研 究

「区分合成開口」による船舶搭載型ソナーの高解像度化*

関口 治**・藤田 肇**

(株)日立製作所機械研究所)

藤井 正司***

(株)日立製作所情報通信事業部)

This paper proposes a new method in sonar signal processing using "Overlapping sectional synthetic aperture." This method is developed to provide high azimuthal resolution in a synthetic aperture operation even when a ship cannot keep moving on a straight "base" line. Three errors in a ship positioning are assumed, i.e., in travel distance, lateral location and aperture direction.

The aperture direction is at first detected with a gyroscope and made parallel to the base line using mechanical feedback system. The travel distance error is measured with an accelerometer and fed into the signal processing procedure. The lateral distance is then corrected as follows.

Signals from the overlapping part of two successive apertures overlapping in the base line direction with the lateral deviation in position are compared and the phase difference between two signals are detected. Signal of the non-overlapping part of the second aperture is corrected using this phase difference. It is possible to obtain much higher azimuthal resolution than a single aperture by repeating this procedure. This method does not require to change most of conventional sonar system and the signal processing is performed mostly using Fourier transform. Results of computer simulation prove the effectiveness of this method.

1. はじめに

波動を利用した映像法では、開口の大きさが解像力を決める。航空機に搭載するサイドスキャンレーダ¹⁾においては、合成開口法により等価的に大きな開口を実現する方法が定着している。

一方船舶に搭載された水中超音波映像装置の場合、これまで合成開口法が普及することはなかった。通常、半波長間隔で数十個程度配置した受波器のアレイ（物理開口）を船底に置くが、この物理開口の代わりにレーダと同じ形式の合成開口技術をそのまま導入しようとすると、

次のような制約があるため、実用化が難しい。すなわち、

(1) 音速と船舶航行速度の比が、光速と航空機の速度の比に比べて小さいため、サンプル点ごとに時間的に独立した状態で、逐次的に送受波を行って信号を取得することができない。

(2) 波浪等の影響により、一般に船舶の動揺には、剛体の6自由度に対応して、サージング、スウェイング、ヒーヴィング、ピッチング、ローリング、ヨーイング²⁾が存在し、直線的な航跡を得ることが困難である（図1参照）。

上記の制約に対して本論文では動揺している船舶の航跡に沿って適当な間隔で、ラインアレイの情報から得たいくつかの映像を、可干渉的に合成して、航跡方向に大きな開口を置いたことと等価な解像度をもつ新たな映像を得る方法を提案する。この方法は、従来の物理開口を幾つかつなぎ合わせて、更に大きな合成開口を得ようとするので、『区分合成開口』と呼ぶこととする。

* Signal enhancement for ship mounted sonar by overlapping sectional synthetic aperture method.

** Osamu SEKIGUCHI, Hajime FUJITA (Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi, Ltd.)

*** Shoji FUJII (Telecommunication Division, Hitachi, Ltd.)

<直線運動>

1. サージング

2. スェイニング

3. ヒーヴィング

<回転運動>

4. ピッチング

5. ローリング

6. ヨーイング

図1 船の動揺³⁾

区分合成開口法によれば、物理開口内の各受波器の出力信号は並列的に同時に取得されるため、取得する時間間隔は物理開口内のサンプル数の逆数になり、全てのサンプル点の信号を逐次取得する場合に比べて、上記(1)の困難は大幅に緩和される。また、物理開口をそのまま使用するため、開口のハードウェアを変更する必要はなく、また送波時のビームフォーミングについても従来の方法を変更する必要はない。

もし船舶の航跡が直線上にあり、かつその上に物理開口を所定の空間間隔で定位することができれば、区分合

成は容易な問題に帰着する。すなわち、すべてのサンプル点の信号を物理開口として同時に取得したときも、またすべての信号を逐次的に取得したときも、区分的に物理開口を用いたときも、まったく等価である。いずれの場合も区別することなく、航跡上のサンプル全体を一つの開口とみなして、結像計算を実行すれば良い。

