



Title	マイクロ波ホログラフィックレーダにおける光学的-数値的ハイブリッド情報処理
Author(s)	石塚, 滋樹; Ishizuka, Shigeki; 青木, 由直 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 81, 57-68
Issue Date	1976-08-30
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41379">https://hdl.handle.net/2115/41379</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	81_57-68.pdf



## マイクロ波ホログラフィックレーダにおける 光学的-数値的ハイブリッド情報処理

石塚 滋樹\* 青木 由直\*

(昭和 51 年 3 月 25 日受理)

### Optical-Numerical Hybrid Data Processing in a Microwave Holographic Radar

Shigeki ISHIZUKA and Yoshinao AOKI

(Received March 25, 1976)

#### Abstract

An optical-numerical hybrid processing of holographic radar data was proposed and an experiment of the proposed method was conducted with the data obtained by the simulated experiment of a holographic radar using a 9.87 GHz microwave. First images were reconstructed numerically from the simulated one-dimensional radar data. Next the simulated radar data was processed by computer and displayed by an X-Y plotter, after which it was processed optically, resulting in reconstruction of radar images. Improvement of the reconstructed radar images by spatial filtering was discussed. Comparison between the method proposed here and the conventional one was also discussed.

#### 1. ま え が き

マイクロ波ホログラフィの応用として、マイクロ波写真とも言われ、地表の mapping が可能な合成開口 SLAR (Synthetic Aperture Side-Looking Airbone Radar)<sup>1)</sup> などの、いわゆるマイクロ波ホログラフィックレーダがその代表的なものとしてあげられる。

本論文では、X-band のマイクロ波を用いて、合成開口 SLAR のシミュレーションを目指したホログラフィックレーダを実験的に実現し、そこで得られたレーダデータをもとにマイクロ波ホログラフィックレーダにおける光学的-数値的ハイブリッド情報処理という新しいレーダデータ処理法を提案している。この方法は、従来まで円錐レンズなどの特別な非点光学レンズを用い、光学処理に限られていたレーダデータの処理過程に、新しく計算機による数値処理過程を導入することにより、最終的な像の読み出しの際の光学系を単純化するばかりでなく、読み出されるレーダ像に対して多様な画像処理演算を容易に適用できるというものである。

実験は、9.87 GHz のマイクロ波を用い、結像距離がそれぞれ異なる 7 枚の 1 次元マイクロ波ホログラムを作製し、まず、各ホログラムに数値的 1 次元フレネル逆変換を施し、像再生を行った。次に、7 枚の 1 次元マイクロ波ホログラムを 2 次元のホログラフィックレーダデータとして、本論文で提案している方法に従ってレーダデータに数値処理を施したのち、簡単な光学系でレーダ像の読み出しを行い、本方法の妥当性について確かめている。また、空間周波数フィルタ

\* 電子工学科

リングの手法を用い、レーダ像の  $S/N$  改善を図った。さらに、本方法と従来までの方法との比較を行い、本方法の有効性について、その将来のホログラフィックレーダデータ処理系への応用という観点から検討を加えている。

### 2. 合成開口 SLAR の原理とその像処理

合成開口 SLAR は、従来までのパルスエコー法などのレーダ技術とホログラフィ技術を巧みに結合した非常に優れたレーダ方式である。合成開口 SLAR の原理を図1に示す。

飛行機から広がったビームを地表に照射し、地表からの反射波を飛行機に搭載されたアンテナで飛行中に次々と受信する。受信の際、送信機からの波を反射波と重ね合わせ2乗検波し、受信信号とする。このように、飛行機の運動に従い、飛行機に搭載された送受兼用のアンテナで受信される信号は、飛行機の航路に沿って非常に大きな開口のアンテナアレイを配置して得られる受信信号と等価なものである。このレーダ方式が合成開口法と言われるのはこのためである。

