

海洋開発の可能性を広げる水中音響通信

武田 啓之 福井 潔

現在、海洋資源・海洋再生可能エネルギー開発の場面で、水中無人機(AUV、ROVなど)の利用が注目されている。水中無人機の利用は、従来の有人による海洋開発の効率を大きく改善できるという点で、海洋開発を大きく前進させる可能性がある。加えて、広大な海洋を効率よく探索するためには、複数の水中無人機を協調して運用することが求められ、協調運用の実現には水中無人機間の通信が必要となる。

上記海洋開発のニーズを踏まえ、我々は無人機の協調運用に寄与する水中音響通信の技術開発に取り組んでいる。この技術開発の目標スペックは、通信速度:32kbps・通信距離2km (BER(Bit Error Rate:符号誤り率)は 10^{-2})である。また、複数無人機が混在する状態での通信も可能とする。本寄稿ではこの取組みを紹介する。

開発の背景及び目標

水中音響通信は水中無人機の運用の可能性を広げるキーテクノロジーである。この水中音響通信の可能性として想定する水中音響通信の運用イメージを図1に示す。図1に示すような運用を行う場合、効率的に海洋を調査・探索するには、1台の無人機が少なくとも数kmオーダーの範囲をカバーする必要がある。詳細は割愛するが、水中では電磁波の減衰が激しく、光は水中浮遊物による散乱が大きいという問題がある。そのため水中では電磁波通信は極めて近距離(10m以内)、光通信も100m前後の利用が想定される。従って数kmオーダーの長距離通信では「音響」通信が現実的な選択肢となる。

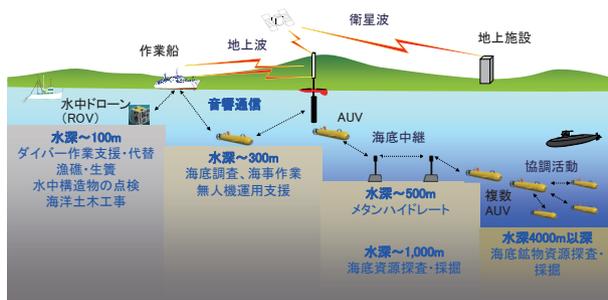


図1 想定する水中音響通信の運用イメージ

しかし、音響通信にも限界はある。まず、広帯域な送波器を実現することに限界がある。また、電磁波ほどではないが音も高周波になるほど減衰が大きくなるので、広帯域(高速)な通信は近距離に限られる。従って、この通信距離と通信速度はトレードオフの関係があり、通信速度・通信距離の積として、40kbps・kmが性能基準となっている¹⁾。この性能基準は2000年に記載された文献¹⁾で言及され現在でも水中音響通信メーカーが公開しているスペックをみると、おおむねこの基準以下の性能である。

我々は水中音響通信機の製品開発にあたり、既存製品を超える32kbps・2km (64kbs・km)を設計目標とした。水中無人機は数kmオーダーでの通信が必要であり、かつ水中無人機がセンサーデータから分析した情報(画像など)を定期的送信するには少なくともこの程度の通信速度は必須と考えた。ここで、送信対象がコマンドなどではなく画像などのセンサーデータの分析結果であることを考慮し、目標のBERを 10^{-2} と必要最小限とすることで、通信距離2kmでの高速化(32kbps)を図っている。

目指す水中音響通信システム

前章では水中音響通信機で用いるモデム(変復調器)単体の通信性能を設定した。水中での移動体通信を目標とする場合、モデム単体の通信性能だけでなく、陸上の無線同様に多ノードが混在したネットワークシステムとして構築する必要がある。

図2に今回の製品化で実現したいネットワークを示す。

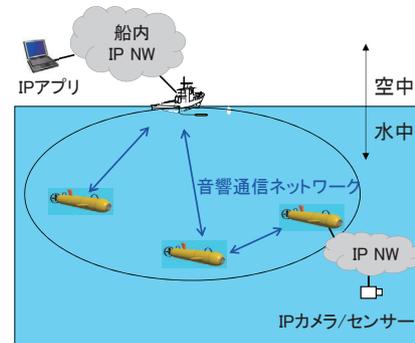


図2 今回の製品化で実現したいネットワーク

水中の移動体同士の通信にはマルチホップ通信(水中無人機搭載のモデムをリレー的に経由して行う通信)に対応した音響通信ネットワークを構築する。この音響通信ネットワークでは複数の無人機で収集したデータを音響通信で即時に母船まで送信することにより効率的に広範囲の搜索することができる。またマルチホップ通信により単一のモデムで2kmだった通信距離を更に延伸することができる。水中では音響通信を行う一方、船内ではネットワークで繋がっている機器や船外の設備などで使用されているIPNW(汎用NW)にシームレスに接続させる。

今回のモデムデータ構造(構想)を図3に示す。水中音響通信では、通信伝送路に依存する物理層及びデータリンク層を音響通信用に新たに設計し、ネットワーク層ではマルチホップ通信のためにMesh-Underプロトコル²⁾を用いる。またIPNWのEther以上の情報をカプセル化することにより、水中音響通信(マルチホップ通信)ではIPNWのプロトコルを意識することなく母船との接続性を確保することができる。

