

5. 超音波FM変調方式赤外線ヘテロダイン・レーザ・レーダーの動作特性 Operational Characteristics of Infrared Heterodyne Laser Radar Using Ultrasonic FM Scheme

宮川 正 Tadashi Miyakawa
小林 喬郎 Takao Kobayashi
船場 文男 Humio Inaba

東北大学電気通信研究所
Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

1. はじめに

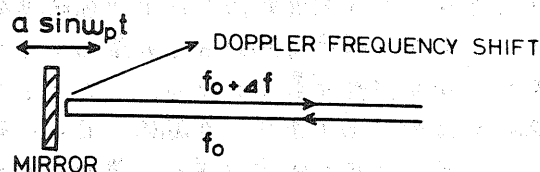
赤外域の10μm 付近の波長帯は、大気の透過率が高い、“大気の窓”の一つであり、NH₃、C₂H₄、O₃ 等、多くの大気汚染分子の吸収スペクトルが分布するとともに、高出力、高効率のCO₂ レーザーが光源として利用できること等のために、この波長域での遠隔計測技術の開拓が、大きな関心を呼んでいる。^{1)~3)} しかしながら、この波長域では高感度の検出器が得られないために、直接検波法は感度が低く、より高い感度を得るためには、光ヘテロダイン検波法の利用が望ましい。

通常、ヘテロダイン検波には、送信用及び局稜用の2本のレーザを用い、中間周波の安定化のために、AFCをかける等、複雑な装置構成が必要とされる。我々は、レーザ・レーダー方式において簡易で安定なヘテロダイン検波を行なうための新しい方法として、超音波振動を利用したFM変調方式のヘテロダイン装置を考案、試作し、⁴⁾ これを用いて赤外線CO₂ レーザ・レーダーの動作実験を試みている。本文では、この方式の原理とビート信号検出特性、及びヘテロダイン・レーザ・レーダーの信号検出特性について報告する。

2. 超音波FM変調方式ヘテロダイン検波法の原理

本方式の原理図をFig. 1に示す。

周波数 f_p (角周波数 ω_p)、振幅 a で単振動する反射鏡に、周波数 f_0 の光が入射すると、ドップラー効果によって、反射光にはFM変調が加わり、その電場は一般的に次式で与えられる。



$$E_r(t) = E_r \cos(\omega_0 t + z k a \sin \omega_p t + \delta) \quad (1) \quad \text{Fig. 1 レーザ光のFM変調の原理}$$

ここで、 k はレーザ光の波数、 δ は初期位相である。

一方、変調を加えられないものの光は、次のように表わされる。

$$E_0(t) = E_0 \cos \omega_0 t \quad (2)$$

これらの変調光と非変調光とを検出器で混合することによって、 $n f_p$ (n は整数) で表わされる多数の周波数成分をビート信号として検出することができる。その場合、検出器の出力電流は、

$$I_D(t) \propto \frac{1}{2} (E_0^2 + E_r^2) + E_0 E_r (\cos \delta) \cdot J_0(z)$$

$$\begin{aligned}
& + 2 E_0 E_R (\cos \delta) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(z) \cos 2n\omega_p t \\
& - 2 E_0 E_R (\sin \delta) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n+1}(z) \cos (2n+1)\omega_p t
\end{aligned} \quad (3)$$

と表わされ、 $z = ka$ である。

反射鏡のための振動素子としては、PZT等の電歪素子や、磁歪素子が利用できる。本方式を用いたヘテロダイン検波では、レーザー光源は一つで済み、周波数安定化のための複雑な装置構成は要求されない。また、変調効率もかなり高いことが期待され、(最大約60%)簡易、小型でかつ安定な装置を構成できる等、実用上多くの利点を備えている。

3. FM変調方式によるビート信号の検出特性

先づ可視域のHe-Neレーザーを使用して本方式の動作を確認した後、 $10.6\mu\text{m}$ 帯の CO_2 レーザーを用いて、本方式によるヘテロダイン・ビート信号の検出実験を行なった。

振動素子としてはPZTを用いたが、波長 $10.6\mu\text{m}$ の場合、1次のビート成分を最大にするには反射鏡の振幅が約 $1.5\mu\text{m}$ 必要である。そこで、超音波ホーンを取り付けて変位を増大させ、その先端に、ガラス基板に金蒸着の反射鏡を接着して用いた。

実験はFig. 2のように干渉計を構成して、ビームスプリッターで変調光と非変調光とを重ね合わせることによって行なった。その結果、振動系の幾つかの共振周波数において、高い変調効率のビート信号が検出された。Fig. 3に100 kHzまでのビート信号出力の周波数特性を示す。

