



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	マイクロコンピュータ制御によるアレイ型ホログラフィックソナーシステム
Author(s)	青木, 由直; Aoki, Yohinao; 山本, 強 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 94, 69-78
Issue Date	1979-06-29
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/41563
Type	departmental bulletin paper
File Information	94_69-78.pdf



マイクロコンピュータ制御によるアレイ型 ホログラフィックソナーシステム

青木由直* 山本 強**
(昭和53年12月28日受理)

Array-Type Holographic Sonar System Controlled by Microcomputer

Yohinao AOKI and Tsuyoshi YAMAMOTO
(Received December 28, 1978)

Abstract

A sonar technique is discussed, where two techniques, holographic and pulse-echo techniques are used to detect targets along the azimuth and range directions respectively. This holographic sonar system was constructed using a receiver array and microcomputer and an experiment was conducted, resulting in a quasi-real time sonar system. In this system an 8-bits microprocessor controls the transmission of burst signals from an ultrasonic transducer and collects holographic data by switching 32 receiving transducers. The collected data are processed by microcomputer with FFT and phase rotation algorithms and sonar images are displayed on a CRT scope. In the experiment an ultrasonic wave of 700 kHz was used and a limited number of targets made of air-contained sponge-like material in a water tank were displayed as sonar images. The speed of obtaining one frame of sonar image is about a few minutes.

1. ま え が き

ホログラフィの原理をレーダやソナーに応用する研究については多くの発表がなされてきている。これらの研究は大別すれば開口合成サイドルッキングレーダ¹⁾やソナー²⁾のように1個の受信アンテナや受波用振動子を用いてホログラフィックな手法で大きな開口を合成して、パルスエコー法と組み合わせて分解能の良い像を得ようとする方法と、受信アンテナや受波用振動子のアレイを用いてホログラムを直接記録するか、あるいはホログラフィックな方法でビームフォーミングを行い像を得る方法³⁾に分けられる。前者においては開口合成が完了するまで像が再生できず、かつ光学再生の場合であれば途中写真処理過程とか光学系が必要で実時間で再生像観察が困難である。これに対して後者ではコンピュータ処理と併用して実時間で像が観察できるが、汎用のミニコンピュータを用いている現状では装置が大規模になり、かつホログラフィそのものの映像法であるため距離分解能が劣るといふ欠点がある。

本研究では前述の諸点を考慮して装置の小型化が可能で、安価でもあることからマイクロコン

* 工学部電気工学科 演算工学講座

** 富士通㈱

コンピュータを用いて、パルスエコー法と併用して得た振動子アレイからのホログラム情報を on-line 処理することにより準実時間でソナー像を得るシステムを提案し、装置を試作して実験を行った。この方法は開口合成サイドルッキングソナーにおいて合成される開口を受波器アレイに置き換え、像再生をマイクロコンピュータにより行っているシステムともいえる。このようなシステムにおいて問題になる点や、分解能の向上、ソナー像処理の高速化の可能性についても言及している。

2. アレイ型ホログラフィックソナーの原理

2.1 サンプルングデータによる方位方向の像再生

本研究のホログラフィックソナーは通常開口合成サイドルッキングソナーと同じく方位方向の標的の像はホログラフィックな方法で、距離方向の標的の検出はパルスエコー法によって行っている。しかし本システムでは（準）実時間でソナー像を見るという目的のため受波器（振動子）のアレイで標的からの反射波のデータを収集し、これから標的の像を再生する方法を採用しているため、連続的な走査によって反射波のデータを収集してゆく開口合成ソナーと比較して、サンプルングによる効果を考慮する必要がある。まず試作した装置による実験と対応させるため Fig. 1 の構成を考える。\$N\$ 個の受波器が \$x_1\$ 軸上で開口 \$L\$ にわたって等間隔 \$L/N\$ で直線状に配置されているものとする。標的は \$x_0-z\$ 平面上にあるものとして、この面内での標的を映像化するソナーシステムを考えている。\$x_1\$ 座標の原点に配置された送波器（振動子）から波長 \$\lambda\$ の超音波を放射したとすると、Fig. 1 の座標 \$(x_0, z_0)\$ にある標的 \$T\$ から反射されてくる波 \$R\$ は次式のように表わされる。