APL層	カプセル化	IPアプリ
ネットワーク層	Mesh Under	
データリンク層	音響MAC	802.3MAC
物理層	音響PHY	Ether
	音響通信NW	IP NW

図3 今回の水中音響モデムフレーム構造

水中音響通信の課題

前項ではシステム全体に触れたが、本項では物理層(変復調)に触れる。変復調は、ビット列(情報)を通信路(水、空気)に伝搬させて相手に情報伝えるために行われるが、通信路の種類によって大きく影響を受ける部分である。

水中音響通信の大きな課題は①海面海底反射などによるマルチパス干渉、②移動体通信に伴うラーゼドップラとなる。①、②それぞれの問題と対策を説明する。

図4は、マルチパスのイメージとマルチパス干渉の例である。マルチパスとは図4上段のように、海面や海底などの境界面に反射した複数の波が遅延を伴い到来する現象である。マルチパスの影響は図4下段に示した(説明の分かりやすさのため直接波と一つの反射波だけを設定している)。ビット列を変調する単位をシンボルというが、図4にあるようにk番目のシンボルを破線の直接波の区間に合わせて復調する場合、k-1番目のシンボルの反射波が混在してしまい、正しく復調できなくなる。従ってこのマルチパス干渉に対する対策が必要である。

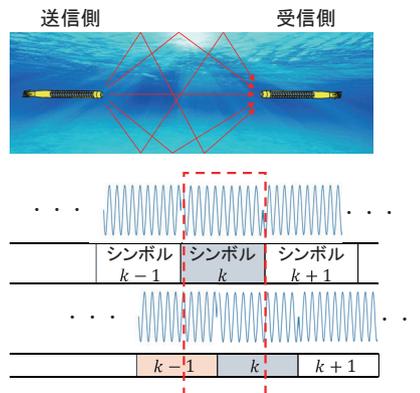


図4 マルチパス干渉

今回開発する水中音響通信変調方式はWi-Fiなどでも用いられている変調方式であるOFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing:直交周波数分割多重)を用いることにした。OFDMは上記で記載したマルチパス干渉に対する耐性が優れている方式であり、通信に使う帯域を小帯域(サブキャリア)に分割している周波数分割多重化の1種である(図5)。

サブキャリアごとに狭帯域信号を変調(マルチパス耐性)

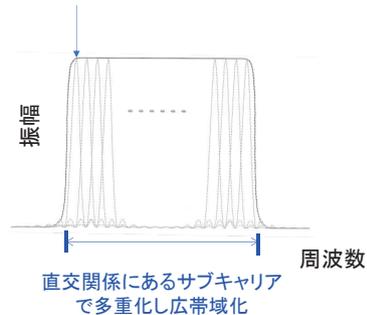


図5 OFDMのイメージ

データを大容量に送るためには通信帯域を広帯化する必要があるが、広帯域な変調を行おうとするとマルチパス遅延に弱いという問題があった。そこでOFDMのようにサブキャリアごとに狭帯域信号を変調して多重化して広帯域送信する(OFDMのサブキャリア間は直交関係(内積が0)があり相互に干渉しないことが保障されている)ことにより高速かつマルチパス遅延に強い方式となっている。

OFDMにはもう一つマルチパスに強い仕組みがある。図6に示すガードインターバルである。ガードインターバルは大きな遅延でも対処できるように、シンボル最後の部分をシンボルの先頭にコピーする。これにより、図6の例では、k番目のシンボルの復調時はk番目のシンボルの直接波と反射波のみ(ガードインターバルもk番目の反射波のコピー)の

状態となり $k-1$ 番目のシンボルの反射波の混在がなくなるので、シンボル間の干渉を防ぐことができる。

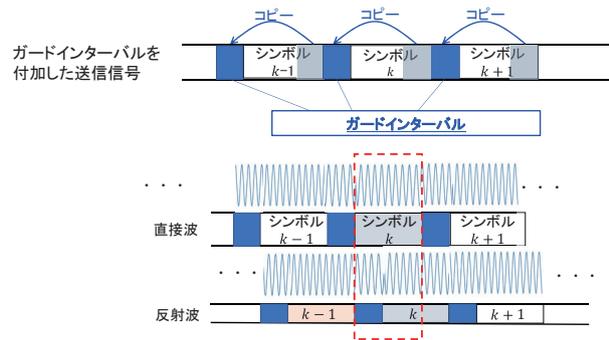


図6 ガードインターバルによるシンボル間干渉予防

このガードインターバルの長さは、使用環境で想定される遅延よりも長く設定される。水中音響通信モデムの開発でも、使用条件(水深、送信機深度・受信機深度など)を仮定し、伝搬遅延(反射波がどの程度遅れてくるか)や伝搬損失(何回までの反射回数まで考慮するべきか)を推定し(伝搬損失・伝搬遅延の推定はソナー開発などで用いている音波伝搬モデルを利用した)、ガードインターバル長を設定している。