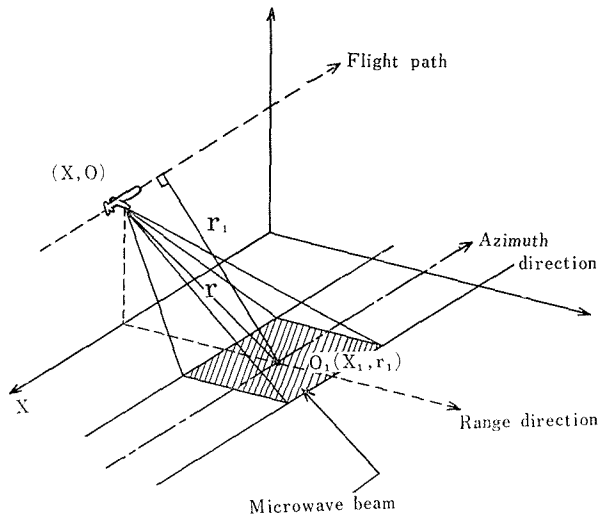


図1 合成開口 SLAR の原理

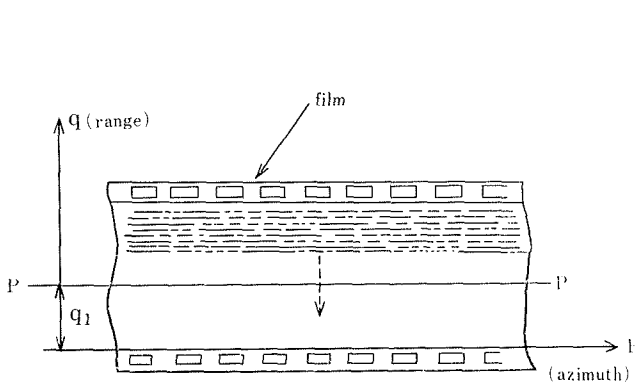


図2 合成開口 SLAR データ

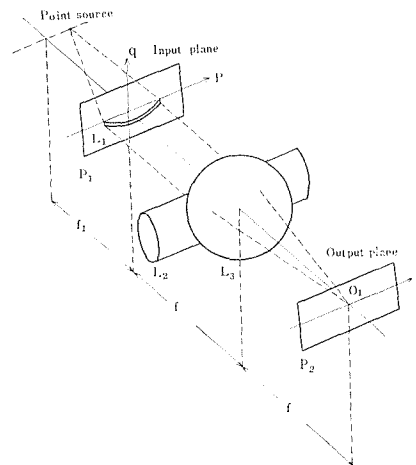


図3 1次元フレネル変換光学系

合成開口 SLAR の方位方向の情報は1次元フレネル変換ホログラムの重ね合わせであり、距離方向の情報はアンテナで受信する反射波の時間遅れとして記録される。

このようにして得られた信号を各パルスごとに CRT 上に輝度変調をかけた時間軸方向の走査線として表示し、それをフィルムを移動させながら記録する。その様子を図2に示す。

図2において、 $q$  軸は距離方向、 $p$  軸は方位方向の情報である。例えば、図2において、 $q=q_1$  での  $pp'$  の情報は、図1に示した航路からの垂直距離  $r_1=(q_1c)/(2v_s)$  の地表に存在する多くの点標的からの1次元フレネルゾーンプレートの重ね合わせである。ただし、 $c$  は光速、 $v_s$  は輝点の走査速度である。

本論文では、 $q=q_1$  における  $pp'$  の情報を“チャンネル  $q_1$  における方位方向の情報”と表現する。

図2のように記録されたレーダデータの像処理は、従来まで2、3の光学系が検討され<sup>1,2)</sup>、すべて光学処理によって行われており、その代表的なものを図3に示す。

フィルムに記録されている内容から、フィルムの  $p$  方向 (方位方向) にはフレネル逆変換を施し、 $q$  方向 (距離方向) にはそのまま結像させると、2次元の地表のレーダ像を得ることができ、図3はそのための1次元フレネル変換光学系である。

ただし、 $L_1$  は  $q$  軸方向に沿って曲率が変わる、いわゆる円錐レンズ (conical lens) を、 $p$  軸に平行な  $4q$  だけ離れた2つの面で切断したものを表わしている。 $L_2$  はシリンジカルレンズ、 $L_3$  は球面レンズである。

### 3. 実験と実験結果

本論文で行う実験の目的は、合成開口 SLAR のシミュレーションを目指したホログラフィックレーダの実現である。

実験を行うにあたり、図4に示すホログラム作製系を考える。

送波器  $s_i$  から  $z_i$  だけ離れたところに開口が  $L$  の1次元受波器アレイを線状に配置し、そこから  $z_0^{(k)}$  ( $k$  は、1個の物体点を移動させ、移動させるごとにホログラムを記録することを表わしている) だけ離れたところにある理想的な点物体が送波器からの波で照射されており、それを受波器アレイで受波するという系である。明らかに、この系で得られるホログラムは1次元フレネルゾーンプレートである。

いま、図4に示すように点物体が  $x_0$  方向に  $x_0^{(k)}$  だけ中心からずれているとすれば、ホログラムの真の像に関する成分は定数的位相項を無視して式 (1) と表わされる。

$$\begin{aligned}
 h(x) &\ni \delta(x_0 - x_0^{(k)}) * \exp\left[-j2\pi \frac{x_0^2}{\lambda z_0^{(k)}}\right] \\
 &\ni \exp\left[j\frac{\pi}{\lambda} \left(\frac{1}{z_0^{(k)}} - \frac{1}{z_i}\right) x^2\right] \exp\left[-j2\pi \frac{x_0^{(k)}}{\lambda z_0^{(k)}} x\right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

ただし、 $x$  は受波器アレイ軸上の座標であり、 $\lambda$  はマイクロ波の波長、 $\delta$  は Dirac のデルタ関

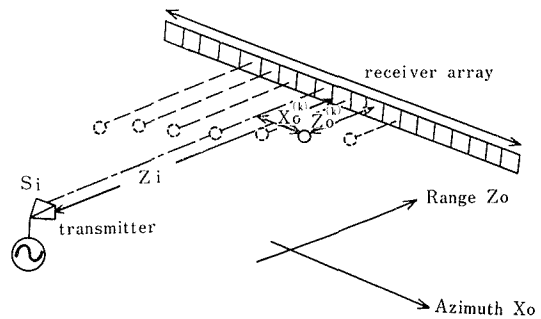


図4 マイクロ波ホログラフィックレーダのシミュレーション実験

数である。また、\* はコンボリユーション積分を表わしている。

実験は、図4の作製系をそのまま実現した。送波器から6.0 m離れたところにクリスタルダイオードをマウントした20個の電磁ホーンを線状に配置し、送波器はアレイの中心に合わせておく。また、床からの反射を避けるために、送波器、受波器とも床から1.8 mの高さに置いた。送波器からは、9.87 GHz ( $\lambda=3.04 \times 10^{-2}$  m) で1 KHzの矩形変調をかけたマイクロ波を物体に照射する。用いる物体は、幅6 cm、約2波長の半無限長と近似できるアルミ板である。