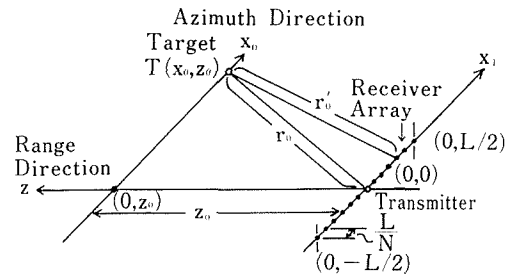


Fig. 1 Coordinate system of holographic sonar with a receiver array

$$R = \sigma \exp \left[-j \frac{2\pi v t}{\lambda} + j \frac{2\pi}{\lambda} (r_0 + r'_0) \right] \quad (1)$$

但し \$v\$ は超音波の速度、\$r_0, r'_0\$ はそれぞれ送波器及び受波器から標的までの距離、\$\sigma\$ は物体の反射係数を含めた振幅定数である。ここで距離 \$z_0\$ が標的の方位方向座標に比べて大きいとしてフレネル近似のもとで (1) 式を書き直すと (2) 式ようになる。

$$R = \sigma e^{j\phi_0} \cdot \exp \left[j \frac{\pi}{\lambda z_0} (x_0 - x_1)^2 \right] \quad (2)$$

但し (2) 式においては時間的に変化する位相項を除いて、定数的位相項は \$\phi_0\$ としてまとめた。次に (2) 式を変数 \$x_1\$ に関して一度フーリエ変換すれば、\$\mathcal{F}\$ をフーリエ変換オペレータ、\$\mu\$ を空間周波数として次式のように書ける。

$$\mathcal{F}[R] = \sigma' \exp[-j2\pi\mu x_0] \cdot \exp[-j\pi\lambda z_0 \mu^2] \quad (3)$$

但し \$\sigma'\$ は定数的位相項も含む定数である。(3) 式で得られた値に \$\exp[j\pi\lambda z_0 \mu^2]\$ なる関数を掛けて再度フーリエ（逆）変換すれば、標的に対応した像点 \$\delta(x-x_0)\$ が再生される。

$$\mathcal{F}^{-1}[\mathcal{F}[R] \cdot \exp[j\pi\lambda z_0 \mu^2]] = \sigma' \delta(x - x_0) \quad (4)$$

このような処理による標的の像再生では (4) 式に示すように反射波のデータを 2 回フーリエ変換して像を得るため、再生像面開口はホログラム開口、つまりアレイ開口の大きさに一致し、標的

がこの開口外に位置するような場合の像再生には適していない。一般に受波器アレイ開口より標的の存在する範囲は広がっており、このような場合別の方法による像再生処理が必要となる⁴⁾。

(2) 式を書き直すと次式のようにも書ける。

$$R = \sigma e^{j\varphi_0} \cdot \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda z_0} x_0^2\right] \cdot \exp\left[j \frac{\pi}{\lambda z_0} x_1^2\right] \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda z_0} x_0 x_1\right] \quad (5)$$

ここで R に $\exp[-j\pi x_1^2/\lambda z_0]$ なる関数を掛けてフーリエ変換すると次式のようになる。

$$\mathcal{F}\left[R \cdot \exp\left[-j \frac{\pi}{\lambda z_0} x_1^2\right]\right] = \sigma'' \delta\left(x + \frac{x_0}{\lambda z_0}\right) \quad (6)$$

(6) 式においても標的に対応した像点 $\delta(x + x_0/\lambda z_0)$ が再生される。ただし再生像面は先の方法のようにアレイ開口には一致しない。これについてサンプリングデータを処理するという点を考慮して次に述べておく。

