

合成開口ソナーによる堆積層内埋没物の画像化
Buried Object Imaging with Synthetic Aperture SONAR

池田貞一郎^{1†}, 加藤健太郎², 橋場邦夫¹, 今井隆介², 南利光彦² (1)日立 中央研究所, (2)日立 ディフェンスシステム事業部
Teiichiro Ikeda^{1†}, Kunio Hashiba¹, Kentaro Kato², Ryusuke Imai², Mitsuhiro Nanri² (1)Central Research Laboratory, Hitachi Ltd., (2)Defense Systems Group, Hitachi Ltd.)

We investigate the use of Synthetic Aperture SONAR (SAS) for the buried object imaging. In the sediment, the sound wave is strongly refracted because the sound speed is distributed by layer. The refraction causes the time shift Δt in the received acoustic signal, then the SAS image is distorted. First, we examined the effects of Δt on SAS image. We calculated sound wave in the sediment layer using Biot-Stoll model. The Δt calculated is applied to the ping signal of the receiver. After the synthetic aperture process, the resolution of the image is quantified for different types of sediment porosity β . Second, a compensation technique is proposed. The technique enhances the contrast of buried object in SAS image by giving error amount Δt as time delay in the SAS process. The results of the application of the technique reveals that the improved SNR(Signal to Noise Ratio) is more than 20 dB.

1. 緒言および目的

近年, 合成開口ソナー(Syntetic Aperture SONAR: SAS)を利用した海底面の高解像度画像化技術が実用化され, 実海域試験の結果が盛んに報告されている¹⁾. SASにおける周波数は一般的に数 100 kHz 程度の高周波である. このような周波数帯域では堆積層内部には音波は殆ど伝搬されないため, 画像には主に海底面の画像が描出される. 一方で, 数 10 kHz 程度の低周波数であれば, 堆積層内へ音波はある程度の強度を持って伝搬するため, 搬送音波の周波数を数 10 kHz 帯域にすることで, 堆積層内部の合成開口処理による画像化が可能となる²⁾. 堆積層内部において音波は音速分散を持つため, 複雑な屈折現象を示す. すなわち音速一定を仮定したソナー画像処理では, 埋没物体の受信信号においては, 伝搬時刻に誤差成分 Δt が生じる.

本研究においては, 堆積層音波伝搬モデルによって計算された誤差成分 Δt をソナー受信信号に付与することにより, 合成開口処理における堆積層の影響を調べた. さらに, 誤差量 Δt を合成開口処理の補正量として与えることで, 堆積層の存在により生じる合成開口画像の誤差を補償する手法を検討した.

2. 研究方法

Fig.1 に堆積層内での伝搬時刻の誤差成分 Δt が合成開口画像に与える影響を示す. 時刻誤差量 Δt は(1)式の用にソナー周波数 f , 間隙率 β (堆積層中の液体の体積分率), 堆積層内深さ d , レンジ方向距離 r によって決定される.

$$\Delta t = g(f, \beta, r, d) \quad (1)$$

堆積層内の様々な音響特性が間隙率 β を用いることで整理出来ることがわかっており, 本研究でも様々な間隙率 β を選ぶことによって, 異なる底質の堆積層を模擬した. 堆積層内の音波伝搬は, Biot-Stoll モデル³⁻⁴⁾に従うとした. 堆積層表層近傍 1 m の音波伝搬を音線近似計算によって算出し⁵⁾, 異なる間隙

率 β の堆積層内における時刻誤差量 Δt を求めた. 次にソナー受信ピングに対して, 時刻誤差量 Δt を付与し, Fig.1 における (b) 整相データを作成した. 最後にこの受信ピングを合成開口処理することで埋没物の合成開口画像を算出し, 堆積層が存在することによる影響を定量評価した.

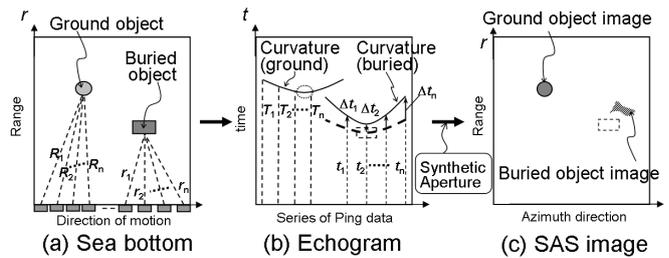


Fig. 1 Image degradation of buried object SAS image.

