

A Radar-Type Microwave Holography System Using a Gunn Oscillator with Built in Phase Detectors

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00011684

This work is licensed under a Creative Commons
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0
International License.



位相検波器を内蔵したガン発振器を用いた レーダ型マイクロ波ホログラフィシステム

林 健一*, 塩貝 剛**, 新井 一男*, 井田 良雄*

A Radar-Type Microwave Holography System using a Gunn Oscillator with Built-in Phase Detectors

Ken-ichi HAYASHI, Tsuyoshi SHIOGAI, Kazuo ARAI and Yoshio IDA

Abstract

This paper describes a radar-type microwave holography system making use of the Gunn device with a built-in detector manufactured as a Doppler sensor. In order to make the detector phase-sensitive an additional detector of the same type was furnished in the waveguide mount at the distance $3\lambda_g/8$ apart from the built-in detector. While the device was scanned across the plane ($64 \times 64 \text{ cm}^2$) parallel to a two-dimensional object, 64×64 data were taken and put into a microcomputer where the data were processed and the images were reconstructed. The scanning system was controlled by the same computer. Despite of the possible deteriorative effects due to an insufficient frequency stability of Gunn oscillator and the interference between oscillator and detectors, reconstructed images as good as ones by a similar system using Klystron oscillator and object scanning were found to be obtained. Because of the compactness and flexibility of the Doppler sensor for holography use, applications of the modified Gunn sensor to a three-dimensional holography system is now in progress.

1. ま え が き

マイクロ波は光波に比べて桁違いに波長が長いので、光学領域のホログラフィに比べて、マイクロ波ホログラフィは著しく解像度が劣っているが、空間情報を計算機に取り込み、これに数値的演算処理を施すことで、準実時間で像再生ができる利点がある。(筆者らのシステムでは、ホログラム採集から像再生まで6分程度である。)特に実験室では、ホログラム開口を大きくとることができないので、狭い範囲の限られたサンプル点のもつ空間情報を、できるだけ有効に利用し、良い再生像を得る工夫をすることが必要不可欠である。

マイクロ波ホログラフィでは、物体形状の情報である物体波 O と参照波 R をミキシングし、これを2乗

検波することで、干渉強度が求められる。すなわち、

$$I = |O + R|^2 \quad (1)$$

$$= OR^* + O^*R + |O|^2 + |R|^2$$

ここで*は複素共役を表す。(1)式の第1項が必要な物体波成分であり、第2項が焦点外れた共役像成分、第3項および第4項が物体波による零周波数近傍の雑音および参照波による直流分である。従って、これらの成分の中から第1項だけを抽出できる方法が要求される。この方法には、2個の平衡形位相検波器と移相器を用いる方法¹⁾、4相位相変調器と1個の2乗検波器を用いる方法²⁾などがある。筆者らは、これらの方法を簡略化した方法により、良い実験結果を得て既に報

* 電子工学科

**大学院生

告^{3),4)}している。

ところで、安定なマイクロ波発振源としてクライストロン発振器の使用が好ましいが、クライストロンは高電圧の電源を必要とし、物体波と参照波をミキシングし空間情報を検波する際、導波管で回路を構成すると、回路が大形化し、波源走査による空間情報の採集が難しくなる。一方、ガン発振素子はクライストロン発振器に比べて、安定性で劣るとされているものの、最近では品質の良いものが廉価で簡単に入手できるようになり、その応用範囲も急速に広がりつつある。

このガン発振素子と信号検出用ダイオードを内蔵したマイクロ波ドップラーセンサ⁵⁾は、広く利用されており、その検波機構が同期検波であることに注目すると、僅かの改造により、物体の複素反射係数を測定することが可能である⁶⁾。筆者らは、この改造ドップラーセンサを走査波源として使用し、送受信器走査方式によって、良い再生像を得たので報告する。

2. 解 析

ホログラムは、参照波と物体波の相関として求められる空間情報の記録である。

マイクロ波ホログラフィでは、このホログラム情報の採集は、光波のように写真用フィルムに相当する面状感材が得がたいので、送受信器と標的物体の相対的な位置関係を 2 次元的に変化させて、離散的にサンプル情報を計算機に取り込むことで実行される。即ち、図 1 に示すように、固定物体に対し送受信器を走査するか、あるいは、固定送受信器に対し物体を走査するかによってホログラム情報が採集でき、両者は双対の関係にある。これを示すために、図 1 のように座標を設定する。今、送受信器が $(x, y, 0)$ に位置し、波長 λ