反射波のデータはアレイ面で L/N のサンプリング間隔で収集され、これが1回のフーリエ変換演算により処理されるから、そのフーリエ変換面での意味のあるデータはサンプリング周波数 N/L で限定される。従って映像化可能な標的の存在する範囲、つまり最大の視野開口 L_{\max} は(6) 式のデルタ関数の変数 x に $x = \pm N/2$ を代入した時の $2|x_0|$ の値より次のように求まる。

$$L_{\max} = \frac{\lambda z_0 N}{L} \quad (7)$$

(7) 式の関係は Fig. 2 に示すように、受波器アレイから標的までの距離 z_0 が増加するのに比例して映像化可能な視野開口が広がってくることを意味している。ここで N 個の受波器アレイでサンプリングを行って得たデータを処理して標的の像を求めるため、得られる像面も N 個のサンプリングデータで表現される。従って(7) 式の視野開口 L_{\max} を N で割ると像面での方位方向の分解能が $\lambda z_0/L$ と求まる。これにより方位方向の分解能を向上させようとすれば受波器アレイ開口 L を大きくすればよいことになる。

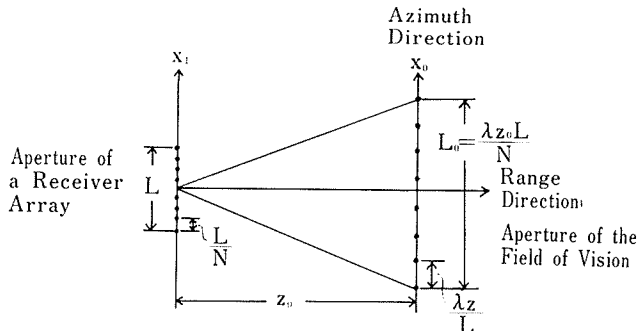


Fig. 2 Relation between apertures of a receiver array and the field of vision in the numerical processing of sonar image

2.2 距離方向分解能と超音波バースト幅

Fig. 1 において標的の距離方向の検出はパルスエコー法によって行われている。この場合超音波信号が出されるパルス幅、つまりバースト幅を狭くすれば距離方向分解能を向上させることができる。しかし本研究のように受波器アレイを用いこれを単純に切り換えることでデータを収集してゆく方法においては、受波器アレイの各素子からデータを収集する時点でひとつのバースト波に対応する反射波が全ての素子に到達している必要がある。従って標的から最短距離にある受波器素子と最長距離にある受波器素子の音路差分だけ超音波が続いているようにバースト幅を選ぶ必要がある。このバースト幅の条件を次に求めておく。

Fig. 1 において標的 $T(x_0, z_0)$ と各受波器素子間の距離 r'_0 の最大値 $r'_{0 \max}$ 及び最小値 $r'_{0 \min}$ は $|x_0| > L/2$ の場合次のようになる。

$$r'_{0 \max} = \left[z_0^2 + \left(\frac{L}{2} + |x_0| \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

$$r'_{0 \min} = \left[z_0^2 + \left(\frac{L}{2} - |x_0| \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

従って標的 T からの反射波が全ての受波器アレイ素子に到達している時刻が存在するためには少なくともバースト持続時間 T_B は次式を満たす必要がある。

$$T_B > (r'_{0 \max} - r'_{0 \min})/v \quad (10)$$

ここで $z_0 \gg (L/2 + |x_0|)$ と仮定して式 (8), (9) を展開して2次の項までとる近似を用いて式 (10) に代入すれば次式が求まる。

$$T_B > \frac{L|x_0|}{z_0 v} \quad (11)$$

ここで先の議論により最大の視野開口は (7) 式の L_{\max} で与えられるから、これを (11) 式の $|x_0|$ に代入すると最大の視野開口からのデータを収集するため超音波信号が継続していなければならない最小値、つまりバースト幅の最小値 $T_{B \min}$ は次のようになる。

$$T_{B \min} = \frac{\lambda N}{v} = \frac{N}{f} \quad (12)$$

(12) 式で表わされるバースト幅 $T_{B \min}$ が距離方向の分解能を決定することになり、本方式で最大の視野まで映像化しようとする距離方向の解像距離 D_{\min} は次式のようになる。

$$D_{\min} = \frac{T_{B \min} v}{2} = \frac{\lambda N}{2} \quad (13)$$

(13) 式の関係は本研究で採用しているようなデータ収集法において、解像距離 D_{\min} を小さくして分解能を向上させるためには受波器のアレイ素子数 N を少なくして（従って (7) 式より視野を狭くして）やる必要がある。つまり視野を狭くすれば距離方向の分解能を向上させることができることを意味している。