変調効率の最も高い41.9 kHzでは、Fig. 4に示すように、PZT駆動電圧に対して、ビートの1次及び2次の周波数成分の出力振幅が変化する。1次の成分は駆動電圧の増加とともに増大し、30V付近で最大となる。このときの変調効率は約55%であり、理論値に良く一致する。一方、2次の成分は遅れて増加し始め、1次成分が最大の時、まだ増加の途中であり、この変化の様子は理論結果と一致する。

Fig. 5は駆動電圧10V、及び30Vにおけるビート信号波形である。10Vでは、ビート信号波形はほぼ正弦波であり、2次成分による歪みはほとんど見られない。それに対して30Vでは、2次成分がかなり大きく現われていることがわかる。

以上の結果から、本方式によって、波長 $10.6\mu\text{m}$ において10~40 kHzの中間周波数で安定なヘテロダイン検波が行なえることが確認された。

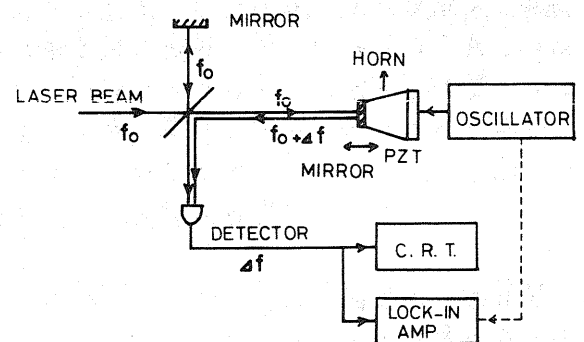


Fig. 2
 CO_2 レーザーを用いたFM変調方式
ビート信号検出の実験装置の構成

4. FM変調方式赤外域ヘテロダイン・レーザー・レーダーの検出特性

前節までに述べた変調装置を用いて、 CO_2 レーザーを光源とした赤外域ヘテロダイン・レーザー・レーダーを構成し、検出特性の測定を行なっている。

Fig. 6に使用したレーザー・レーダー装置の構成を示す。レーザー光はビームスプリッターによって二分され、その大部分は透過した後、振動反射鏡によって変調され、送信光として屋外へ送

り出される。一方、ビームスプリッターで反射された光は局発光として、標的よりの散乱信号光とともに口径2.5cmのZnSeレンズで集光され、HgCdTe検出器上で混合される。検出器の出力電流はアンプで増幅されたのち、オシロスコープ、或いは、ロックインアンプで検出される。

標的には金蒸着の反射鏡の他、ランバート型の散乱特性を示す粗い表面を持ったアルミニウムの板や、木の板、コンクリート等を用いた。

Fig. 7は60m離れたアルミニウム板の粗面からの散乱光によるヘテロダイン信号を示すものである。このときのCO₂レーザーの送信電力は約100mWであり、直接検波法では検出することができなかった。

その他、現在受信光学系の開口面積と信号対雑音比の関係、標的の種類による散乱光検出ビート信号の特性、シンクレーションの影響等について、実験と併せて解析を行っており、講演で詳細に述べたい。

5. おわりに

超音波振動FM変調方式によって安定で高効率のヘテロダイン検波を10 μ m帯のCO₂レーザーを用いて実現することができた。本方式にもとづくヘテロダイン検波の最小検出可能電力は、理論的に10¹⁹~10²⁰W/Hzに達し、小口径の光学系と出力の小さなCO₂レーザーを用いて、種々の散乱体からの散乱光を優れた信号対雑音比で検出できることから、本方式は赤外域での遠隔計測に非常に有用であると考えられる。今後、基礎的な検出特性をさらに詳しく検討するとともに、大気中のさまざまな微量分子濃度の遠隔測定への応用を進める予定である。

<参考文献>

- 1) R. T. Menzies and M. S. Shumate, Appl. Opt. 15, 2080 (1976)
- 2) E. R. Murray and et al., Appl. Phys. Lett. 28, 542 (1976)
- 3) T. Kobayashi and H. Inaba, Opt. Quant. Elec. 7, 319 (1975)
- 4) 宮川、小林、稲場, 昭和52年応用物理学会講演予稿集, 28a-G-9