一方, 時刻誤差量は符号を逆転することによって, ピングデータへの補正量とすることが出来る. すなわち, Fig.2 に示すように, 適切な大きさの補正量を付与することによって, 埋没物体の受信カーバチャを合成開口カーバチャと一致させるような信号の補償をすることができる. この場合, 埋没物のカーバチャがアジマス圧縮率を最大にするように変形される一方, 埋没していない物体のカーバチャは低圧縮率方向へ歪むことになる. 本研究では, 深さ 50 cm の場所に埋没させた直径 50 cm, 長さ 2 m の円筒を, 周波数 10 kHz の合成開口アレイを用いて取得した実データに対して, 時刻補正量(符号を逆転させた Δt)を付与し, 堆積層補償の効果を検討した.

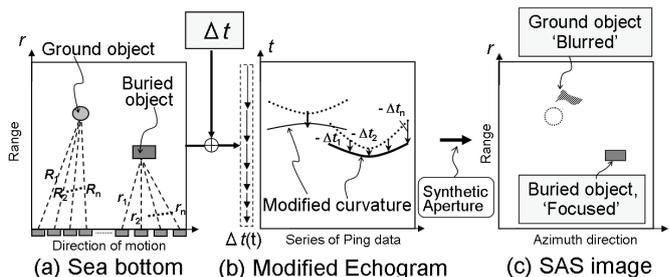


Fig. 2 Sediment compensation for SAS process.

E-mail: teiichiro.ikeda.hv@hitachi.com

3. 堆積層内での合成開口分解能

Fig.3 に堆積層中における埋没物体の画像をシミュレートした結果を示す。Fig.3(a)はアジマス方向距離 $d_{az} = 30$ cm 離れた点散乱体の合成開口画像、Fig.3(b), (c)は同じく距離 $d_{az} = 30$ cm それぞれ堆積層間隙率 $\beta = 0.4, 0.75$ の時の合成開口画像および最大輝度点を含むアジマス方向の1ラインを抽出したグラフである。 $\beta = 0.4, 0.75$ はおおむね底質が砂および泥の時に対応する。堆積層の深さ d は 0.5 m とした。ソナーおよび合成開口の条件は、周波数 20 kHz、合成開口長 10.8 m、実開口幅 25 cm であり、チャープスケーリング法⁶⁾を採用している。

Fig.3を見ると(b) $\beta = 0.4$ の時と(c) $\beta = 0.75$ の間で明確な違いが見られる。まず、(b) $\beta = 0.4$ の時には対象物の結像位置が、合成開口処理中心かつ対象物位置である $R_c = 20$ m から、結像位置が 1.4 m もレンジ方向遠方にシフトしている。一方で、(c) $\beta = 0.75$ の時には、高々 0.04 m であり通常の合成開口処理における結果と殆ど変わらない。また、PSF(Point Spread Function)においては、(b) $\beta = 0.4$ の時に、実際の散乱体数以上の多数の虚像が発生している。下段のアジマス方向最大輝度グラフでも、アジマス方向の分解能低下が見てとれる。その一方で(c) $\beta = 0.75$ の時には、堆積層がない場合(a)とほとんど変わらない。

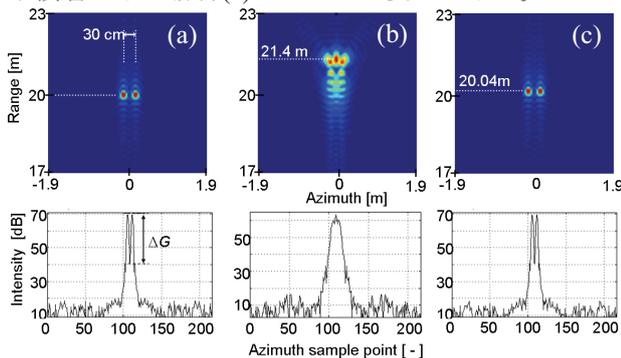


Fig. 3 SAS image of buried object; (a) Normal SAS, (b) $\beta = 0.4$, (c) $\beta = 0.75$.