3. 実験装置の構成

3.1 マイクロコンピュータによるシステム構成

本研究のホログラフィックソナーシステムでは、パルスエコー法によりデータの収集を行う際のシステムの制御と、ホログラフィ法により標的の像を再生するための演算処理を並行して行う必要がある。このためハードウェアのみで全システムを構成することが困難で、コンピュータを組み込んだシステム構成が必要となる。しかしミニコンピュータ等を組み込んだシステム³⁾では装置の大型化やコスト高につながり実用上からもひとつの難点となる。この点最近発展が目覚ましいマイクロコンピュータを利用すれば、装置の小型化、低コスト、環境条件に対する高信頼性、専用処理システム構成の容易さ等の利点を生かして実用に耐え得る高性能なホログラフィックソナーシステムを構成できる。この事を考慮して本研究ではマイクロコンピュータ制御によるホログラフィックソナーシステムを試作して実験を行っている。

システムの構成は Fig. 3 に示すようにマイクロコンピュータ本体である制御・処理部を中心として、バースト状超音波を放射する送信部、受波用振動子アレイを含めた受信部、ソナー像を表示する表示部からなっている。プログラムの保存のためのフロッピーディスク等の補助記憶装置やパラメータ変更やコマンド入力等のためのキーボード装置等の入出力装置もシステムに組み

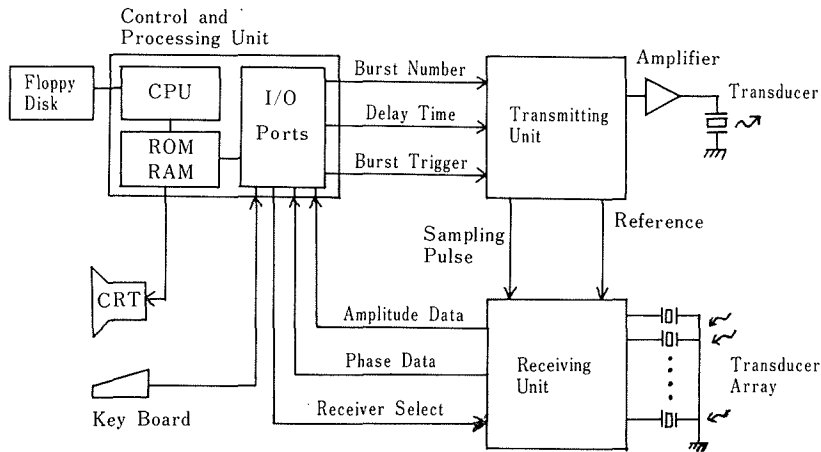


Fig. 3 System configuration

込まれているが、本システムの本質的な部分ではないのでこれらの部分についての説明は省略する。マイクロコンピュータをはじめ本システムを構成する各装置は汎用の既製の装置ではなく、本システムのために試作されたものである。

3.2 送信部

送信部はバースト波発生器、増幅器、超音波振動子から構成される。前述のように本システムでは超音波バースト波の継続時間と発射タイミングを正確にコントロールする必要がある。従来このような信号発生にはアナログ回路を用いることが多かったが、ソナー装置に用いる超音波の周波数帯は数百 KHz～数 MHz 程度であり、デジタル回路による制御が充分可能である。そのため必要なパラメータ、すなわちバースト波数、インターバル、スタートタイミングをマイクロコンピュータから与えデジタル論理回路でバースト信号を作り出している。従ってバースト信号の発生をデジタル的正確さで行うことができ、又ソフトウェアによってバースト信号を任意に変更することが可能となっている。Fig. 4 に送信部のブロック図を示す。この図において参照信号 (reference) は受信時における位相検出のため位相基準として受信部へ送られる。又サンプリングパルスは受信部の振動子アレイからのデータをサンプリングするために用いられる。