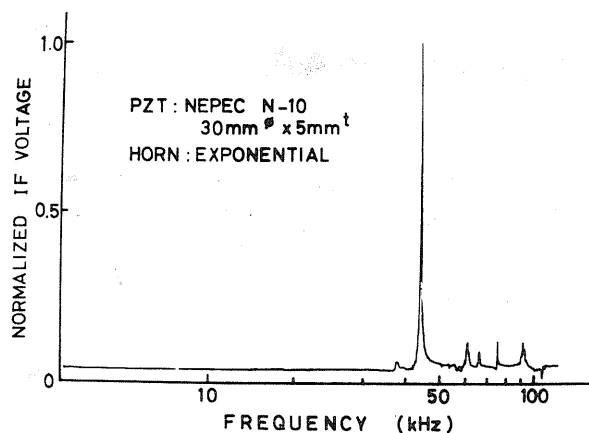


Fig. 3

CO₂レーザーを用いたFM変調ビート信号出力の周波数特性

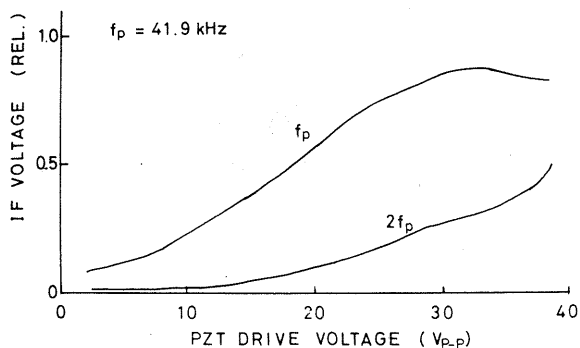


Fig. 4

駆動電圧に対するビート信号出力の変化

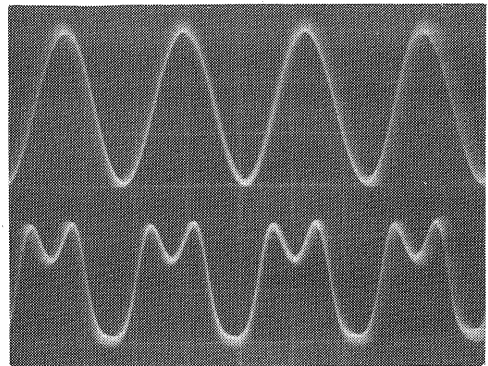
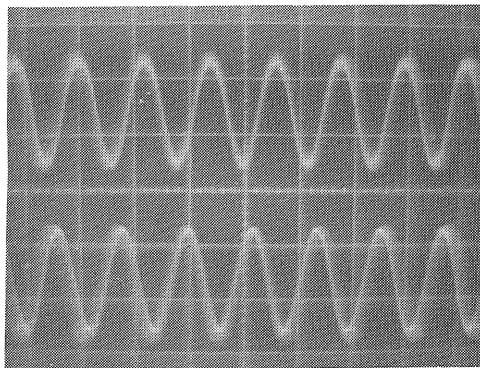


Fig. 5 超音波振動の駆動電圧波形(上)と、ビート信号波形(下); $f_p = 41.9 \text{ kHz}$
 a) 駆動電圧 10 V、横軸 20 $\mu\text{sec/div}$.
 b) 駆動電圧 30 V、横軸 10 $\mu\text{sec/div}$.

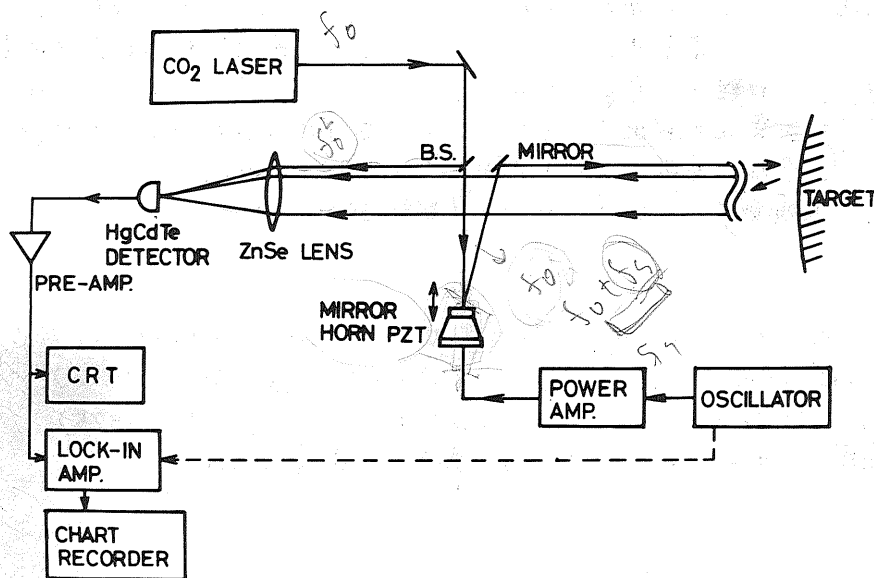


Fig. 6 FM変調方式赤外線ヘテロダイン・CO₂レーザー・レーダーの構成

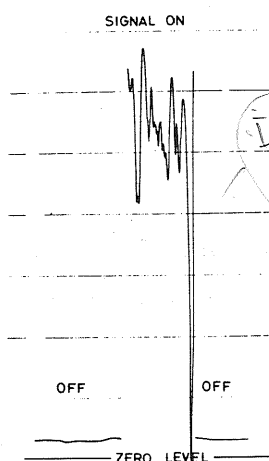


Fig. 7 60mの距離のアルミ板よりの散乱光のビート信号出力