最初はこの物体を、 $z_0^{(1)}=1.5$  m、 $x_0^{(1)}=-24$  cmの位置に配置し1次元のマイクロ波プログラムを作製し、次に、 $z_0^{(2)}=1.5$  m、 $x_0^{(2)}=-16$  cmの位置に物体を移動させ同様のプログラムを作製するという方法で、 $z_0$ 方向(距離方向)には1.2 mから30 cmおきに3.0 mまで、また $x_0$ (方位方向)には $z_0^{(4)}=2.1$  mのときに物体が受波器アレイの中心にくるように $x_0^{(1)}=-24$  cmから $x_0^{(7)}=24$  cmまで、 $z_0$ が30 cmずれるごとに $x_0$ 方向には8 cm移動させ、それぞれの $z_0^{(k)}$ 、 $x_0^{(k)}$ の状態1枚の1次元マイクロ波プログラムを作製する。アレイの素子間隔は15 cm、アレイの長さは3 mである。

結局、結像距離の異なる7枚の1次元マイクロ波プログラムを得る。

電磁ホーンにマウントされたクリスタルダイオードで検波された受波信号は増幅されたのち、アナログのスイッチング回路を用いてCRT上に実時間で表示される<sup>3)</sup>。この様子を図5に示す。

ところで、図4の構成をそのまま用いて作製したプログラムでは図5からわかるようにプログラム開口のサンプリング間隔がアレイの素子間隔15 cmに一致し、計算機で像再生を行う場合には、サンプリング間隔がそのまま分解能となり、15 cmの分解能では良質の像が得られないため、アレイ素子間隔内のプログラム信号を、すでに解析されている方法に従って得た<sup>3)</sup>。

簡単には、図4において受波器アレイを $x$ 方向に微小距離移動させ、複数回の測定を行えばよいが、アレイを空間的に固定したまま、送波器を式(2)に従って移動させ測定しても、近似的に同様の効果が得られる。

$$\Delta x_i = \frac{z_i - z_0^{(k)}}{z_0^{(k)}} \Delta x \quad (2)$$

ただし、 $\Delta x$ は受波器アレイの $x$ 方向への微小移動距離、 $\Delta x_i$ はそれに対応する送波器の移動距離である。本実験では、 $\Delta x$ を素子間隔を5等分した3 cmとし、1枚のマイクロ波プログラムの作製に対し、送波器を5回移動させ測定を行った。したがって、サンプル点は100点、サンプリング間隔は3 cm、プログラム開口は2.97 mとなる。

5回の測定で得られる図5のような5枚のゾーンプレートを組み合わせて1枚のプログラムを

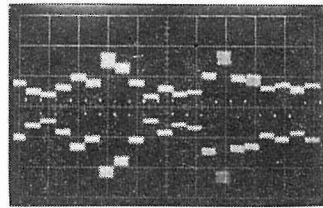
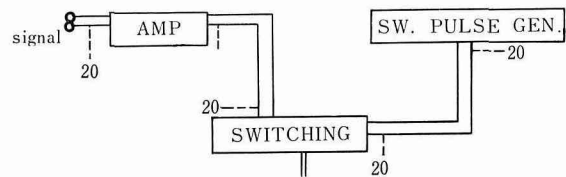


図5 実時間マイクロ波プログラム作製系

図5 実時間マイクロ波プログラム作製系

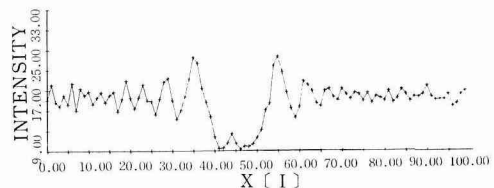


図6 1次元マイクロ波プログラム

得る。また、受波器アレイの指向性を、物体が存在しない場合に受波信号レベルがフラットであると仮定し、そのフラットレベルで規格化して最終的なホログラムデータとした。

得られた7枚の1次元マイクロ波ホログラムのうち1枚を図6に示す。

横軸は開口を表わし、ゾーンプレートが形成されている様子がわかる。

#### 4. 実験結果の解釈

図4の実験構成を実現し、図6の結果を得たが、これは1つのマイクロ波ホログラフィックレーダである。

図4のホログラフィックレーダでは、本来2次元である情報を1次元に分解して記録している。これは、合成開口 SLAR のシミュレーションを目指しているためである。つまり、図4の実験構成と図1の合成開口 SLAR とのアナロジーから図7に示すモデルを考えることができる。

つまり、図1において飛行機が運動することによって合成される開口を図4では20個の電磁ホーンよりなる受波器アレイでシミュレートしている。ただ相違は、図1の飛行機に搭載されているアンテナは、いわゆる送受兼用であり、内部参照波を用いてホログラムを作製しているのに対し、図4では、Gabor-type の in-line ホログラムを作製しているということである。

記録される像情報の対応については、図1の航路から垂直距離  $r_1$  の地上には多くの点標的が存在し、図2のフィルム上  $q=q_1$  のところにはこれら多くの点標的からの1次元ゾーンプレートを重ね合せが記録されており、これがチャンネル  $q_1$  での方位方向の情報である。