続いて②の「移動体通信に伴うラージドップラ」を説明する。ドップラ効果は音(波)の移動に伴い音の周波数が増える現象である(救急車や消防車のサイレンを想像すると分かりやすい)。このドップラ効果による周波数変化は図5のサブキャリア間の直交関係をなくしサブキャリア間の干渉を起こす。そのためOFDMはドップラ効果に対する耐性が原理的に低い。その上、ドップラ効果のOFDMへの影響は、伝搬速度が遅い音でより顕著なので、音響通信で特に困難な問題である。

今回、水中無人機での利用を対象とした音響通信を開発しているため、ドップラ効果への対処は必要となる。我々は相対速度10kt(1ktは0.5m/s、無人機がそれぞれ5ktで逆向きに移動した場合の相対速度)での通信を可能にすることを目標にしている。

ドップラ効果により受信した波形は速度(マルチパスの経路ごとにドップラ効果による伸縮度合いも微妙に違うため平均的な速度となる)に応じて伸縮する。OFDMシンボルの前後に受信側でも既知な信号を挿入し、この既知な信号の伸縮率を測る。この伸縮率をもとにOFDMシンボル(サブキャリア間の直交性がなくなっている)を復元する。現在、この考え方をベースとしたドップラ補償法を検討している。

現在の開発状況

2020年度は通信速度32kbps・2kmを達成するための机上検討を実施し、OFDMの設計パラメーターを導出した(中には前節で説明したガードインターバルの設定もある)。また前項に記したドップラ効果の補償方法に関する調査を実施し、このドップラ効果の補償の検討も含め今後の検証に必要な水中音響通信の物理層シミュレーターを開発した。

また無響水槽で試験・評価し、水槽ということで限られた条件ではあるが水平方向の通信性能を検証し32kbps・2kmの見込みを得ている。

2021年度はドップラ補償の具体的な実現方法の検討に加え、図2に示す構想を実現するための水中でのマルチホップ方式の設計にも着手している。

2020年度は無響水槽で基本性能を確認したが、2021年度は実海面での性能検証も複数回実施する予定である。この実海面試験では、送受信器を実際に移動させた場合のドップラ補償方式を検証する。加えて、20年度の検証で設定したガードインターバルの妥当性も検証する。写真1は2021年9月に実施した実海面試験の様子である。この試験では、現在検討中のドップラ効果補償方式の検証のために、送受信器を吊下した船を移動しながらデータを取得した。また水平距離で最大800mまでのデータを取得した。

この技術の実現により、海洋開発での水中無人機運用の効率を大きく改善できると考えている。具体的には、水中無人機の移動に制約を与えることなく、複数無人機の協調運用、陸上施設との連携などに寄与できると考えている。引き続き2022年度の製品化に向けて技術開発を進めていくが、2022年度以降も技術開発を続けていき海洋開発に貢献していく。◆◆

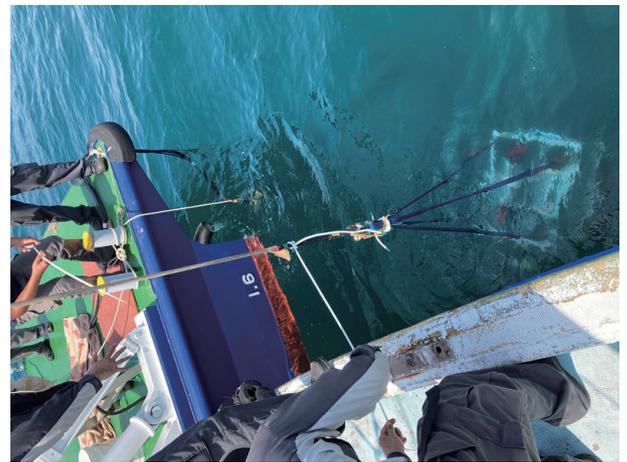


写真1 実海面試験(21年9月実施)の様子

■参考文献

1) Daniel B. Kilfoyle ,Arthur B. Baggeroer: The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry, IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, VOL.25, NO.1, p4-p27, 2000

2) 野崎正典、西村弘志、久保祐樹、柳原健太郎:スマートネットワーク向け無線マルチホップ通信技術、OKIテクニカルレビュー 第218号、Vol.78 No.1、p78、2011年10月

●筆者紹介

武田啓之:Hiroyuki Takeda. ソリューションシステム事業部
特機システム事業部 研究開発部

福井潔:Kiyoshi Fukui. イノベーション推進センター ネットワーク技術研究開発部

TiPo 【基本用語解説】

ROV(Remotely Operated Vehicle)

遠隔操作する無人の水中ロボットで、アンビリカルケーブル(電力供給、通信用のケーブル)を介して運用されることが多い(ケーブルなしのものもある)。水中ドローンと呼ばれることもある。

AUV(Autonomous Underwater Vehicle)

自律型無人潜水機。CPUと動力源を内蔵しているので母船からのコントロールなしで自律的に行動ができる(障害物に対する回避行動など)水中ロボットである。