaptive akustische Unterwassernetzwerke

Dimitri Sotnik

Fraunhofer-Institut FKIE, Zanderstraße 5, 53177 Bonn, Email: dimitri.sotnik@fkie.fraunhofer.de

Einleitung

Für die Unterwasserkommunikation wird hauptsächlich Akustik verwendet. Schallwellen dienen der Übertragung als Träger. Damit lassen sich im Gegensatz zu Funkübertragung hohe Reichweiten erzielen. Wasserschall hat jedoch den großen Nachteil, sehr von der Umgebung abzuhängen. Die Latenzzeit beträgt 6-7 Sekunden bei einer Reichweite von ca. 10 km. Zudem verändern sich Doppler- und Zeitspreizung sehr schnell und unvorhersehbar, auch während einer Übertragung. Die starke Absorption, aber auch Umwelteinflüsse von Meeressäugern und Schiffen können das Signal zudem beeinträchtigen. Hohe Bitfehlerraten sind daher zu erwarten. Meeressäuger können sich trotz dieser Einschränkungen sehr gut anpassen und verständigen. Für digitale Kommunikation dagegen gibt es noch nicht viele Lösungen. Neben der gezielten Vorkonfiguration der Modems an die jeweiligen Seegebiete, wird auch an der dynamischen Anpassung zur Laufzeit geforscht. Zusätzlich zu dem Vorgehen, jede Nachricht während dem Empfang zu analysieren und das Modem dahingehend anzupassen, wird vorgeschlagen, die Kenntnisse des Netzwerks auszunutzen. Ein Modem kann sich immer nur auf die eine einzelne Übertragung einstellen. Es kennt nicht Empfänger oder den Versender. Im Netzwerk kann es jedoch nötig sein, zu unterscheiden, ob nur ein Einzelner, wenige oder alle die Nachricht erhalten sollen. Ein Netzwerkprotokoll kennt lokal empfangene Nachrichten, wer sie versendet hat und an wen zukünftige Nachrichten zu versenden sind. Zusammen mit dem vom Modem erfassten Daten, wie dem Signal-Rausch-Verhältnis oder der Doppler- und Zeitspreizung, kann das Netzwerk diese Unterscheidung selbst durchführen. Noch vor dem Versenden einer Nachricht kann das Signal dahingehend gezielt angepasst werden, ohne das ein Mensch nachjustieren muss.

Knoten und Netzwerkwissen

Studien wie [1] und weitere befassen sich mit der direkten Modemanpassung zur Laufzeit. Im Vergleich zu Funkübertragungen ist die Bitfehlerrate aber immer noch sehr hoch. Durch Kenntnis des Netzwerks und die seiner Teilnehmer wäre es möglich, spezifische Anpassungen vorzunehmen, um die am besten geeignete Übertragung zu erreichen. Zum Beispiel das Umschalten zwischen hochfrequenter (HF) oder tieffrequenter (LF) Übertragung, je nachdem was die Empfänger unterstützen. Auch die Verwendung unterschiedlicher Modulationsverfahren oder die Übertragungsleistung kann auf Netzwerkebene entschieden werden. Die folgende Auflistung enthält Merkmale die zur Laufzeit ggf. bekannt sind [2]:

- Position und Distanz

- unterstützte Signaltypen und Codierung
- unterstützte Frequenzbänder
- Mobilität
- Nachhall/Echos

Auf Basis dieser Informationen lassen sich folgende Parameter anpassen.

- Übertragungsleistung (Lautstärke)
- Signaltypen und Codierung (Modulation, Anzahl Symbole, etc.)
- Frequenzbänder (HF,LF)
- Nachrichtenlänge
- Schutzintervall

Die Position bzw. die Distanz ist eines der Hauptmerkmale, die wichtig sind, zur Entscheidung, ob die Nachricht mit hoher Leistung (Laut) oder geringer Leistung (Leise) gesendet wird. Je nach Szenario kann es sinnvoll sein nur wenige bestimmte Knoten zu erreichen. Generell kann eine zu hohe Leistung auch dazu führen, dass das Signal beim Empfänger übersteuert und der Nachhall sich verlängert. Zu Leise würde entsprechend niemand hören. Eine geringe Distanz kann auch ausschlaggebend sein um eine andere Modulation oder Frequenz zu wählen, die eine höhere Datenrate zulässt. Weiter können entfernte Knoten, zu denen keine Route besteht, nur mit einem robusteren Verfahren kommunizieren.