しかし、実際の場合、上記(2)のとおり、航跡は一般的に直線とはならず、物理開口ごとに、基準となる直線からの位置ずれを生じる。このような条件での物理開口からの信号を合成することにより、直線的な開口による像に極力近い高解像度の像を得ることが、この方式の特徴である。ただしここで目的としているのは、船舶上で実時間で像を得ることである。従って、過大な演算負荷は好ましくない。例えば、フネル積分の直接計算などは避けるべきである。

物理開口の姿勢情報の取得には、ジャイロなどの外部センサによる方法と、物理開口による信号自体から得る方法がある。例えば、ヨーイングに対しては、非常に高精度のジャイロを用いることにより、測定データが容易に得られるし、このデータに基づいてサーボ機構により開口の姿勢を安定させることも可能である。これに対してスェイニングは、よい測定手段が少ない。一方、理論的に興味が大きいのは信号自身から得る方法である。これは一見自己矛盾のようであるが、物理開口内の受波器の位置が拘束されていることを利用し、物理開口の一部をオーバーラップさせて冗長な情報を得ることにより可能である。

提案する区分合成開口法^{6),7)}は、開口長を有効に用いるために開口の姿勢を安定させ、開口の一部をオーバーラップさせながら受渡し、オーバーラップ部の情報を用いて仮想的な基線からのずれを数値的に補正して、開口の合成を行う方式である。

2. フーリエ変換を用いたビームフォーミング

図2に示すように海面に平行に xz 平面を取る。船舶は概略 x 方向に進行する。 x, z 軸は、1波長 λ を長さの単位とする。この座標を観測座標と呼ぶ。

遠距離場、 z 軸方向を中心として物体が分布していると看做する。ここで興味があるのは、いわゆる方位分解能なので、観測座標の原点における z 軸からの角度を θ とし、 $U = \sin \theta$ で表す。この U を物体座標と呼ぶ。なお距離分解能は通常パルス幅などによって得られ、本論文の範囲外である。

物体から $G(U)$ のような複素振幅をもつ音波が到着しているとき、点 (x, z) における振幅は、

図2 観測座標

$$f(x, z) = \int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi(xU + z(1 - \frac{1}{2}U^2))} dU \quad (1)$$

である。ただし $G(U)$ は、 $-M \leq U \leq M$ の範囲に分布するものとし、 θ だけに依存する余弦項やハイドロホンの指向特性などは、 $G(U)$ に含めて考えられる。

ここで $z=0$ とすれば、(1)式は $G(U)$ の逆フーリエ変換に帰着する。すなわち、

$$f(x, 0) = \int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi xU} dU \quad (2)$$

したがって、 x 軸上で点 $(p, 0)$ から $(q, 0)$ までの振幅分布を観測し、同じ範囲でフーリエ変換

$$F(X) = \int_p^q f(x, 0) e^{-j2\pi xX} dx \quad (3)$$

を計算すれば、 $F(X)$ は $G(U)$ の有限開口像となる。ここで X を像座標とし、像座標は物体座標と等しい縮尺をもつものとする。

3. 動揺成分を含んだ再生像と開口姿勢の計測及び制御

区分合成開口では、物理開口が基線からずれた場合に像を補正して開口の合成を行う。まず、観測位置の誤差を含んだ再生像を求める。

図3に示す観測座標上で、開口を1つの線分で定義する。2点 (p, ζ) 、 $(p + L\cos\psi, \zeta + L\sin\psi)$ をとり、この線分で定義される開口の位置で像を再生し、また δ だけ平行に移動した線分で定義される開口の位置で受波を行うこととする。それぞれの開口長は L とする。実際の物理開口は、空間的に離散的なラインアレイであるが、表記を簡単にするため、連続したものとして扱う。

ここで、 ψ はヨーイングによる成分、 ζ はスェイングの成分、 δ はサージングによるサンプリング位置の不確定性から生じる成分となる。

図3 受波位置と再生位置

まず、観測位置での振幅分布は、(1)式より

$$f_{obs}(x) = \int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi(xU + (\tan\psi \cdot x + \zeta)(1 - \frac{1}{2}U^2))} dU \quad (4)$$

