

平成 21 年度修士論文要旨

(東京大学大学院 新領域創成科学研究科 海洋技術環境学専攻)

五素子 L-アレイインターフェロメトリソナーにおける合成開口イメージングの研究

Synthetic aperture imaging for five elements L-array Interferometric Sonar

学籍番号 047-086802 河邊 直也

指導教員 浅田 昭 教授

(平成 22 年 3 月 24 日修了予定)

Keywords: 合成開口, 海底資源探査, オートフォーカス, 位置計測

Keywords: Synthetic aperture, Seabed resources exploration, Autofocusing, Positioning

1. 序論

1.1 背景

わが国の資源自給率向上のため、海底資源開発のための技術開発が盛んに行われている。その中でも、AUV(Autonomous Underwater Vehicle)に搭載する高精度のセンサーの開発は大変重要なものである。特に、日本近海にあるとされる海底熱水鉱床が重要視されている。現存の観測技術ではこれらの資源を探査するために要求される性能を満たすことが出来ていないため、東京大学生産技術研究所は文部科学省による「海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラム」において、AUVに搭載することを前提としたL-アレイインターフェロメトリソナー(LA-IFS)^[1]と合成開口技術、マルチビーム音響測深機を組み合わせたフルスワス精密地形観測システムの開発を行っている。

1.2 研究目的

フルスワス精密地形観測システムの開発においては、LA-IFSの素子を三素子から五素子に増やすことでその角度分解能を向上させること、五素子のLA-IFSにおいて合成開口イメージングを行う技術が必要とされている。本研究は五素子LA-IFSにおける合成開口イメージング技術の確立を目的としている。

2. 合成開口

小さなアンテナであっても目標を大きなビーム角を持った信号を送信し、その反射波をソナーが移動しながら収集し、その情報を統合すれば、大きなアンテナを使用した場合と同様の精度を持たせることが可能となる。このような技術を、合成開口技術という。

2.1 測定原理

ソナーの進行方向と平行な向きをアジマス方向(azimuth direction)といい、送信波照射方向をスラントレンジ方向(slant range direction)という。合成開口を行う技術は数多く存在するが、本研究で使用した手法を以下に示す。

ターゲットに幅のあるビームを照射したときの反射波をアジマス方向に並べると Fig.1 のように受信される。時刻 t で受信した信号に時刻 $t + \delta t$ で受信した信号を重ね合わせ、最初の受信時刻 t_s から始まり、最後に受信した t_e までを合わせる場合の式は数式(1)で表される。

$$fn(t, k) = \int_{t_s}^{t_e} \pi(f(x, k) \exp(-i(2R_{t+\delta t} - 2R_t)/\lambda)) dx \quad (1)$$

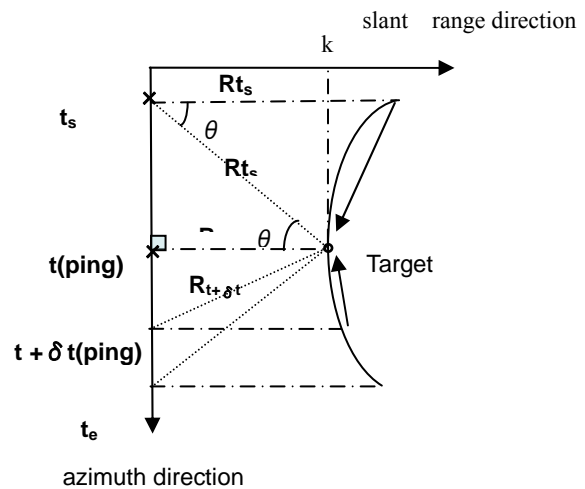


Fig. 1 Synthetic Aperture Principle.

$f(x, k)$ は測定した信号の振幅, $fn(t, k)$ が合成開口をした後の信号の振幅である. 点線によって示される距離 R_x はターゲットから観測点 x までの実際の距離であり, 破線によって示される距離 R_x は観測点 x において観測されることで計算できるターゲットまでの距離である. この手順を各反射点において行うことで合成開口画像を得られる.

2.2 合成開口シミュレーション

合成開口イメージングを行うための画像生成プログラムを作成し, 上のアルゴリズムで合成開口画像を生成することが可能であるかの検証を行うためのシミュレーションをした. このときに使用した周波数やサンプリング周波数, プラットフォーム速度といったパラメータは Table.1 に示し, 合成開口前の画像を Fig.2 の左に, 合成開口後の画像を右に示した. この結果から, 作成したアルゴリズムの有用性を確認することが出来た.