Die Konfiguration der Signaltypen, Kodierung und der Frequenz hängt jedoch immer davon ab, ob der Kommunikationspartner diese auch beherrscht und dekodieren kann. Die Fähigkeiten eines jeden Knoten werden in Unterwasser-Netzwerken mittels diverser Erst-Kontakt-Verfahren ausgehandelt wie in [3] vorgestellt. Dazu wird bei Erst-Kontakt mit einem neuen Knoten die passende Sprache entschieden. Es ist jedoch auch zur Laufzeit möglich die Fähigkeiten der anderen Teilnehmer durch Mithören zu erfassen. Ein Knoten, der hochfrequent sendet, kann in der Regel auch hochfrequent empfangen.

Mit der Anwendungssprache GUWAL[®][4], werden die Knoten in 4 Kategorien eingeteilt. Boden-, Mobil-, Luft/Überwasser- und Gateway-Knoten. Jeder Knoten ist durch seine Multicast GUWAL-Adresse zu einer dieser Gruppen zuzuordnen. Damit können ohne den Austausch separater Nachrichten Annahmen getroffen werden. Ein AUV (mobiler Knoten), in Bewegung, hat ein anderes Doppler-verhalten, als ein stationärer Knoten.

Adaptivität

In bisherigen Netzwerken wurde dieses Wissen oft nur sehr differenziert betrachtet. Es wurde ein Verfahren mit allen dazugehörigen Konfigurationen wie Modulation, Codierung und Frequenz vor dem Ausbringen des Netzwerks an die zu erwartenden Umwelteinflüsse angepasst. Zur Laufzeit wurde dabei in der Regel nur das Modem beim Empfang nachjustiert. Dies führt jedoch oft zu überdimensionierten und verschwenderischen Konfigurationen. Studien wie [5, 1] befassten sich bereits mit Themen wie der automatischen Anpassung der Sendeleistung und der Eingangsverstärkung. Dabei wird häufig die niedrigste mögliche Leistung als Optimum angesehen. Dies ist jedoch oft nur auf die jeweiligen Knoten selbst optimal. In einem Netzwerk kann es durchaus sinnvoll sein, dass Knoten nicht nur ihre direkten Nachbarn, sondern entfernte Cluster erreichen müssen, um die Information zu verbreiten [6]. Es wird dabei vor allem anhand Metriken wie *SNR*, *Doppler*- und *Zeitspreizung* festgelegt. Letztere entsteht durch Nachhall inklusive diskreter Echos, die durch Reflexion des Signals entstehen. Diese können als Metrik eingesetzt werden. Die Anpassung sogenannter Schutzintervalle könnte damit zur Laufzeit durchgeführt werden [7]. Wie auch beim Menschen können Echos auch genutzt werden, um eine Eigenkorrektur des Signals durchzuführen. Wie das eigene Hören des gesprochenen Wortes Aufschluss gibt, kann ein Echo beim Sender ebenfalls nützlich sein. Beispielsweise können taube Menschen, bekanntlich schlecht sprechen, da sie sich selbst nicht hören. Eine Transmission, die direkt beim Aussenden einer Nachricht bei sich selbst erkannt wird, kann dementsprechend Rückschlüsse auf die Qualität geben. Wenn die Transmission stark verzerrt ist oder übersteuert, ist evtl. eine Anpassung nötig (Siehe Patent WO 2019 / 206 740 A1 [8]).

All diese Informationen über die jeweiligen Knoten und das Netzwerk, bilden eine gute Grundlage, um geeignete Routen und Anpassungen zur Laufzeit zu bestimmen. Dafür ist es notwendig, bestimmte Indikatoren aus dieser Datenbank zu berechnen, die nicht nur auf eingehenden Metainformationen basiert. Ähnlich zu den tauben Menschen im Beispiel zuvor benötigen auch gut hörende manchmal ein Feedback. Um zum Beispiel die Aussprache einer neu gelernten Sprache zu verbessern, muss ein Lehrer das gesprochene Wort beurteilen und ggf. korrigieren. Die bisherigen Metriken bezogen sich immer auf den Empfang einer Nachricht. Viel wichtiger ist jedoch zu wissen: Mit welchem SNR kam das Signal beim Empfänger an? Wie laut ist es gerade beim Empfänger? Wann sendet ein unmittelbarer Nachbar? Diese Feedbacks sind auf drei Arten zu bekommen: Durch explizites senden von Feedbacknachrichten, als Teil von regulären Nachrichten oder durch Mithören.