で与えられる。これについて、像再生位置 $p \leq x \leq p + L\cos\psi$ の有限範囲について、 $f_{obs}(x + \delta)$ のフーリエ変換を求めると、

$$\begin{aligned} F_{obs}(X) &= \int_p^{p+L\cos\psi} f_{obs}(x + \delta) e^{-j2\pi xX} dx \\ &= e^{j2\pi(\delta \tan\psi + \zeta) \cdot L\cos\psi} \int_{-M}^M G(U) \\ &\quad \cdot \text{sinc}\{L\cos\psi(U + \tan\psi - \frac{1}{2}U^2 \tan\psi - X)\} \\ &\quad \cdot e^{j2\pi\{U - (X - \tan\psi)\}(p + \frac{1}{2}L\cos\psi)} e^{j2\pi\delta U} \\ &\quad \cdot e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)\{\tan\psi(\delta + p + \frac{1}{2}L\cos\psi) + \zeta\}} dU \end{aligned} \quad (5)$$

を得る。

(5)式中で独立変数中の ψU^2 に依存する項はとても小さく、位相部に比べて振幅部の正確さはあまり重要ではないので、この項を省略し、次のように近似する。

$$\begin{aligned} F_{obs}(X) &\approx e^{j2\pi(\delta \tan\psi + \zeta) \cdot L\cos\psi} \\ &\quad \cdot \int_{-M}^M G(U) \text{sinc}\{L\cos\psi(U - (X - \tan\psi))\} \\ &\quad \cdot e^{j2\pi\{U - (X - \tan\psi)\}(p + \frac{1}{2}L\cos\psi)} e^{j2\pi\delta U} \\ &\quad \cdot e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)\{\tan\psi(\delta + p + \frac{1}{2}L\cos\psi) + \zeta\}} dU \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、各動揺成分の計測制御の可能性を考えれば、

次のようになる。

(1) ヨーイングによる成分 ψ は、この値は市販のレーザジャイロ等を用いることにより、 ± 0.01 度程度の精度で計測可能である。またこのデータを元に、開口の角度をサーボ機構で、高精度に安定化させることも可能である。ただしこのとき、船舶に対する開口の取り付け位置によっては、開口に対してスェイングの成分を生じさせることになる。

(2) サージングによるサンプリング位置の不確実性から生じる成分 δ は、加速度計の信号によって船舶の進行上でのサージング時刻を調節することによって制御可能である。

(3) スェイングの成分 ζ は、加速度計によって計測は可能であるが、船舶の構造上制御は困難である。

ここでは波面は深さ方向には一様であると仮定して2次元問題として扱っているの、ヒーヴィング、ローリングによる影響は考慮していない。またピッチングが存在すると等価的に開口の長さが微小に変化するが、ここではこの影響を無視する。

4. 各動揺成分の制御方法

動揺成分が混入した像を修正し、基線上で得られる像に代用することを考える。 x 軸を基線とし、 x 軸上で p から $p+L\cos\psi$ で定義できる開口で得られる像は(3)式を計算することにより次式のようになる。

$$F(X) = L\cos\psi \int_{-M}^M G(U) \operatorname{sinc}\{L\cos\psi(U-X)\} \cdot e^{j2\pi(U-X)(p+\frac{1}{2}L\cos\psi)} dU \quad (7)$$

(6)式と(7)式を比較すれば、以下の点に違いがある。

(i) (6)式の第1因子

$$e^{j2\pi(\zeta+\delta\tan\psi)} \quad (8)$$

は、開口姿勢の z 軸方向へのずれによる単純な位相ずれである。

(ii) (7)式の畳み込み核に対応する(6)式の部分は、

$$U - (X - \tan\psi) \quad (9)$$

のように、 $\tan\psi$ だけオフセットしているので、像の位置が $\tan\psi$ だけずれる。

(iii) $G(U)$ には U と U^2 に依存する位相因子

$$e^{j2\pi\delta U} \quad (10)$$

$$e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)(\tan\psi(\delta+p+\frac{1}{2}L\cos\psi)+\zeta)} \quad (11)$$