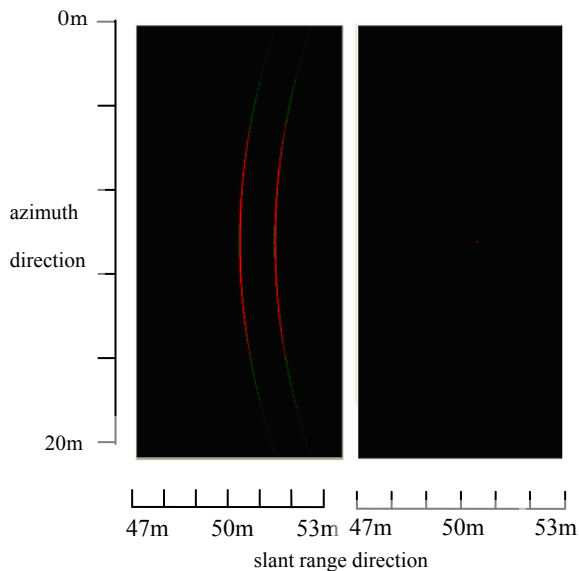


Fig. 2 Synthetic aperture imaging simulation.

Table 1 Simulation Parameter.

Frequency [kHz]	110
Sampling rate [kHz]	33
Sound velocity [m/s]	1500
Platform velocity [m/s]	0.1
Pulse repetition frequency [Hz]	5
Signal duration [s]	0.0032
Beam horizontal angle [deg]	11

3. プラットフォーム位置計測

3.1 位置計測技術の必要性

合成開口をする上でプラットフォームの位置

を正確に測定することは, 位相差を正確に計算するために重要なことである. 以下では位置測定法として使用されている GPS および DVL と PHINS による位置計測手法についての説明を行う.

3.2 GPS について

GPS(Global Positioning System)は全地球測位システムという衛星測位システムの事を指している. このシステムは, 地上のある地点において受信可能な位置にある複数のGPS 衛星から信号を利用する事で, 受信機位置の緯度と経度を測定する. RTK-GPSでは受信機とは別に基準局を地上に置く事でより精度の高い測定を可能としている. 緯度と経度から直行平面座標に変換すると, 変換の際に基準とする地点が観測地点から離れるほどに誤差が大きくなり, 基準点を緯度経度ともに 0.1 度移動させると 2 点間の距離の測定値の誤差は約 4.4×10^{-4} m 程度となる.

3.3 DVL と PHINS による位置計測手法

GPS は精度の良い位置計測手法ではあるが, 海中では使用できない. そこで, 海中での移動速度を測定する DVL と移動方向・動揺角度を精密に測定する動揺センサー(PHINS)といった機器を用いて位置測定を行う. そのときに使う数式は以下になる. Vx_1, Vx_2, Vx_3 は DVL で測定する各方向の速度で, α, β, γ は PHINS で測定する各方向への動揺角(roll, pitch, heading)である.

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Vx_1 \\ Vx_2 \\ Vx_3 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Vx_1 \\ Vx_2 \\ Vx_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Vx_1 \\ Vx_2 \\ Vx_3 \end{pmatrix} \quad (4)$$

このときの測定による誤差は DVL による測定が 0.5 cm/s であり, PHINS による測定が 0.01° であるため, (測定時間)*0.5 cm とできる.

4. LA-IFS のパラメータ抽出のための海上実験

4.1 実験概要

合成開口型の五素子 LA-IFS システムのパラメータを決定するため, OKI シーテック(株)所有の海上バージにおいて, ターゲットと海底の両方を観測する試験を行った. バージのある海域は水深が約 30 m 程度であった. ターゲットには 2 連の

ドラム缶を3組用意し、バージから40 m, 60 m, 80 mの位置に浮きをつけて立てて配置した。ドラム缶一つの長さは1.2 m, 直径は46 cmであった。

受波器の五素子 LA-IFS や送波器といった地形観測機器および RTK-GPS 受信機, DVL, PHINS といった位置測定機器を搭載した支柱を, それらの制御機器を搭載した台車で牽引しつつ, バージに取り付けたレール上を約 10 cm/s で自走させた。RTK-GPS の基準局はバージから約 400 m 離れた OKI シーテック社屋上に設置した。

観測機器, 位置測定機器の制御は GPS の 1PPS で制御されたルビジウム基準信号発生器をマスタークロックとし, これから制御信号発生器で分周した 400 kHz, 10 Hz, 8 Hz, および 5Hz を作り, 制御信号として各機器に送った。プロジェクターの送信間隔は 0.2 秒であり, 使用した周波数は 110 kHz であった。DVL の収録周期は約 1 秒, PHINS の収録周期は約 0.05 秒であった。