一方、図4においては、図7に示すように受波器アレイ(航路に相当する)から、ある距離  $z_0^{(k)}$  (垂直距離  $r_1$  に相当する)における方位方向の情報は、ただ1つの点標的による1次元ゾーンプレートそのものになっている。これがチャンネル  $z_0^{(k)}$  での方位方向の情報である。

したがって、図6の結果(7枚のホログラム)は、7つの異なる距離からの方位方向の情報であり、これを以後、“7チャンネルの2次元ホログラフィックレーダデータ”と表現する。

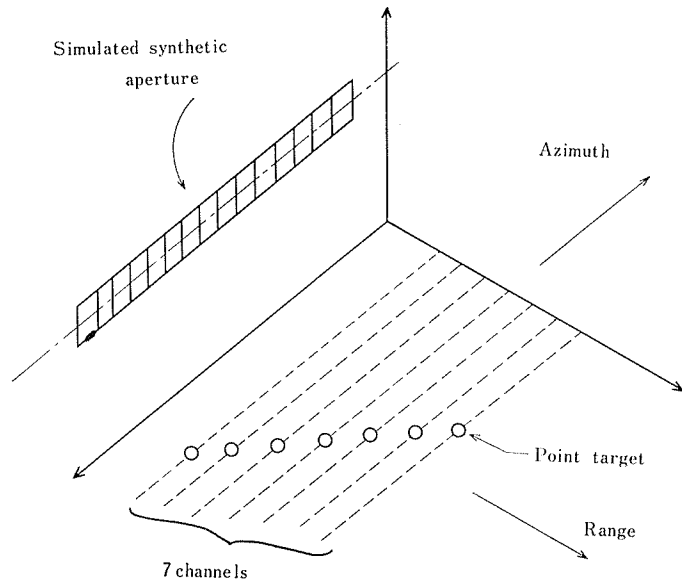


図7 合成開口 SLAR とのアナロジー

#### 5. 数値的像再生

図4の構成によって得られた7チャンネルの2次元ホログラフィックレーダデータを、各々のチャンネルについて考えると、それは図6に示すように単に1次元フレネル変換ホログラムにすぎない。したがって、そのホログラムに計算機でフレネル逆変換を施し像再生することは容易である。

計算機で数値的にフレネル変換を行う方法については研究が行われ、2つのアルゴリズムが確立されている<sup>4)</sup>。

簡単のため、任意の1次元フレネル変換プログラムを  $H(x)$  とする。

第1のアルゴリズムは、従来までのコンボリューション積分に従った方法であり、再生像  $I$  を式 (3) から式 (5) で求めるものである。

$$F[H] = \frac{L}{M} \sum_{m=0}^{M-1} H\left(\frac{m}{M}L\right) \exp\left[-j2\pi\frac{mm'}{M}\right] \quad (3)$$

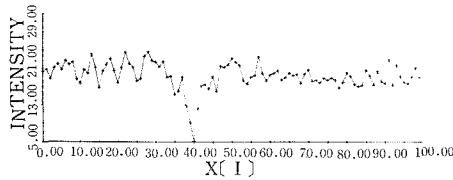
$$F[P.F.] = \exp[jDm^2] \quad (4)$$

$$I = F^{-1}[F[H] \times F[P.F.]] \quad (5)$$

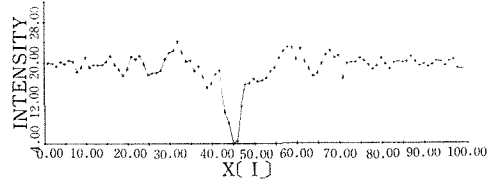
ただし、 $F$ 、 $F^{-1}$  はそれぞれフーリエ変換、逆変換オペレータを表わし、 $M$  はサンプル数、 $L$  はプログラム開口、 $P.F.$  は式 (6) で表わされる伝搬関数 (Propagation Function) である。

$$P.F. \equiv \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda z}x^2\right] \quad (6)$$

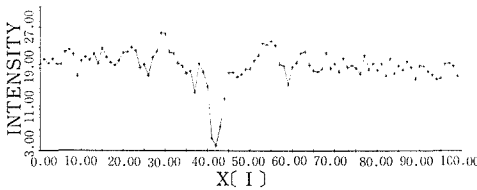
ただし、 $\lambda$  はマイクロ波の波長、 $z$  は伝搬距離である。また、 $D$  は式 (7) で与えられる伝搬パラメータである。



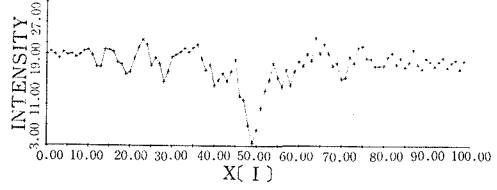
(1)  $z_0^{(1)} = 1.2 \text{ m}$      $x_0^{(1)} = -24 \text{ cm}$



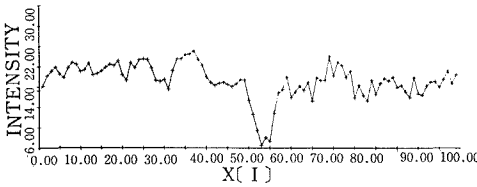
(2)  $z_0^{(2)} = 1.5 \text{ m}$      $x_0^{(2)} = -16 \text{ cm}$