が乗じられている。

ここで、 ζ 、 ψ 、 δ の影響と各誤差の項の制御または $F_{obs}(X)$ の補正の方法を考える。

(8)式内のパラメータのうち、 δ と ψ は計測制御可能であるが、 ζ は計測のみ可能で、制御は事実上不可能である。しかしこれらの計測値を得れば、 $F_{obs}(X)$ に $-\exp\{j2\pi(\zeta+\delta\tan\psi)\}$ を乗ずるだけでこの項の補正は可能である。

(9)式の ψ は、計測制御とも可能であり、また計測値を知れば、像の位置を戻すことにより補正も可能である。

(10)については、 δ を 0 に制御する方法のほか、もし開口が大きく、畳み込み核の半値幅が位相変化に比べて充分小さければ、 $F_{obs}(X)$ に $-\exp\{j2\pi\delta(X-\tan\psi)\}$ を乗じて近似的に補正する方法も考えられる。

(11)は U^2 に比例する位相差なので、 $|U| = M \leq 0.2$ 程度の観測範囲に対して、 $p\tan\psi$ に比例する成分以外は無視できる。しかし、後述の開口合成に用いるときに、 p の値が大きくなり、 $p\tan\psi$ に比例する項が有害になる可能性がある。従って、この影響を防ぐには制御により開口の傾き ψ を 0 に抑える必要がある。

上記及び 3. を総合すると、各動揺成分に対して次のような対応をとれば良い。

(1) ジャイロからフィードバックを得たサーボ系により、開口姿勢 ψ を安定させる。

(2) δ の影響を除去するには、次の方法が考えられる。すなわち、開口位置を加速度計などで正確に位置を計測する、計測値によって近似的に位相補正をする、の手段である。また、サージングの量と目的とする方位分解能との関係により、 δ の影響が小さくて除去する必要がなければそのままにして何もしないということも考えられる。

(3) ζ は何らかの方法で計測値を得て、位相を数値的に補正する。

各動揺成分に対して上記のような対応をとれば、 $F_{obs}(X)$ と $F(X)$ の違いは、基線からの単純な位相のずれだけに抑えられる。この位相ずれの相対値は、各開口間の受信信号の像自身から求めることができ、この部分を補正して開口を合成すれば高分解能が得られる。

5. 開口の合成方法

図4に示すように、いま $p=0$ および $p=a(0 < a < L)$ において長さ L の開口がそれぞれに位置して振幅分布を観測し、これに上記の方法(1)、(2)を適用して ψ と δ の影響を除去し、次の2つの近似式 $F_{obs1}(X)$ 、 $F_{obs2}(X)$ を得たとする。

図4 開口の位置関係

$F_{obs1}(X)$ は, $p=0$ の位置の開口で, $F_{obs2}(X)$ は, $p=a$ の開口位置での像である。

$$F_{obs1}(X) \rightleftharpoons e^{j2\pi\zeta_1} L \int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi(U-X)(\frac{1}{2}L)} \cdot \text{sinc}\{L(U-X)\} e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)\zeta_1} dU \\ = e^{j2\pi\zeta_1} F(X) \big|_{p=0, l=L} \quad (12a)$$

$$F_{obs2}(X) \rightleftharpoons e^{j2\pi\zeta_2} L \int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi(U-X)(\frac{1}{2}L)} \cdot \text{sinc}\{L(U-X)\} e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)\zeta_2} dU \\ \rightleftharpoons e^{j2\pi\zeta_2} F(X) \big|_{p=a, l=L} \quad (12b)$$

ただし,

$$F(X) \big|_{p=a, l=\beta} = \beta \int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi(U-X)(\alpha+\frac{1}{2}\beta)} \quad (\nearrow)$$

$$\cdot \text{sinc}\{\beta(U-X)\} e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)} dU \quad (13)$$