Mit jeder expliziten Nachricht wird, der Kanal unnötig blockiert und eigentliche Nachrichten evtl. gestört. Auch sollten die Nachrichten so kurz wie möglich sein [9]. Das Netzwerkprotokoll GUWMANET[®] wurde unter anderem speziell für die Anforderung entwickelt möglichst kurze Nachrichten zu versenden[10]. Längere Nachrichten

führen zu längeren Übertragungen und somit zu einer höheren Kollisionswahrscheinlichkeit. So werden als Overhead zu GUWAL (128 Bit) lediglich 10 Bit hinzugefügt, um Nachrichten an das richtige Ziel zu leiten. GUWAL enthält nur Multicast-Adressen der Quelle und des Ziels. Die Zuordnung ist daher nicht eindeutig. Darüber hinaus besteht bei der Übertragung keinerlei Kenntnis über die Zwischenstationen. GUWMANET erweitert daher das Paket um jeweils 5 Bit für den eine eindeutige ID des aktuellen Senders und 5 Bit für die ID des vorhergehenden Knoten (Last-Hop-ID). Damit ist der Weg der Nachricht, auf die letzten zwei Stationen genau nachvollziehbar. Ein weiterer Aspekt ist das implizite Bestätigen des Empfangens. Statt expliziter Feedbacknachrichten wird auf weitergeleitete Nachrichten gehört. Wenn die ausgesendete Nachricht vom Nachbar wiederholt wird, ist Sie definitiv korrekt empfangen worden. Diese effizienten Aspekte können gemeinsam genutzt und erweitert werden, um beispielsweise beim impliziten Bestätigen auch ein qualitatives Feedback der Nachricht zu erhalten.

Last-Hop-SNR

Das SNR wäre als sich anbietender Indikator für die Qualität der eingehenden Nachricht gut geeignet, um sie dem Versender mitzuteilen. Ein Knoten könnte so wissen, wie die Nachricht angekommen ist und ggf. die nächste Konfiguration entsprechend anpassen. Zusammen mit dem GUWMANET Header, speziell der Last-Hop-ID, kann das SNR auch zu dem direkten Vorgänger zugeordnet werden.

Das SNR lässt sich bereits mit 4 Bit ausreichend gut beschreiben. Oft genügt eine grobe Schätzung, statt des genauen Verhältnisses. Ob das Signal mit einem SNR von 20dB oder 21dB dekodiert wird, ist für ein Feedback zwischen Knoten irrelevant. Viel wichtiger ist der Bereich um 0 dB. Dementsprechend reichen 4 Bit als Feldauflösung. Damit wäre der Bereich von 0 bis 15 dB in 1 dB Schritten abgedeckt. 0 bzw. 15 sind dabei als offene Grenzen ≤ 0 dB / ≥ 15 dB anzusehen. Ein Signal das aufgrund eines zu geringen SNR nicht dekodiert werden kann, lässt auch nur wenig Rückschluss zum Absender zu, auch eine Weiterleitung würde ausbleiben. Abbildung 1 zeigt zwei Schritte einer Übertragung in GUWMANET. Zur Vereinfachung werden die GUWAL- und GUWMANET-Adressen gleichgesetzt.

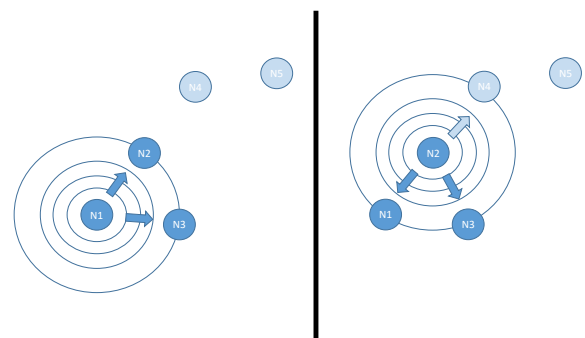


Abbildung 1: Die Übertragung eines GUWAL Pakets mittels GUWMANET in 2 Schritten

Schritt 1 Knoten N1 sendet eine Nachricht aus, die an Knoten N5 adressiert ist. Das GUWAL Paket enthält dabei die Quelle N1 und das Ziel N5. Sender ID ist ebenfalls N1, Last-Hop-ID ist leer. Sowohl N2 als auch N3 empfangen die Nachricht mit unterschiedlichem SNR.