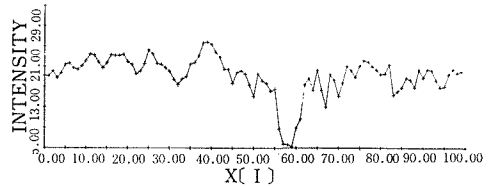
(3)  $z_0^{(3)} = 1.8 \text{ m}$      $x_0^{(3)} = -8 \text{ cm}$



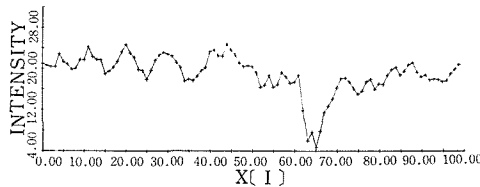
(4)  $z_0^{(4)} = 2.1 \text{ m}$      $x_0^{(4)} = 0 \text{ cm}$



(5)  $z_0^{(5)} = 2.4 \text{ m}$      $x_0^{(5)} = 8 \text{ cm}$



(6)  $z_0^{(6)} = 2.7 \text{ m}$      $x_0^{(6)} = 16 \text{ cm}$



(7)  $z_0^{(7)} = 3.0 \text{ m}$      $x_0^{(7)} = 24 \text{ cm}$

図8 第1アルゴリズムによる数値的再生像

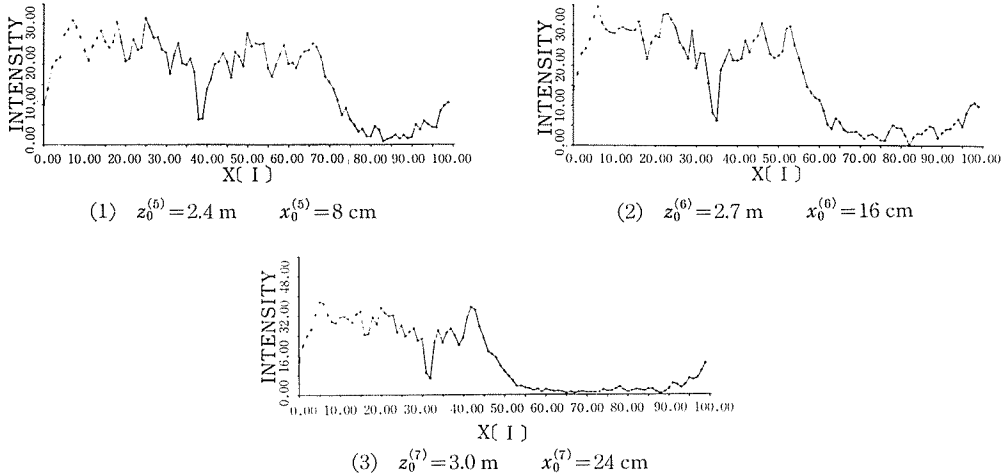


図9 第2のアルゴリズムによる数値的再生像

$$D = \frac{\lambda z \pi}{L^2} \quad (7)$$

ここで、式(4)は伝搬関数の解析的フーリエ変数、OTF (Optical Transfer Function) である。また、第2のアルゴリズムは、再生像  $I$  が式(8)で求まるものである。

$$I = F \left[ P.F. \left[ \frac{L}{M} m \right] \times H \left( \frac{L}{M} m \right) \right] \\ = \frac{L}{M} \sum_{m=0}^{M-1} H \left( \frac{m}{M} L \right) \exp[-jD'm^2] \exp \left[ -j2\pi \frac{mm'}{M} \right] \quad (8)$$

ただし、 $D'$  は式(9)で与えられる伝搬パラメータであり、 $z$  は伝搬距離である。

$$D' = \frac{\pi}{\lambda z} \frac{L^2}{M^2} \quad (9)$$

前節で得られた2次元ホログラフィックレーダデータの各チャンネルのホログラムに、まず、第1のアルゴリズムを用いて得られた再生像を図8(1)~(7)に示す。

また、3枚のホログラムに対し、第2のアルゴリズムを用いて得た再生像を図9(1)~(3)に示す。このアルゴリズムには、再生面開口がもとのホログラム開口よりも広がるという性質があり、図9のような in-line ホログラムからの像再生よりも、off-axis ホログラムからの像再生に有効な方法である<sup>5,6)</sup>。

## 6. 光学的-数値的ハイブリッド処理

前節で行った単一のチャンネル  $k$  のホログラフィックレーダデータに対する演算を図10に示す。

ただし、実線は第1のアルゴリズム、点線は第2のアルゴリズムを表わす。図10において“数値処理されたホログラフィックレーダデータ”とは、第1のアルゴリズムでは、一度フーリエ変換されたホログラフィックレーダデータにOTFを乗じたもの、第2のアルゴリズムでは、空間領域で直接伝搬関数を乗じたものを表わしている。つまり、図10の“ホログラフィックレーダデータ”がフレネル変換ホログラフィックレーダデータであるのに対し、“数値処理されたホログラフィックレーダデータ”はフーリエ変換ホログラフィックレーダデータである。