Fig.4 は、様々な底質においてアジマス方向の分解能を、評価したものである。Fig.4の縦軸は、Fig.3(a)の下段のように、それぞれの合成開口画像中の2点の中心の谷の深さ ΔG (最大輝度 G_{max} - 2点中心の輝度 G_{center}) である。ソナー周波数は 20 kHz を選んでいる。Fig.4を見ると、 $\beta = 0.40$ のケースを除いた全ての底質において、 $d_{az} = 15$ cm 近辺が $\Delta G = 1.8$ dB のレイリー基準分解能となっていることがわかる。すなわち、底質が砂質(粒径大)の場合にアジマス方向の分解能は大きく低下するが、泥質(粒径小)の場合、分解能はほとんど変化しないことがわかる。その一方で、2点間距離 $d_{az} = 25 \sim 45$ cm の結果をみると、ほぼ全ての β において ΔG の値が低下していることがわかる。また、その値は最大で $25 \sim 30$ dB 程度と比較的大きなものとなっている。

以上より、堆積層の影響は合成開口における2点分解能より、2点間のコントラストの低下、対象物画像の不明瞭さ(ボヤケ)といった効果として現れていることがわかる。

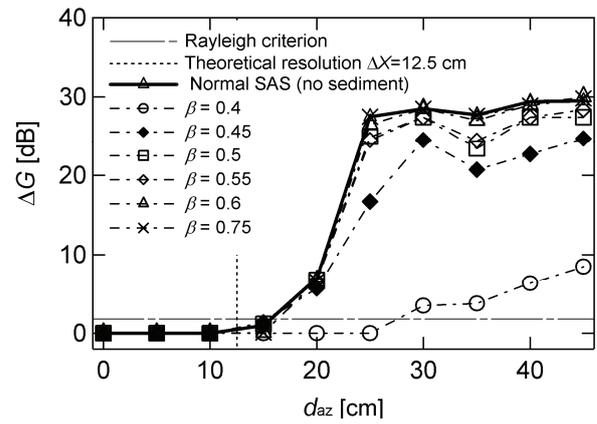


Fig.4 ΔG for different sediment types; $f = 20$ kHz, $d = 0.5$ m, $R_c = 20$ m, $\beta = 0.4 - 0.75$.

4. 合成開口処理における堆積層補償

Fig.5には、実際に堆積層に埋没させた円筒からの受信データに対して、時刻補正量を付与した時の合成開口結果を示している。Fig.5(a)は、通常の合成開口処理によって得られた埋没円筒の画像である。また(b)-(d)はそれぞれ、 $\beta = 0.7, 0.6, 0.35$ の時を仮定した時刻補正量を与えたときの、合成開口画像と通常の合成開口画像との差分画像を示している。(b)および(d)のケースにおいては、埋没円筒は確認できないが、(c)のケースにおいては中心部に高いコントラストで埋没円筒起因の画像が描出されている。(c)のケースにおいて、画像のSN比は、堆積層補償を行わなかったときと比べて約 22 dB 向上した。

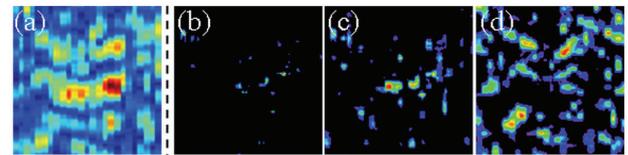


Fig.5 Results of sediment compensation for SAS image of buried object; (a) normal SAS, (b) $\beta = 0.7$, (c) $\beta = 0.60$, (d) $\beta = 0.35$.

5. 結言

堆積層内の音波伝搬に起因する伝搬時間誤差が合成開口処理に与える影響を定量的に明らかにした。また、合成開口処理において堆積層内の音波伝搬の影響を補正する手法を提案した。実際のSAS画像に適用した結果、画像中の埋没物体の輝度SN比を有意に向上しうることを確かめた。

引用文献

- 1) T. Fossum et al., Proc. of UDT Europe2008, Glasgow, UK(2008), 8B1.
- 2) J. E. Piper et al., IEEE J. Oceanic Eng. **27**(3) (2002) 495-504.
- 3) R. D. Stoll, "Sediment Acoustics," Springer(1989).
- 4) M. Kimura and T. Tsurumi, Acoust. Sci. & Tech. **25**(3) (2004) 188-195.
- 5) 池田ら, 海洋音響学 2008 年度研究発表会講演論文集,(2008) 37-38.
- 6) 大内和夫, "リモートセンシングのための合成開口レーダーの基礎," 東京電機大学出版局(2004).