Schritt 2 Jede neu empfangene Nachricht, wird nun bis zu 3 mal wiederholt. N2 sendet nun die gleiche Nachricht, mit neuer Sender ID: N2 und Last-Hop-ID: N1, aus. Zusätzlich erhält das Paket nun das SNR des letzten zugehörigen Knoten (Last-Hop). N1 bekommt die Nachricht nun ebenfalls und vermerkt eine implizite Bestätigung. Durch die Last-Hop-ID kann N1 eindeutig das SNR zu seiner Sendung beziehen und bekommt nun ein Feedback zur seiner vorherigen Sendung.

Damit kann der Versender (N1) nun passend reagieren. Ist das SNR sehr hoch, kann die nächste Übertragung mit höherer Datenrate, oder niedrigerer Leistung gesendet werden. Ist das SNR dagegen niedrig, kann für die nächste Übertragung ein robusteres Verfahren gewählt oder die Sendeleistung erhöht werden.

Der dritte Knoten (N3) hört ebenfalls die Wiederholung von N2. Diese Link-Information ist auch hier wertvoll. Die Qualität dieser Verbindung wird ebenfalls in der Datenbank von N3 gesichert und für Routing benutzt. Sollte die Verbindung N3-N2 nicht funktionieren, so ist N2 evtl. über N1 erreichbar.

Überladen vorhandener Bits

Die Anzahl der Overhead Bits die Unterwasser gesendet werden ist häufig fest. Die Erweiterung um 4 Bits wäre dementsprechend bei jeder Nachricht durchzuführen. Bei der initialen Sendung existiert kein Vorgänger, zu dem sich das SNR beziehen kann. Daher sind diese Bits obsolet und müssen mit Nullen aufgefüllt werden. Stattdessen könnte dieses freie Feld für andere interessante Indikatoren genutzt werden. Folgende sollen betrachtet werden.

Sendeleistung Die Sendeleistung einer Nachricht kann zusammen mit dem dazugehörigen SNR Rückschlüsse über die Distanz geben. Diese ist jedoch nicht einheitlich standardisiert.

Restenergie In einem Unterwasser-Netzwerk, indem Knoten zu meist Batterie betrieben sind, ist es sinnvoll zu wissen, ob bestimmte Knoten noch genügend Restenergie haben. Diese ist jedoch ebenfalls abhängig von der Batteriespannung, Kapazität und weiterem.

Bewegung Anhand eines Bits kann der Sender mitteilen, ob er gerade in Bewegung ist. Dadurch kann eine bessere Auswahl der Doppler-Filter erreicht werden.

Hintergrundrauschen Die Umgebungsgeräusche eines Empfängers können Hinweise darauf geben welche Modulation, Frequenz oder Sendeleistung vor der nächsten Sendung gewählt werden soll.

Konvoi Bit Speziell für Netzwerkprotokolle die keine geregelte Zeitschlitze zum Senden definieren oder

keine Trägerprüfung zur Kollisionsvermeidung haben, ist eine Kennzeichnung nachfolgender Pakete nützlich (Konvoi Bit).