ここで、図3の円錐レンズは図10の点線で示した、レーダデータに直接伝搬関数を乗ずると

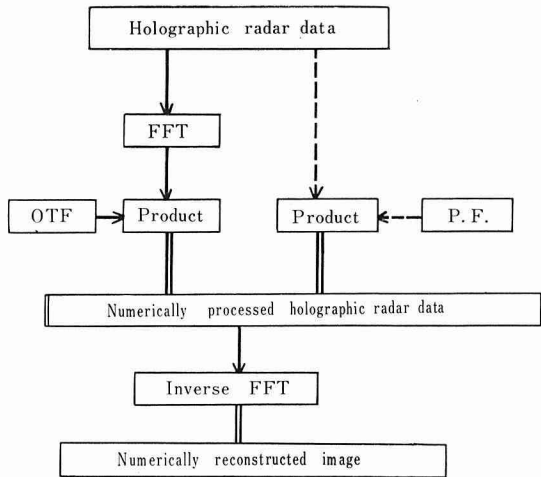


図10 光学的-数値的ハイブリッド処理

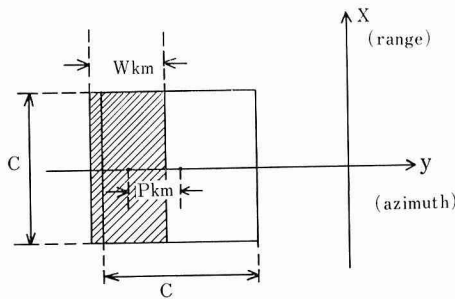


図11 バイナリーホログラム

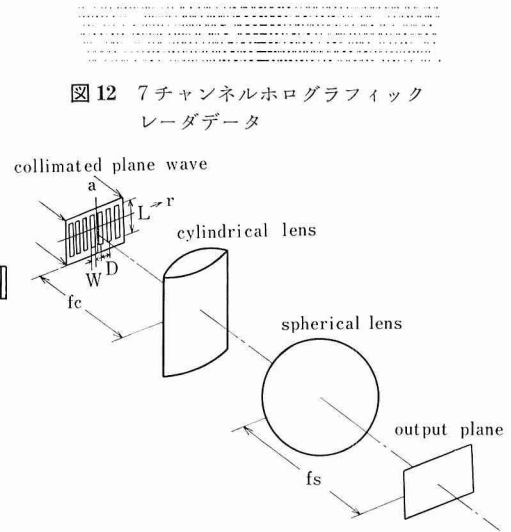


図12 7チャンネルホログラフィックレーダデータ

図13 1次元フーリエ変換光学系

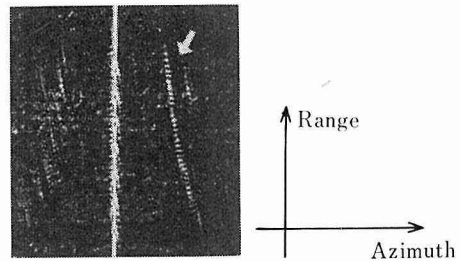


図14 図13の光学系による図12からの再生像

いう演算機能を持っている。したがって、この点線で示した演算、あるいは実線で示した空間周波数領域での演算を計算機であらかじめ数値的に行っておけば、原理的には、円錐レンズという特別な非点光学レンズが不要となる。

数値実験は図10の実線で示したアルゴリズムに従って行った。

実験的に得られた図6のホログラフィックレーダデータのフーリエ変換に OTF を乗じ、複素数である演算結果をバイナリーホログラムを用いて表示する。これが、数値処理された新しいホログラフィックレーダデータとなる。用いるバイナリーホログラムは、よく知られた Lohmann-type のものを変形したものである。

第  $km$  セル内の開口の位置、および透過率を図11に示す。

つまり、 $k$  はチャンネルを、 $m$  は方位方向のサンプル点を表わしている。また、開口の変位  $P_{km}$  は複素振幅分布の位相成分に、開口の幅  $W_{km}$  はその振幅成分に対応している。 $W_{km}$  を開口の高さとしてではなく、幅として表わしたのは、7チャンネルのホログラフィックレーダデータを配置する際に、距離方向へのチャンネルの分離が制限されるのを避けるためである。

このようにして表示した7チャンネルのホログラフィックレーダデータを図12に示す。

図12に示した2次元ホログラフィックレーダデータと図2に示したレーダデータは、距離方向に関しては、何ら意味するところに相違はないが、方位方向に関しては、図2の方位方向の情報が地表の物体からのフレネル回折波と参照波とのホログラムであるのに対し、図12の方位方

向の情報は、計算機による数値処理によって、あたかも物体からのフラウンホーファー回折波を参照波とともに記録しているかのようなフーリエ変換ホログラムであるという大きな相違がある。したがって、図 13 に示す 1 次元フーリエ変換光学系で像の読み出しが可能となる。

図 12 の X-Y プロッタで表示されたホログラフィックレーダデータを適当に縮小してフィルムに記録し、図 13 の光学系を用いて得たレーダ像を図 14 に示す。

中央の輝線は 0 次光であり、再生された像を矢印で示したが、これは、実験の際にシミュレートした、図 7 に示した地表の様子によく対応した 2 次元のレーダ像である。

## 7. 再生像の改善

本論文で提案している光学的-数値的ハイブリッド情報処理によって、図 14 に示した 2 次元のレーダ像を読み出したが、これを見ると距離方向に高次の像が重なり、チャンネルの分離が悪くなっている。この距離方向の高次の像は図 13 の入力面に示したチャンネルの周期構造によるものである。

そこで、本節では、入力画像の空間周波数面で様々なフィルタリング操作を施す、いわゆる空間周波数フィルタリングの手法を用いて図 14 に示した再生像のチャンネルの分離向上を図る。これはまた同時に、再生像の S/N 改善につながるものである。