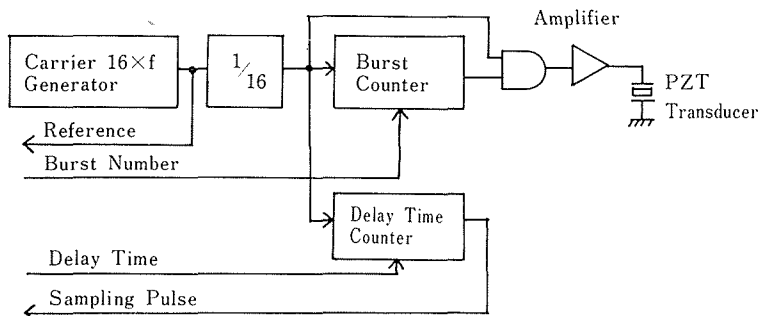


Fig. 4 Block diagram of the transmitting unit

3.3 受信部

受信部は Fig. 5 に示すように標的からの反射波を受波する振動子アレイ、増幅器アレイ、マルチプレクサ、振幅及び位相計数器から構成されている。振動子アレイとしては $2\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ の長方形開口の振動子を 2.2 mm 間隔で 128 個並べた Fig. 6 に示す直線状アレイを用いた。た

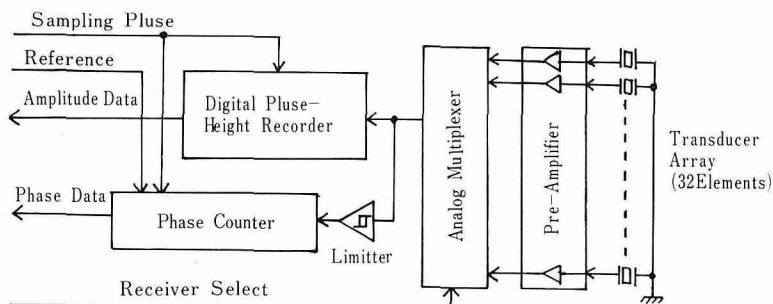


Fig. 5 Block diagram of the receiving unit

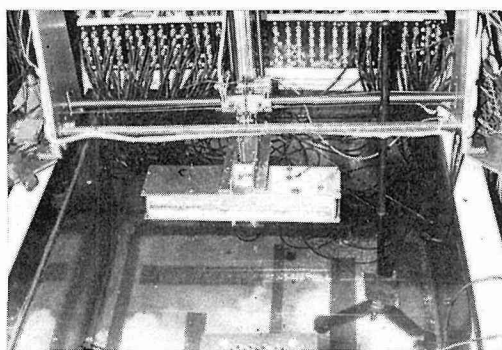


Fig. 6 Receiving transducer array

だし実験の都合上本研究ではこのアレイで端から 32 個選んで 7 cm の部分をアレイ開口としている。ここで距離方向の情報は標的からの反射パルスの時間遅れを測定して得ているため、パースト波の発射から正確に一定時間遅らせて受信系の動作を開始させている。つまり送信部において内部クロックをカウントして遅延パルスを発生させ、これをサンプリングパルスとして受信部に送り波高記録器および位相計数器からデータを収集するタイミングとして用いている。

方位方向の情報は複素ホログラム情報として収集する。つまり光波ホログラフィ等では場の強度しか記録できないので、参照波を加えた干渉場の強度の実数データをホログラムデータとして記録するが、超音波領域では場の複素数データを複素ホログラムデータとして記録できる⁵⁾。複素ホログラムデータの収集・記録にあたっては実部と虚部に分ける方法もあるが、本研究では極形式、つまり振幅情報と位相情報を別々に収集・記録している。このため振動子アレイからの信号を増幅して (20 dB) これをアナログマルチプレクサにより各素子からの信号を切換えながらデジタル波高記録器及び位相計数器に加えている。デジタル波高記録器は入力電圧を抵抗で分圧し、これに CMOS のバッファ回路の入出力を抵抗でつないだ回路を接続して入力電圧の波高値がデジタル的に記録される回路を工夫して作っている。実験では 7 レベルの波高記録を行っている。

位相データは位相計数器により信号波の位相遅れを計測して得ている。つまり送波部から送られてくる超音波のキャリア信号周波数の 16 倍の周波数の参照信号を位相計数器のカウンタに加え、基準時刻から信号波の到達までの遅延時間を計測して位相遅れを検出している。この目的のためマルチプレクサからの出力をリミッタ回路に入れて波形整形を行っている。実験では 4 ビット 16 段階の位相データを得ている。これらの位相、振幅データは on-line でマイクロコンピュータの処理部に取り込まれる。