Hintergrundrauschen

Die Umgebungsgeräusche eines jeden Knoten sind beim Modem immer nur relativ vorhanden. Ähnlich zum menschlichen Gehör kann es nur relativ zu einem vorhergehendem Pegel Aussagen treffen. Ein dB Pegelwert wäre so von der Kalibrierung der Modem-Hersteller abhängig und würde untereinander abweichen. Mit einem Gedächtnis über gesammelte Umgebungs-Pegelwerte, lässt sich jedoch unabhängig sagen, ob es zu einem bestimmten Zeitpunkt lauter oder leiser ist. Ein Beispiel: Alle 10 min wird der jeweils spezifische Pegel gesichert. Die Werte können sinnvoll aggregiert werden, um Ausreißer und sehr alte Werte auszuschließen. Zu einem bestimmten Zeitpunkt kann so der aktuelle Pegelwert der letzten 2 Minuten mit dem aggregierten Indikator der letzten Stunde verglichen werden und eine Aussage zur Ordnung getroffen werden. Mit 5 Zuständen (3 Bit) können geeignete Stufen definiert werden (Tabelle 1). *Sehr leise* und *sehr laut* entsprechen dabei mehr als dem 4-fachen des *neutralen* Pegels. *Leise* und *laut* bis zum 2-fachen. Durch eine geeignete Alterungs/Aggregatsfunktion, werden die Stufen *sehr leise* und *sehr laut* nur bei kurzzeitig auftretenden Änderungen erreicht. Längerfristige Störungen/Ruhephasen würden den Indikator entsprechend anheben bzw. senken, die Stufen *lauter* bzw. *leiser* gewählt.

Tabelle 1: Hintergrundrauschen in 5 Stufen

Zustand	1	2	3	4	5
Stufe	sehr leise	leise	neutral	laut	sehr laut

Zu jeder initialen Nachricht, in denen die 4 Bit für Last-Hop-SNR ungenutzt sind, kann somit die aktuelle Stufe der Umgebungslautstärke übermittelt werden. Passend zur Stufe kann die nächste Sendung angepasst werden.

leise Die Stufe *leise* wird bei länger anhaltenden Ruhephasen erreicht. Der Knoten wird somit auf diesem Kanal / Frequenzband für die nächsten Nachrichten ein besseres SNR haben. Eine höhere Datenrate oder eine längere Nachricht wären somit für die nächste Sendung möglich.

laut Die Stufe *laut* wird nur durch dauerhafte Störung erreicht. Der Kanal / das Frequenzband wird bis zur nächsten Sendung weiterhin gestört sein. Ein robusteres Verfahren oder eine höhere Sendeleistung wird nötig sein um die Übertragung zu gewährleisten.

sehr laut Die Stufe *sehr laut* wird nur bei einer kurzfristigen Störung auf dem Kanal erreicht. Auch wenn vermutet wird, dass die nächste Sendung nicht korrekt ankommt, so sollte an der Konfiguration des Senders vorläufig nichts geändert werden. Die Störung ist entweder bis dahin vorüber oder die nächste Nachricht des Knotens, enthält die Stufe

laut.

sehr leise Die Stufe *sehr leise* wird erreicht, wenn der Indikator *rapide* fällt. Es ist anzunehmen, dass eine vorübergehende Störung nun vorüber ist. Die nächste Sendung kann dementsprechend eine höhere Datenrate haben.

neutral Um eine Abgrenzung zu den Stufen *leise* und *laut* zu schaffen, ist die Stufe *neutral* für kleinere Änderungen des Pegels vorgesehen. Bei gleichbleibendem Rauschen, kann der Sender die nächste Übertragung anpassen, wobei andere Qualitätsmerkmale zur Verbindung stärker ins Gewicht fallen.

Convoi Bit

Für das Ambient Noise Feld werden 3 Bit reserviert. Das 4. Bit kann ebenfalls sinnvoll eingesetzt werden. In GUWMANET werden Nachrichten asynchron versendet. Um Kollisionen zu vermeiden, wird jede Nachricht für eine kurze, zufällige Anzahl an Sekunden zurückgehalten (Jitter). In Abbildung 2 wird die zeitliche Abfolge einer Nachricht in GUWMANET aufgezeigt. Im linken Teil wird eine Nachricht von Knoten N1 versendet. Um direkt eine folge Nachricht zu senden, wählt N1 nun einen Jitter (J_{N1}). Knoten N2 empfängt die Nachricht und wählt einen Jitter J_{N2} für die Wiederholung der Nachricht. Wenn $J_{N2} \leq J_{N1}$ gewählt wird, so entsteht eine Kollision, da Knoten N2 die Wiederholung bereits sendet, bevor ein erneuter Empfang registriert wird. Mit dem Convoi Bit (Bild 2 Rechts) würde die erste Nachricht kennzeichnen, dass eine weitere folgt. Knoten N2 würde nun eine bestimmte Zeit alle ausgehenden Nachrichten blockieren (block time). Nach Ablauf der Blockierung und erneuter Wahl des Jitters kann die Nachricht kollisionsfrei übertragen werden.