とする。また, それぞれの開口のオーバーラップ部で得られる像を $F_{part1}(X)$, $F_{part2}(X)$ とすれば, 次のようになる。

$$F_{part1}(X) \rightleftharpoons (L-a) e^{j2\pi\zeta_1} \int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi(U-X)(a+\frac{1}{2}(L-a))} \cdot \text{sinc}\{(L-a)(U-X)\} e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)\zeta_1} dU \\ = e^{j2\pi\zeta_1} F(X) \big|_{p=a, l=L-a} \quad (14a)$$

$$F_{part2}(X) \rightleftharpoons (L-a) e^{j2\pi\zeta_2} \int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi(U-X)(a+\frac{1}{2}(L-a))} \cdot \text{sinc}\{(L-a)(U-X)\} e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)\zeta_2} dU \\ \rightleftharpoons e^{j2\pi\zeta_2} F(X) \big|_{p=a, l=L-a} \quad (14b)$$

これより,

$$F_{obs1}(X) + e^{j2\pi(\zeta_1-\zeta_2)} F_{obs2}(X) \\ = \frac{1}{2} \{ F_{part1}(X) + e^{j2\pi(\zeta_1-\zeta_2)} F_{part2}(X) \} \\ = e^{j2\pi\zeta_1} F(X) \big|_{p=0, l=L+a} \quad (15)$$

を得ることができる。(15)式中, $\exp\{j2\pi(\zeta_1-\zeta_2)\}$ の値は, $F_{part1}(X)$ と $F_{part2}(X)$ の位相比較によって, 他の計測器によらずに, 信号自身から推定することができる。すなわち, $(\swarrow)$

$$e^{j2\pi(\zeta_2-\zeta_1)} = \frac{\int F_{part1}(X) F_{part2}^*(X) \arg(F_{part1}(X) F_{part2}^*(X)) dX}{\int F_{part1}(X) F_{part2}^*(X) dX} \quad (16)$$

(* : 複素共役)

このように, 長さ L の2つの開口を合成して, 長さ $L+a$ ($L < L+a < 2L$) の開口を得ることができる。この方法を繰り返せば, 更に大きな開口を合成することが可能である。この議論は, 基線を $x=\zeta_1$ 上に置いたが, $x=\zeta_2$ 上に基線を置いて同様に開口を合成することが可能である。

次に4.で述べた(2)の方法について, 信号自身から δ の値も得る可能性について論じる。この値が小さければ, オーバーラップの部分から

$$F_{partk}(X) \rightleftharpoons (L-a) e^{j2\pi\zeta_k + \delta_k X}$$

$$\int_{-M}^M G(U) e^{j2\pi(U-X)(a+\frac{1}{2}(L-a))} \cdot \text{sinc}\{(L-a)(U-X)\} e^{j2\pi(-\frac{1}{2}U^2)\zeta_k} dU \\ = e^{j2\pi\zeta_k + \delta_k X} F(X) \big|_{p=a, l=L-a} \quad (k=1, 2) \quad (17)$$

を得る。すなわち, $F_{part1}(X)$ と $F_{part2}(X)$ 間の位相差の X に対する1次依存性を推定できれば, $\delta_1 - \delta_2$ は, 求めることができる。しかし, そのためには, 十分離れた2つ以上の点において $|F(X)|$ が実質的に非零でなけ

ればならず、しかもこの条件は対象物体 $G(U)$ の分布に依存する。特に探査の対象となる物体が、小さなもの1個である場合には、この条件は満足しない。従って、 δ を信号から得る方法は、実用上適さない。

なお、以上の議論でオーバーラップ量は原理的には受波器1つ分でもよいが、雑音などによる位相推定の劣化を防ぐため、実用的には開口長の1/2程度にすべきである。

6. シミュレーション

今までに述べた方法で、開口の合成が可能かを確認するために、計算機によるシミュレーションを行った。物体座標のパターン $|G(U)|$ は、図5に示すような信号が0度と3度の方位から到来する例を対象とした。この条件で、半波長ごとに配列された10 λ のラインアレイでビームフォーミングを行えば、図6に示すように信号の分離は不可能である。