3.4 制御・処理部

制御・処理部は8ビットのマイクロプロセッサ (Zilog 社 Z-80 CPU) を中心に組み立てられたマイクロコンピュータである。システムの制御としては Fig. 3 に示されているようにバースト波数, デレイタイム, バースト発射トリガを出力ポートから送信部に与え, バースト状超音波の送信制御を行っている。受信部における振動子アレイ素子の切換は, 受波器セレクト信号をマイクロコンピュータから受信部のアナログマルチプレクサに与えることにより行っている。受信部からの振幅, 位相データはマイクロコンピュータのメモリに読み込まれ, データが揃った段階で処理が行われる。処理演算は主に複素数の位相回転とフーリエ変換である。フーリエ変換については FFT プログラムが ROM に固定され, これを使用して行っている。本システムのため開発した FFT プログラムでは, 64 点 FFT が1秒以下で可能であるもので, これは 32 個の振動子アレイからデータを取り込む時間とほぼ同等の速度である。

Fig. 7 にシステムの制御と処理演算のフローチャートを示す。このフローチャートの前半では超音波バースト信号のパラメータを設定し, 超音波を送波して受信部からのデータをメモリに読み込む。この操作をアレイの受波器を切り換えながら繰返して 32 個分のデータの収集を完了する。フローチャートの後半では (6) 式で表わされたように位相関数を計算し, これを受信データに掛け (位相回転), FFT によりフーリエ変換を計算して方位方向の標的の像を算出する。処理結果は CRT ディスプレイ装置に出力される。この全体の操作を距離のパラメータを変化させながら繰返すと時間の経過とともにソナー像が CRT 画面上に表示されてくることになる。

3.5 表示部

演算処理の結果のソナー像は Video RAM といわれるメモリに書き込まれる。CPU は Video RAM の読み出し, 書き込み時にアドレス信号を出し Video RAM とのデータのやり取りを行うが, その他の時にはカウンタがアドレス信号を出し Video RAM の内容が常に CRT (テレビ受像機) 画面に表示されるようになっている。従って距離を変えながら得た 1 次元のソナー像を順次 Video RAM に書き込んでゆけば, その時点までのソナー像の記録が常に CRT 画面上に表示され, 最終的には設定した範囲の 2 次元のソナー像が表示される。本システムで使用されている Video RAM は 1 K バイトのメモリ容量のもので, 文字発生用の ROM と組み合わせて CRT 画面上にプログラムのリストを表示することができる。従ってソナー動作時の諸パラメータを CRT 画面上に表示することが可能である。一方ソナー像の表示は文字パターンのうちで特殊なもの (例えば点) を組み合わせて表示している。

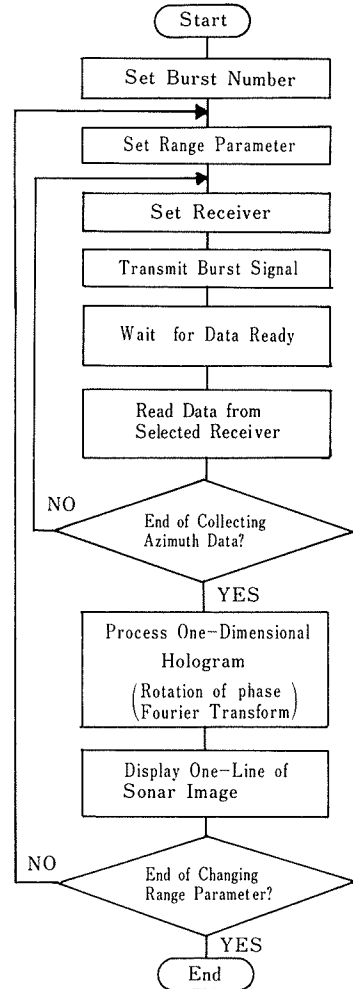


Fig. 7 Flow chart of system control and data processing by microcomputer

4. 実験と検討

4.1 水槽実験

試作したシステムを用いて水槽実験を行った。Fig. 6 に水槽の部分が示されているが、 $0.7\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ と小規模なものを用いている。超音波のキャリア周波数は 700 KHz に選んでいる。従って水中音速を 1500 m/sec とすれば波長は $\lambda = 2.14\text{ mm}$ となる。ここで (2) 式よりバースト幅の最小値 $T_{B\text{min}}$ を $N=32$, $f=700\text{ KHz}$ として求めると、