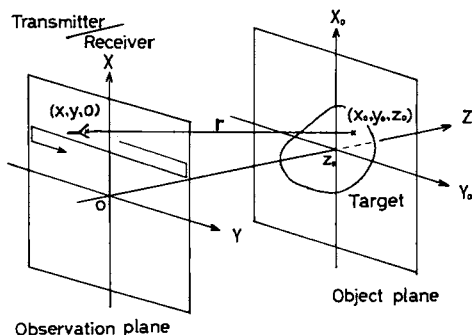


図 1 座 標 系

で単位電力の電磁波を無指向的に放射しているとする。このとき、物体面上にある標的によって散乱される電磁波を受信器で検出する。この散乱波、即ち物体波 O は、フレネル・キルヒホッフの回折積分の式に従って表され、

$$O(x, y, 0) = \frac{j}{\lambda} \iint_{-\infty}^{+\infty} g(x_0, y_0, z_0) \frac{\exp(-j2kr)}{r^2} dx_0 dy_0 \quad (2)$$

ここで、 $k=2\pi/\lambda$ 、 $G=g(x_0, y_0, z_0)$ は 2 次元物体の反射率分布である。 r は送受信器の位置 $(x, y, 0)$ と物体面上の点 (x_0, y_0, z_0) までの距離である。(2) 式から、物体波は設定した座標系には依存せず、その相対的な位置関係で物体波の空間分布が決定されることが示される。(2) 式において、 $|x-x_0|$ 、 $|y-y_0|$ が z_0 に比べて十分小さいとして、近軸近似をすると、

$$\begin{aligned} O(x, y, 0) &= \frac{j}{\lambda z_0^2} \exp(-j2kz_0) \int \int_{-\infty}^{\infty} g(x_0, y_0, z_0) \\ &\quad \times \exp(-jk \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2z_0}) dx_0 dy_0 \\ &= \frac{\exp(-j2kz_0)}{2z_0} \times G \otimes P_{z_0/2} \end{aligned} \quad (3)$$

となる。ここで P_z は伝搬関数であり、

$$P_z = \frac{j}{\lambda z} \exp(-jk \frac{x^2 + y^2}{2z}) \quad (4)$$

である。ところで、走査面（観測面）及び、物体面は固定しているから、回折波分布が物体の反射率分布と伝搬関数（反射形ホログラフィでは、その距離は実効的に $z_0/2$ となる）の畳み込みに比例する。(3) 式をフレネル逆変換すれば再生（複素）像 I が得られる。

$$\begin{aligned} I &= \frac{\exp(-j2kz_0)}{2z_0} G \otimes P_{z_0/2} \otimes P_{z_0/2}^* \\ &= \frac{\exp(-j2kz_0)}{2z_0} F^{-1} \{ F(G) \cdot F(P) \cdot F(P^*) \} \\ &= \frac{\exp(-j2kz_0)}{2z_0} G \\ &\propto G \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 F および F^{-1} は、それぞれフーリエ変換およびフーリエ逆変換を表す。この I は複素電界に比例

する量であるから、再生像としては、通常、電力分布像 H として次式で示される。

$$H \propto G^2 \quad (6)$$

従って、ホログラム採集は、小型で軽量のドップラーセンサに若干の改造を加え、これを走査することで実行し、得られた信号に数値的フ列ネル逆変換を施すことによって再生像を求める。

3. 実験

3. 1 システム

市販のドップラーセンサ (S-RX 8 ; 東芝) は、ガン発振素子と検波素子を内蔵した軽量でコンパクトな構成である。このドップラーセンサは、検波機構が同期検波であることに着目して、これを送受信一体の走査波源として使用することができる。ところが、このままでは物体波の複素振幅情報を求めることができない。そこで、図2に示すように、若干の改造を加える。即ち、既存の検波素子から $3\lambda_g/8$ (λ_g : 管内波長) 離れた位置に、もう1つの検波素子を組み込んで、2個の検波素子から物体波の複素振幅情報を取り出そう