いま、 $\phi(x)$  なる任意の 1 次元複素関数で図 13 の入力面に示す、振幅透過率が 1 である単一の矩形を変調する。特に、本節では、 $\phi(x)$  として図 10 に示した数値処理されたホログラフィックレーダデータを考え、変調方式は図 11 に示したバイナリーホログラムの原理に従い、結局、変調された結果が図 12 の単一チャンネルであると考ええる。

図 12 の 7 チャンネルの 2 次元透過関数  $t(x, y)$  は式 (10) で与えられる。

$$t(x, y) = \sum_{k=1}^K \text{rect}\left(\frac{x-kD}{W}\right) \left[ B + \sum_{m=0}^{M-1} \text{rect}\left[\left\{y - \left(\frac{m}{M}L + P_{km}\right)\right\} / W_{km}\right] \right] \quad (10)$$

ただし、 $D$  は被変調矩形間隔、 $W$  はその幅、 $L$  は方位方向の長さを表わし、図 13 に示すとうりである。 $K$  チャンネル数、 $M$  は方位方向のサンプル数、 $B$  はバイアスである。

また、 $\text{rect}(x)$  は式 (11) で定義される矩形関数である。

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & : |x| \leq 1/2 \\ 0 & : |x| > 1/2 \end{cases} \quad (11)$$

式 (10) で与えられる透過関数を持つ入力画像の 2 次元フーリエ変換  $F(f_x, f_y)$  は式 (12) と求まる。

$$F(f_x, f_y) = BW \text{sinc}(Wf_x) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f_x - \frac{k}{D}, f_y\right) + W \text{sinc}(Wf_x) \\ \times \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(f_x - \frac{k}{D}\right) \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left[-j2\pi\left(\frac{m}{M}L + P_{km}\right)f_y\right] W_{km} \text{sinc}(W_{km}f_y) \quad (12)$$

ただし、 $f_x, f_y$  は空間周波数面の座標を表わし、また、 $\text{sinc}(x)$  は式 (13) で定義される sinc function である。

$$\text{sinc}(x) = \sin \pi x / \pi x \quad (13)$$

式 (12) より、図 12 の 2 次元フーリエ変換面では、その周期的な構造から、距離方向に関し、つまり、 $f_x$  方向に高次のスペクトルが  $1/D$  の間隔で並ぶことがわかる。

ところで、図 11 に示したバイナリーホログラムは  $y$  方向 (方位方向) にも  $L/M$  の間隔でサンプリングしているが、議論を特にチャンネルの分離改善に限るため、 $f_y$  方向の高次のスペクトルが再生像に与える影響については考慮しない。

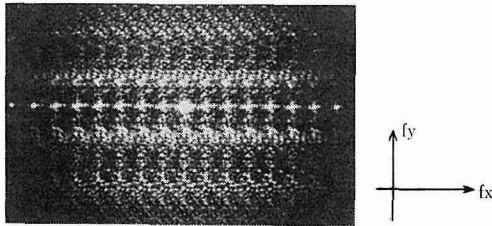


図15 図12の2次元フーリエ変換

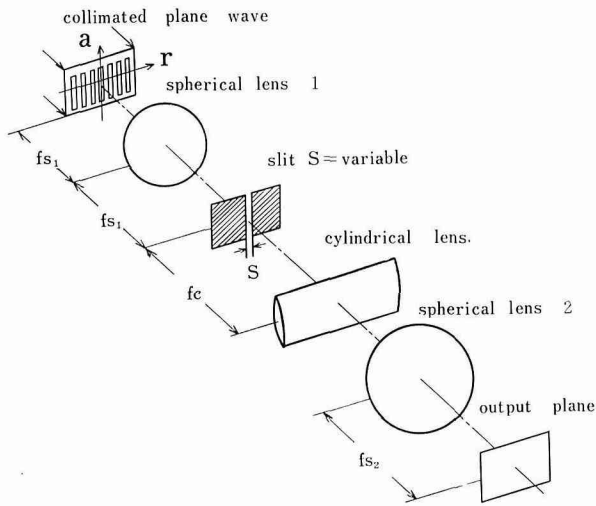
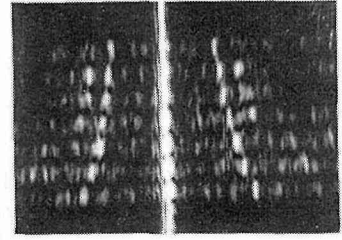
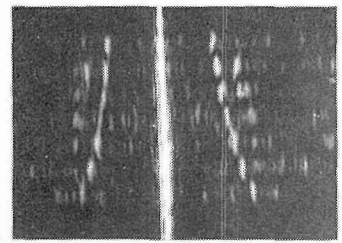


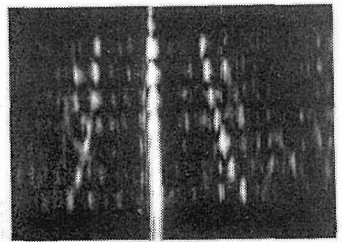
図16 空間周波数フィルタリングを用いた1次元フーリエ変換光学系



(a)  $S=3.18 \times 10^{-2}$  cm



(b)  $S=2.11 \times 10^{-2}$  cm



(c)  $S=2.05 \times 10^{-2}$  cm

図17 図16の光学系による図12からの再生像

図15に入力画像の2次元フーリエ変換を示す。たしかに、 $f_x$  方向に等間隔で高次のスペクトルが現れている。この高次のスペクトルが図14の再生像でのチャンネルの分離を劣下させている。