$$T_{B\text{min}} = 45.7\ \mu\text{sec}$$

となり、用いるバースト幅はこの程度のものが必要となる。本システムでは1回のバースト状超音波を送波した時に受波器アレイの1個の素子からのデータを取り込み、次に又バースト状超音波を送波してマルチプレクサで切り換えた次のアレイ素子からのデータを取り込む方法を採用している。従って前に出したバースト波が多重反射で水槽内に残っていると次のバースト波を出せない。本実験で使用した水槽は小型で超音波吸収材等も使用していないためこの残響時間が比較的長く、バースト信号間のインターバル時間は 30 msec 程度必要であった。Fig. 8 に送波器からの送信波形 (上) と1個の受波器からの受信波形 (下) の例を示す。

実験にあたって標的として鋼球、ピンポン球等の水と音響インピーダンスの異なるものを用いた。Fig. 9 に内部に気泡を含んだスポンジ状物質を $2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 程度の大きさに切って積み重

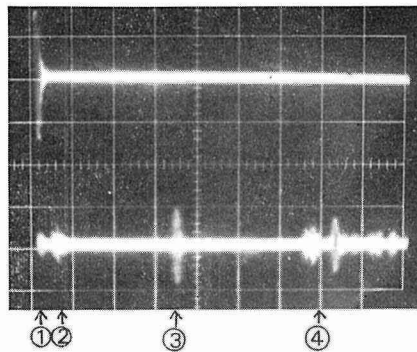


Fig. 8 Transmitted burst wave (upper) and received signal waves (below)
 ① Shoot of a burst wave ② Direct wave ③ Reflected wave from a target ④ Reflected waves from walls of the water tank

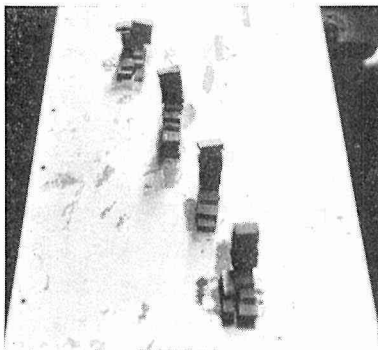


Fig. 9 Photograph of targets

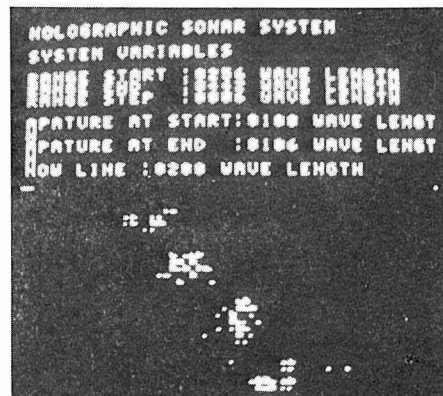


Fig. 10 Sonar image displayed on a CRT scope

ねて作った標的の写真を示す。この標的のソナー像を Fig. 10 の写真に示す。Fig. 10 はテレビ受像機に表示されたもので、写真の上半分はソナー動作時の諸パラメータが表示されており、下半分にソナー像が表示されている。Fig. 10 のソナー像では4個の標的の像が識別される。実験では1回のフーリエ変換演算で標的の像を再生しているので、2.1小節の議論からも明らかのように再生される方位方向の範囲は受波器アレイからの距離が遠くなればそれだけ広がる。実験においてその影響が認められるが、Fig. 10 の像の表示に際してこの効果の補正は行っていない。

4.2 検 討

パルスエコー法において送波器から超音波パルスを出すと、同時刻に超音波が到達する場所は送波器を中心とした円弧となる。サイドルッキングソナー等では斜方向の充分遠い距離を問題にしているためこの円弧を直線とみなせ、(1)式からフレネル近似で(2)式を求め議論を進めることができる。しかし Fig. 1 において $r_0 \approx z_0$ の近似からのずれが大きくなると(2)式において位相項の z_0 は r_0 で置き換える必要がある。つまり本研究で採用している処理方式では Fig. 11-a に示されるように送波器からの距離が一定の同心円の円弧上にある標的ソナー像を求めている。しかし表示系では Fig. 11-b に示すように直線上にある標的のソナー像として表示している。もし本ソナーシステムを近距離の比較的方位方向にひろがった標的の映像を得るために用いる場合はこの像の表示の補正が必要であろう。