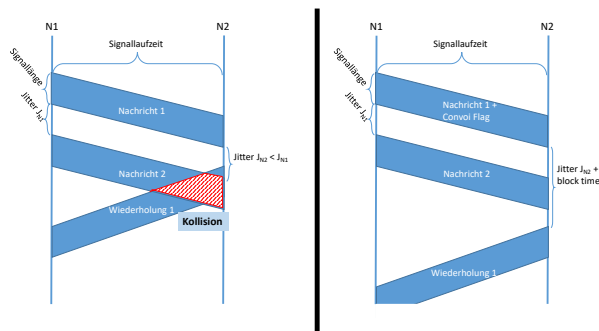


Abbildung 2: Zeitliche Darstellung einer Übertragung mit GUWMANET. Links ohne Convoi Bit, rechts mit Convoi Bit

Zukünftige Arbeiten

In diesem Beitrag wurden einige Aspekte genannt, die für eine Anpassung auf Netzwerkebene sprechen. Es kann zudem sinnvoll sein, die übertragene Nachricht, um Status-Indikatoren zu erweitern. In weiteren Studien muss nun gezeigt werden, welche Indikatoren dafür geeignet sind. Auch ist die Frage offen, ob eine Erweiterung des Nachrichtensignals eine signifikante Verbesserung erzielt. Im Rahmen des internationalen Projekts EDA-SALSA[11] werden diese Fragen bis zum Jahr 2022 behandelt. Dazu

wird GUWMANET um das LAST-HOP-SNR erweitert und die Übertragung zur Laufzeit auf über das Netzwerkprotokoll angepasst. Dies soll anhand eines Gedächtnisses über die genannten Indikatoren Entscheidungen treffen. Für die Evaluierung wird in Hafentests und Seeversuchen ein Netzwerk mit über 15 verschiedenen Knoten und Fahrzeugen aufgebaut. Damit wird eine Grundlage für eine realitätsnahe Simulation geschaffen, die für Folge-Studien genutzt werden kann.

Literatur

- [1] Yishan Su, Yibo Zhu, Haining Mo, Jun-Hong Cui, and Zhigang Jin. A joint power control and rate adaptation mac protocol for underwater sensor networks. *Ad Hoc Networks*, 26:36–49, 2015.
- [2] Dimitri Sotnik, Michael Goetz, Ivor Nissen, Håvard Austad, Koen Blom, Henry Dol, Arwid Komulainen, Ingrid Mulders, Roald Otnes, Ronald in't Velt, Paul van Walree, and Till Wiegand. *Cognitive Underwater Acoustic Networking Techniques*. Springer Nature, 2020.
- [3] Roberto Petroccia, João Alves, and Giovanni Zappa. Fostering the use of janus in operationally-relevant underwater applications. In *2016 IEEE Third Underwater Communications and Networking Conference (UComms)*, pages 1–5. IEEE, 2016.
- [4] Ivor Nissen and Michael Goetz. Generic underwater application language (guwal)-specification of tactical instant messaging in underwater networks. *Research Department for Underwater Acoustics and Marine Geophysics*, 2012.
- [5] Joseph A. Rice and Vincent K. McDonald. Adaptive modulation for undersea acoustic telemetry. *Sea Technology*, 40(5):29–36, 1999.
- [6] Fatma Bouabdallah, Chaima Zidi, and Raouf Boutaba. Joint routing and energy management in underwater acoustic sensor networks. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 14(2):456–471, 2017.
- [7] F. Bouabdallah and R. Boutaba. A distributed ofdma medium access control for underwater acoustic sensors networks. In *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–5, 2011.
- [8] Ivor Nissen. Method for adjusting a transmission parameter of a transmitter of an underwater communication device, 10 2019.
- [9] Michael Goetz and Ivor Nissen. Akustisches mobiles ad-hoc netzwerkprotokoll-guwanet. *DAGA, Nürnberg, März*, 2015.
- [10] Michael Goetz and Ivor Nissen. Guwanet-multicast routing in underwater acoustic networks. In *2012 Military Communications and Information Systems Conference (MCC)*, pages 27–42. IEEE, 2012.
- [11] Henry Dol. *EDA-SALSA: Towards smart adaptive underwater acoustic networking*. IEEE, 2019.