とするものである。このとき、物体に向けて照射された電磁波の反射波成分とガン発振素子から直接検波素子に達する参照波成分とのミキシングにより、それぞれの検波出力 X_1, X_2 が次式で求まる。

$$X_1 = |R + O|$$

$$X_2 = |Re^{-j\frac{3\pi}{4}} + Oe^{j\frac{3\pi}{4}}| \quad (7)$$

ここで、 $R = |R|$ 、また、検波素子の検波特性は、ほぼ直線検波であるとする。2個の検波素子はガン発振素子の近傍に位置しているため、参照波成分 R に微弱な物体波信号成分 O が重畳された形で得られることになる。従って、 $R \gg |O|$ なる条件のもとに (7) 式を展開でき、近似式として、

$$O + O^* = 2(X_1 - R)$$

$$O - O^* = j2(X_2 - R) \quad (8)$$

を得る。これより、物体波 O が

$$O = (X_1 - R) + j(X_2 - R) \quad (9)$$

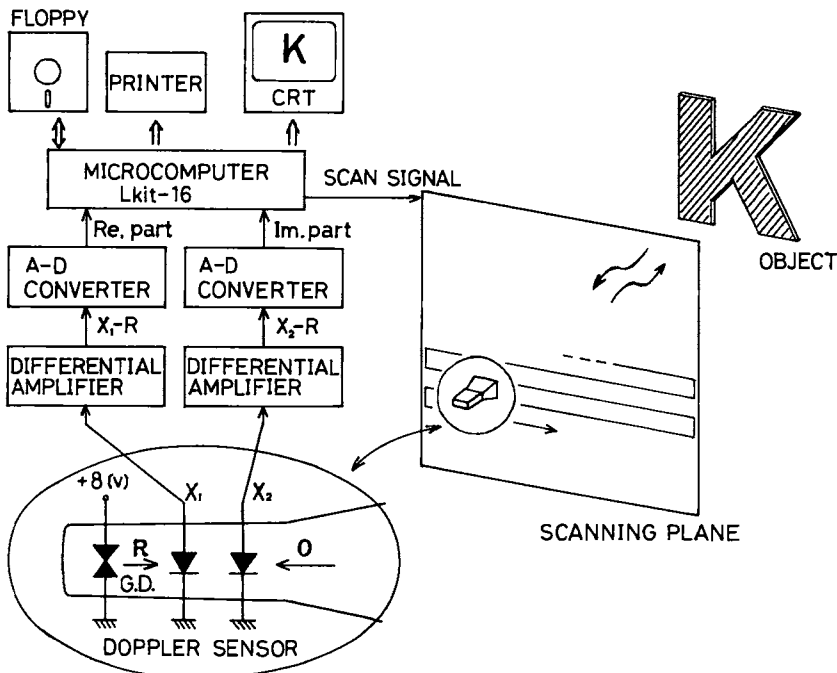


図2 マイクロ波ホログラフィシステム

として求まる。2 個の検波素子は、互いに $3\lambda_g/8$ だけ離れるように設計したが、設計条件以外の周波数でも、その周波数はずれに相当する位相回転を補正するように計算機処理すれば、再生像が得られる。上式は、それぞれの検波出力から、ある一定成分だけ差し引くことで、それぞれが複素振幅の実数部および虚数部となることを示している。従って、検波出力を適当に調整した差動アンプに入力することで、物体波の複素振幅に相当する $X_1 - R$, $X_2 - R$ の検出が達成されることになる。

一方、送受信器は図 2 に示すように、送受信器走査信号によってステッピングモーターを駆動することにより、縦・横 $64 \times 64 \text{ cm}^2$ の範囲で走査し、1 cm 間隔で、送受信器走査信号に同期して物体波情報を採集している。この情報は、A/D 変換器を通して 8 ビットに量子化し、マイクロコンピュータに取り込まれる。得られたホログラムは、CRT 上に相対電力に応じて最大 16 階調で輝度変調された図形として表示される。さらに、ホログラムデータはフロッピーディスクに記録され、必要に応じて再生処理することができる。また、ハードコピーはプリンタを使用し、ホログラムや再生像を最大 64 階調で記録できる。以上の処理は、すべてマイクロコンピュータで制御されており、各処理はキーボードとモニタテレビによる会話形式で実行されている。

3. 2 実験結果

標的物体(金属板でできた大きさ $20 \times 20 \text{ cm}^2$ の文字 K)は、送受信器走査面から 140 cm 離れた位置にマイクロ波の吸収体^{7),8)}を背景として固定し、標的物体からの反射波を採集する。図 3 は、得られたホログラムに数値的再生処理を施すことで求めた再生像である。しかし、壁、床、天井などからの反射波擾乱の影響が残る。これらの雑音成分は計算機による加算・減算処理により軽減し、再生像を改善することができる^{9)~11)}。

例えば、物体情報を有するホログラムと物体を取り除いて採集した物体無しホログラムを作成し、前者から後者を減算することによって相関のある成分を差し引くことができる。また、無相関な成分に対しては、物体情報を有する何枚かのホログラムを作成し、これを加算合成処理すれば、この無相関な成分を押えることができる。再生像を求めるために使用する数値的フレネル逆変換が線形演算であることから、この加算・減算処理は、ホログラム面上でも、再生面上でも実行