本システムでは標的からの反射波が、ある時刻にアレイ全体に到達していなければならないという制約のため、パースト幅を短かくするには下限が生じ、これが距離方向の分解能向上を妨げている。そこでアレイの各チャンネル毎に遅延回路を用い、標的からの反射波が同時刻にアレイ全体に到達していなくてもよいシステム構成にすれば距離方向の分解能を向上させることができる。さらにこのことはアレイ開口を広げてもよいことを意味し、方位方向の分解能を向上させる上でも好都合になる。

本システムでは1枚のソナー像を表示するのに要する時間は数分というオーダーである。これは現在のところ処理演算よりデータ収集に時間がかかるため、例えばアレイのチャンネル数だけ波高記録器と位相計数器を用意すればデータ収集時間は大幅に短縮され、マイクロコンピュータのハードウェア及びソフトウェアの高速化と組み合わせることによりほぼ実時間でソナー像がみられるシステムが実現できるだろう。

実験の都合上ここではフレネル領域に標的がある場合についてのみ議論したが、フラウンホーフェル領域に標的がある場合でも本システムでソナー像を表示することができる。この場合ソナー像を求めるための処理演算は受波器アレイからのデータに位相回転を加えず、直接フーリエ変換を施せばよいことになる。

5. む す び

本研究ではホログラフィックソナーシステムを受波器アレイとマイクロコンピュータ技術を組み合わせて実現しようとする試みについて述べている。受波器アレイを用いることは1個の受波器による開口合成法に対して実開口法に属する技術といえ、開口を広げ方位方向の分解能を上げる

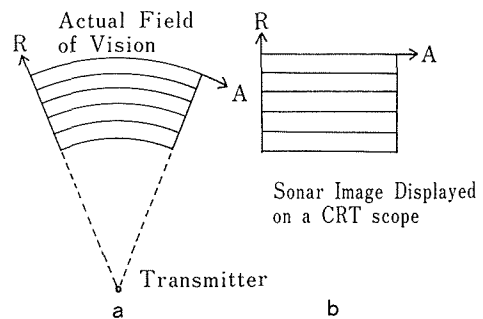


Fig. 11 Geometries of actual field of vision and its sonar image displayed on a CRT scope

点では困難な点がある。しかしアレイ技術はコンピュータ使用による高速なデータ処理技術と組み合せ実時間でソナー像が得られる利点があり、本研究においてもマイクロコンピュータを用いてその可能性を示す実験結果を得ている。特にマイクロコンピュータを用いたシステムでは従来のミニコンピュータ等使用の装置に比べて、小型で低コストのものが実現できることが実際にシステムを構成してみて明らかになった。マイクロコンピュータ技術は現段階においても急速に発展しつつあり、このようなマイクロコンピュータ技術を駆使すれば高性能の充分実用的なホログラフィックソナーシステムが実現できることが本研究の結果からも示唆され、さらに進んだシステムの開発はこれからの課題である。

本研究の1部は53年度科学研究費補助金（課題番号355176）の援助のもとに行われているものでここに記して感謝する。

文 献

- 1) L. J. Cutrona, E. N. Leith, L. J. Porcello and W. E., Vivian: Proc. IEEE, **54** (1966), 8, pp. 1026-1032.
- 2) 上羽貞行, 上野圭一, 辻内順平: 日本音響学会誌, **28** (1972), 10, pp. 547-552.
- 3) 真野邦彦, 似鳥一彦: 沖電気研究開発, **44-2** (1978), 47.
- 4) 青木由直, 鈴木洋一, 石塚滋樹, 岩崎 俊: 電子通信学会論文誌, **58-C** (1975), pp. 71-78.
- 5) M. Onoe: Ultrasonic Imaging and Holography (Edited by G. W. Stroke, W. E. Kock, Y. Kikuchi and J. Tsujiuchi) (1974), p. 455 Plenum Pub. Co.