4.2 位置データ計測結果・解析

GPS による位置測定データと, DVL と PHINS による位置測定データとを比較したときの平面 2 方向への計測値の差分の絶対値を Fig. 3 に示す。

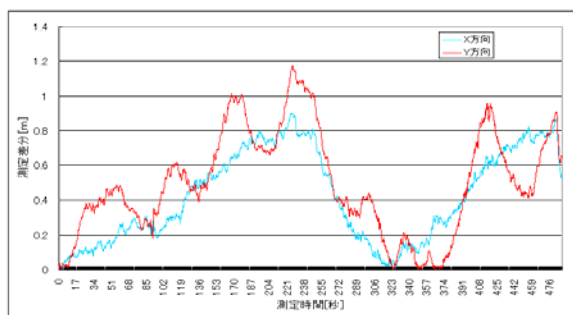


Fig. 3 Difference of positioning data GPS and DVL&PHINS.

GPS のデータを直行平面座標に変換したときの誤差は非常に小さなものであり, DVL と PHINS による位置測定の誤差は最大でも $0.5 \text{ cm/s} \times 500 \text{ s} = 2.5 \text{ m}$ 程度なので, Fig. 4 のデータと比較すると, 生じている差分は誤差の範囲内であることが分かる。

しかし, GPS と DVL&PHINS での測定データの差は大きいので, どちらのデータを基準にするかを定める必要がある。そこで, 高さ成分の比較を行い, その基準として上下動揺である heave を時間積分した値を用いた。比較結果は Fig. 4 にし召

したようになり, GPS のデータの方が計測差小さいためことが分かったため, 位置計測データは GPS の計測データを利用することとした。

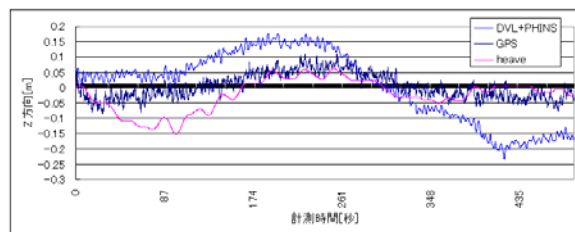


Fig. 4 Comparison of GPS height positioning data. with DVL&PHINS one.

5. 合成開口イメージング

5.1 合成開口前の画像生成

400 kHz サンプルしたハイドロホン信号を 64 サンプル毎に FFT して, 送信波 110kHz の成分を抽出した。そして, その成分の実部と虚部の 2 乗和を取る事でサンプル集団における反射波の振幅を測定することが出来る。これを各ピングについて行う事で移動方向距離 26.12m×探査方向距離 115m (=1148pings×958samples) の 1 セットの振幅データを作成した。

このピング毎の振幅データをアジマス方向に並べ, 海底(250samples~)からスラントレンジ方向 90m 程度までを抜粋した画像が Fig. 5 である。

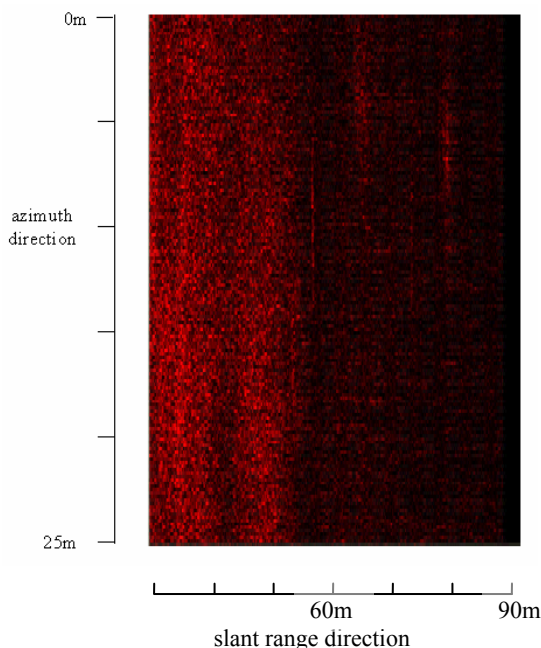


Fig. 5 Raw data image.