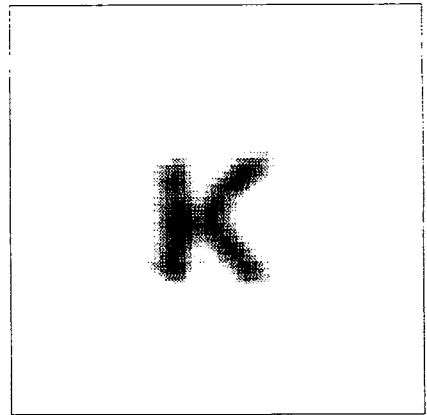
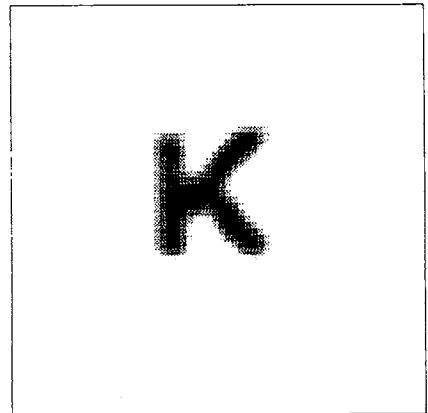
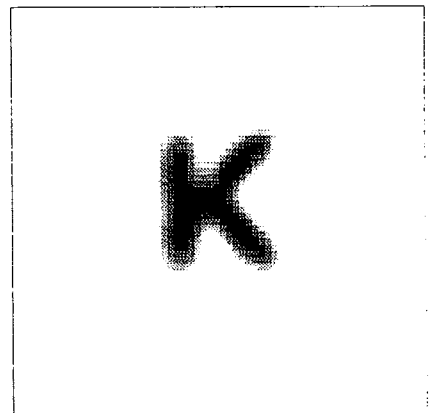


図 3 再生像



(a)

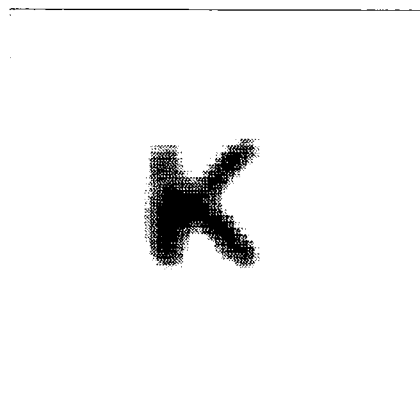


(b)

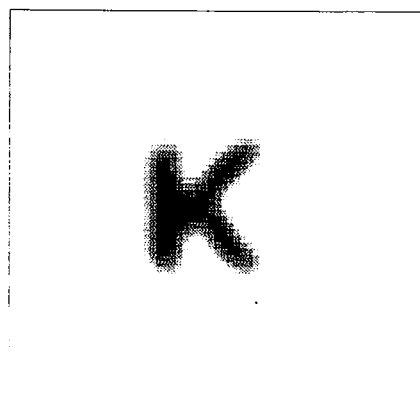
図 4 (a) ドップラーセンサ用ガン素子使用(送受信器走査方式)

(b) クライストロン発振器使用(物体走査方式)

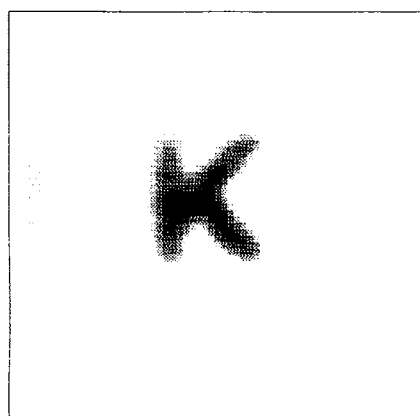
することができる。さらに、この加算・減算処理は、反射擾乱の多い環境や、電磁波吸収体の設置できないところでの像を再生するに有効な手段となり得る。



(a) 9GHz



(b) 10 GHz



(c) 11GHz

図5 他の発振周波数での再生像

図4(a)は、減算処理を施して求めた再生像である。比較のため、クライストロン発振器を使用し物体走査方式で求めた再生像³⁾を図4(b)に示したが、両者は同程度の良好な再生像であることがわかる。

ところで、この改造ドップラーセンサは、ガン発振素子近傍に2個の検波素子を配置しているので、導波管内の電磁波モードを擾乱したり、ガン素子の発振にも悪影響があるのではないかと思われたが、再生結果から考察して、その影響は小さいと考えられる。