矩形の変調関数  $\phi(x)$  の1次元フーリエ変換  $\Phi(f_x)$  が式(14)の条件を満たし、また、 $x$  方向の(距離方向)のサンプリング間隔、つまり、図13の入力面における矩形間隔  $D$  が式(15)を満たしていると仮定すると、式(12)で与えられる2次元フーリエ変換面において、 $4f_x = 2B_x$ の幅を持つ1次元スリットを置くことによって式(12)の  $k=0$  の項だけを取り出すことが可能となる。

$$\Phi(f_x) = F[\phi(x)] = 0 \quad \text{for } |f_x| > B_x \quad (14)$$

$$D < \frac{1}{2B_x} \quad (15)$$

実際に用いた光学系を図16に示す。スリット幅  $S$  は可変である。図13の入力面における矩形間隔  $D$  は  $D=4.0 \times 10^{-2}$  cm であり、そのフーリエ変換面では  $d = \lambda f / D = 3.16 \times 10^{-2}$  cm の間隔で高次のスペクトルが現れる。ただし、 $\lambda = 6.328 \times 10^{-5}$  cm,  $f = 20$  cm である。

スリット幅  $S$  を変えて得られたレーダ像を図17に示す。

図 14 の再生像と比較し、チャンネルの分離が非常に良くなっており、したがって、再生像の  $S/N$  向上も認められる。

## 8. 検 討

実験で得られた 7 チャンネルの 2 次元マイクロ波ホログラフィックレーダデータからの 2 次元レーダ像の読み出しを本論文で提案している光学的-数値的ハイブリッド情報処理に従って行い、さらに、空間周波数フィルタリングの手法を用いて再生像の  $S/N$  改善を図った。

この方法は、単に光学処理系を単純化するばかりではなく、計算機による将来のホログラフィックレーダデータの実時間処理という方向に対し、て貴重な基礎的データを与えている。

具体的な将来の実用化モデルとしては、飛行機にホログラフィックレーダ処理専用の処理系を搭載し、得られたホログラフィックレーダデータを次々とメモリーに蓄え、計算機内で発生させた位相関数を乗じたのち、図 12 に示すようなレーダデータを CRT などに表示し、それを入力画像として、図 13 のような簡単な光学系でレーダ像の読み出しを行うというモデル、あるいはさらに進んで、レーダ像の読み出しも計算機で行い、出力像だけを CRT などに表示するといういわゆる実時間処理モデルが考えられる。

一方、蓄えられる情報量に関しては、これらの方法が従来までの一貫した光学処理に劣るものであることは逃がれられない。しかし、計算機処理の段階において、読み出されるレーダ像に対して、エッチの強調、バイアスの除去など、各種の画像処理技術が容易に適用できるという大きな利点が考えられる。

## 9. あ と が き

9.87 GHz のマイクロ波を用い、合成開口 SLAR のシミュレーションを目指したホログラフィックレーダを実験的に実現し、得られた 2 次元のレーダデータをもとに、まずこれを 1 次元に分解し、2 つの異なるアルゴリズムで 1 次元数値的像再生を行った。次に、本論文で提案している光学的-数値的ハイブリッド情報処理に従って、2 次元のレーダ像の読み出しを行い、本方法の妥当性について確かめている。また同時に、空間周波数フィルタリングの手法を用い、再生像の  $S/N$  改善を図った。さらに、本方法と従来までの方法との比較を行い、本方法の有効性について、その将来のホログラフィックレーダデータ処理系への応用という観点から検討を加えている。

近年急速に発達してきている LSI によるマイクロプロセッサ（マイクロコンピューター）によりマイクロ波ホログラフィックレーダにおいても on-line, real-time のレーダ像読み出しの可能性も考えられる。またそれに伴い、計算機メモリー制限の克服、表示装置の開発、及び処理系全体の小形化などの像再生専用の処理システムに関する研究が今後の課題となつてこよう。

## 謝 辞

本研究は昭和 49, 50 年度科学研究費（課題番号 955104）の援助を受けたものであり、ここに記して感謝する。

## 参 考 文 献

- 1) Cutrona, L. J., E. N. Leith, L. J. Porcello and W. E. Vivian: "On the Application of Coherent Optical Processing Techniques to Synthetic-Aperture Radar" Proc. IEEE, 54, 8 (1966) pp. 1026-1032.
- 2) Kozma, A., E. N. Leith and N. G. Massey: "Tilted-Plane Optical Processor" Appl. Opt. 11 (1972)

pp. 1766-1777.

- 3) 永井啓之亮, 青木由直, 鈴木道雄: “大きな素子間隔をもつ1次元受波器アレイによるマイクロ波ホログラムの作製” 信学論 (B), 技術談話室, vol. 56-B, 7 (1973).
- 4) 青木由直, 石塚滋樹: “数値的二次元フレネル変換法” 信学論 (B), vol. 57-B, 8 (1974).
- 5) 石塚滋樹, 青木由直: “走査型ホログラムの数値処理” 応用物理, 研究ノート, vol. 44, No. 5 (1975).
- 6) Aoki, Y. and S. Ishizuka: “Numerical Reconstruction from an Off-Axis Sound-Wave Hologram” Proc. IEEE (Lett.) Vol. 63, No. 4, (1975).