5.2 合成開口イメージング

実験で得られたデータを用いて合成開口アルゴリズムによる画像生成を行った。このとき、プラットフォーム位置からソーナー位置の正確な位置へと変換する補正を行い、そこからターゲットまでの距離を正確に計算し、位相差を算出し、合成開口を行った。その結果図が Fig. 6 であるが、ターゲットのドラム缶に焦点が合っていない。

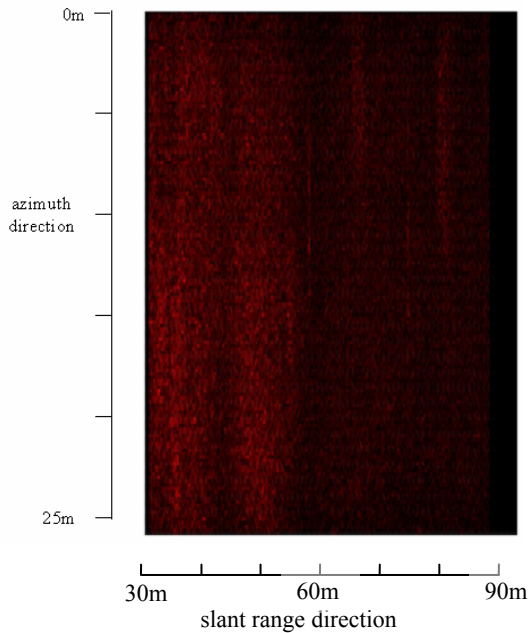


Fig. 6 Synthetic aperture image.

6. オートフォーカス

4.2 で位置計測データの解析を行ったときに求めた計測誤差は合成開口に必要な精度(1/8 波長=0.2 cm)を満たすことができていなかった。この位置測定の結果から合成開口処理をしても焦点が合わない理由は、位置測定の surge, sway, heave に誤差があるため位相補正しても1/8波長よりかなり大ききずれが生じていることが原因である。しかし、これら3成分の位置誤差の補正大きさはごく短時間、例えば数10ms以内であれば同じであると仮定できる。

400 kHz サンプリングしたハイドロホン信号を64 サンプル毎に直交変換 ($\cos\omega t$ 成分と $\sin\omega t$ 成分を計算、 $\omega=2\pi\times 400000$) し、移動方向距離 26.12m× 探査方向距離 115m (=1148pings×958samples) の1セットの測線データを作成した。次に振幅データから、浮きを除いた、有意な強い海底反射点の抽出を行った。これは、データが ping 軸(アジマス方向)と sample 軸(スラントレ

ンジ方向)にデータが並べられているので、等 sample 距離の 6 m幅に相当するデータを海底の一点が作る信号集団として扱い、この信号集団が周囲に比べて強い場合に有意な反射点だとして抽出した。また、有意な反射点信号集団は、2次曲線カーブで近似し、近似曲線の最大点(ping 位置)に反射点があると仮定して、6 m幅(300 pings)のサンプルデータの位相補正值を求めた。ここで、各 ping の探査方向距離 100 pings の幅は同じ位置誤差を持つとして、全体データの補正情報を作成した。このようにして求めた位相を使った合成開口画像は Fig.7 である。

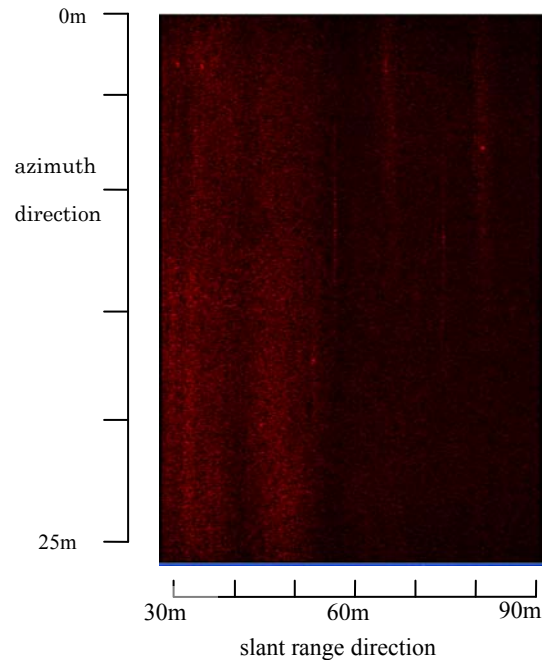


Fig. 7 Autofocused synthetic aperture image.

7. 結論・今後の展望

オートフォーカスを行う事でターゲットの鮮明な画像を作成することが出来た。位相自体は変化させてしまったが、五素子全てのデータについて位相の変化分を共通させることにより、合成開口を行ったデータを用いたインターフェロメトリを行うことも可能であると期待される。

謝辞

本研究は海洋資源の利用促進に向けた基盤ツール開発プログラムの一つとして、文部科学省の支援を受けて行われたものである。

参考文献

- [1] 小山寿史 AUV 搭載型インターフェロメトリック・サイドスキャンソーナーの研究開発[2004]