このドップラーセンサは機械同調によって9.0GHz～11.5GHzまで発振周波数を変えることができる。そこで、種々の発振周波数でホログラム採集を試み、再生像を求めてみた。改造ドップラーセンサに組み込んだ2個の検波素子の間隔は10.5GHzに同調させた場合の $3\lambda_g/8$ に設定しているので、他の周波数に同調させて使用した場合には、計算機上で角度補正（付録参照）が必要である。図5は9GHz、10GHz、11GHzに機械同調をとり求めた再生像であるが、どれも良好な結果が得られている。

4. む す び

マイクロ波ドップラーセンサに改造を加え、これを送受兼用走査波源として使用したマイクロ波ホログラフィ装置を試作した。同装置では、クライストロン発振器に比べて安定性に劣るとされるガン発振素子を用いており、また、発振素子と2個の検波素子を同一の導波管回路中に設置しているので、両者間の相互作用があり、これらによる再生像質の劣化が予測される。この予測にも拘らず、クライストロン発振器を波源として使用し、物体走査によって求めた場合と、ほとんど同程度の実験結果が得られた。

本装置は小型で簡潔な構成であり、低電圧の直流電源で発振させることができ、取り扱いやすいという特長があり、実用的にも好ましい送受一体走査方式を採用できるなどの利点がある。また、このドップラーセンサは機械同調によって、周波数を大幅に変化させることができ、実験結果でも示したように、広い周波数範囲で良好な結果が得られるなど、柔軟性に富んでいる。この特徴を利用して、多周波ホログラフィに適用して距離分解能を向上すれば、3次元像再生が可能である。これについては現在実験中である。

最後に、実験装置の製作に助力された本学橋本松進技官に深く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 松尾, 山根: “レーダホログラフィ”, 電子通信学会.
- 2) 林, 新井, 塩貝, 井田: “4 相位相変調器を用いたミリ波ホログラフィシステム”, 昭 57 信学光・電波部門全大, 215.
- 3) 新井, 林, 井田, 浅村: “複素マイクロ波ホログラフィシステム”, 金大工学部紀要, 第 15 巻, 第 1 号, pp. 75—80, (昭 57).
- 4) 新井, 林, 塩貝, 井田: “ミリ波複素ホログラムの再生”, 昭 57 信学光・電波部門全大, 214.
- 5) 堀江: “マイクロ波部品, 応用の基礎”, トラ技, April, pp. 378—380, (昭 58).
- 6) 塩貝, 新井, 林, 井田: “ドップラーセンサ用ガン素子を走査波源に用いたマイクロ波ホログラフィ装置”, 昭 58 信学総全大, 872.
- 7) 新井, 林, 井田: “周期的に配列した抵抗膜を用いた簡易電波吸収体”, 信学技報, MW 81—9, (昭 56).
- 8) 林, 新井, 井田: “ミリ波・マイクロ波帯簡易電波吸収体”, 信学論(B), J 64—B, 9, pp. 1043, (昭 56).
- 9) 林, 井田, 新井: “物体走査形電波ホログラフィの耐反射波じょう乱性の実験的検討”, 信学論(B), J 64—B, 11, pp. 1291, (昭 56).
- 10) 塩貝, 新井, 林, 井田: “複素ホログラムの加算, 減算処理による再生像の改善” 昭 57 電気四学北支大, C—27.
- 11) 岡田, 柴田: “音波多重ホログラムからの像再生”, 信学技報, IE 79—31, (昭 54).

付録 (9) 式の角度補正

検波素子の相互間隔が $3\lambda_g/8$ (即ち, 位相差が $3\pi/4$) となるように設定できない場合には, その偏差角 θ を求めることによって計算機上で数値処理し, 物体波を求めることができる。

$$X_1 = |R + O| \approx R + \frac{1}{2}(O + O^*) \quad (a)$$

$$\begin{aligned} X_2 &= |Re^{-j(\frac{3\pi}{4} + \theta)} + Oe^{j(\frac{3\pi}{4} + \theta)}| \\ &= R - j\frac{1}{2}(Oe^{j2\theta} - O^*e^{-j2\theta}) \end{aligned} \quad (b)$$

(a) $\times e^{-j2\theta}$ + (b) より

$$\begin{aligned} O &= (X_1 - R) + j \{ (X_2 - R) \operatorname{cosec}(2\theta) \\ &\quad - (X_1 - R) \tan(2\theta) \} \end{aligned}$$

と求まる。