一方、同じ10 λ のラインアレイが図7に示す各位置でそれぞれ受信し、区分合成開口によりビームフォーミングを行った結果を図8に示す。また区分合成開口で実現したものと同じ開口長(60 λ)でビームフォーミングを行った結果を図9に示す。図8及び図9に示す結果は、共に同じように2つの信号が分離できていることを表し

図5 2つの物体が隣接したパターン

図6 実開口10 λ での再生像(信号のみ)

ている。

次に、空間ノイズが混入した場合の影響を見てみる。今度は、図10に示すように音波が0度方向から到来し、各受波器には、 $S/N = 5$ dBの白色雑音が入ったとする。各開口の位置は先ほどと同様に図7に示したものをを用いた。このときの結果を図11に示す。正面方向から音波が到来していることが分かる。一方同様な条件下で、合成した開口と同じ長さの開口でビームフォーミングを行った結

図7 開口の移動位置

図8 区分合成開口法による2つの物体の再生像(信号のみ)

図9 実開口60 λ での2つの物体の再生像(信号のみ)

果を図12に示す。図11, 図12共に 10λ の開口に比べて分解能が向上している。

以上のシミュレーション結果から, 本方式による結果の通常の長い開口で得られる結果と同等であり, 本方式の妥当性が確認された。

7. むすび

本論文では, 船舶に搭載したソーナーの方位分解能の向上を目的として区分合成開口法を提案した。本研究の結果は次のとおりである。

(1) 区分合成開口法は, 船舶の動揺による開口姿勢をサ

図10 1物体の信号パターン

図11 区分合成開口法による1つの物体の再生像
($S/N = 5\text{ dB}$)

図12 実開口 60λ での1つの物体の再生像
($S/N = 5\text{ dB}$)

ーボ制御により安定させて, そして, 開口の運動を基線と平行な成分のみに抑え, 更に基線と開口間の位相差はオーバーラップさせた2つの開口部間の受信信号から求め, この位相差を補正して長い開口を実現する方法である。

(2) この方式は, 基本的には従来ソーナーのハードウェアをそのまま利用でき, 一方ソフトウェアについては, 重なった開口部から位相差を求め, この位相差を補正する手続きを追加すればよい。従って, 従来のソーナーシステムの大幅な変更を行う必要はないと考えられる。

(3) 本方式の妥当性は, シミュレーションにより確認できた。

以上, 区分合成開口法は, 船舶が動揺しても仮想的な長い開口が得られ, 分解能を向上することができる。一方, 本方式では, 各開口で得た像を補正して利用しているので, 今後この補正の限界を定量化, 一般化する課題などが残されている。

謝辞 本研究を行う上で, 貴重なご意見を頂いた東京農工大学工学部電子情報工学科阿刀田央一教授, (株)日立製作所中央研究所主管研究員片倉景義氏, 機械研究所主任研究員下出新一氏に深謝する。

参考文献

- 1) 松尾優, 山根国義, レーダーホログラフィ((社)電子情報通信学会, 東京, 1985).
- 2) 日本船舶学会編, 改訂船舶工学便覧第1分冊(コロナ社, 東京1982).
- 3) 前田親良, “動揺環境下での質量計測(船上はかり)”, 共和技報, No. 394, 2942-2950, (Dec. 1990).
- 4) R. J. Urick (土屋明訳), 水中音響の原理(共立出版, 東京, 1978).
- 5) 海音響学会編, 海洋音響-基礎と応用-, (海洋音響研究会, 東京, 1984).
- 6) Sekiguchi, O., Fujita, H. and Fujii, S., “High Resolution Side-looking Sonar by Synthetic Processing on Image Planes”, Proceedings of the Institute of Acoustics Underwater Group Conference on Sonar Signal Processing, 140-146 (Dec. 1991).
- 7) 関口治, 藤田肇, 藤井正司, “像面で合成を行う合成開口法”, 海洋音響学会 平成4年度研究発表会議演論文集, 55-58, (1992).
- 8) 永井啓之亮, 超音波ホログラフィー開口合成による映像-, (日刊工業新聞, 東京, 1989).