

周波数変調光による物体の距離・速度測定

木 谷 博*

Distance and Velocity Measurements by Using Frequency Modulation LD

Hiroshi Kitani

Distance measurement using FM-CW radar operation is considerable to be possible in optical frequency region. Laser diode fed by triangular electrical signal emits triangular frequency modulated light. Photo diode composed of Michelson interferometer detects beat frequency between the light reflected by reference mirror and the light reflected by target mirror. Beat frequency proportional to distance in case of the stopping target were measured by using FM-CW light. The Doppler shift frequency in case of the moving target distance were measured by non-modulated continuous-wave light. Added and substituted frequency between the Doppler shift frequency and the frequency proportional to the distance in case of the moving target were measured by using FM-CW light.

1. 序論

FM-CW レーダ方式による物体の距離測定が光の周波数領域でも可能と思われる。ここでは赤い光を発する半導体レーザーダイオードに三角波状の駆動電流を与えて三角波状の光周波数変化を得、これを用いて、物体の距離測定の実験を試みた。また移動物体にこの光を当てると物体からの反射波にはドプラー効果が生じ、これにより物体速度も計測できると思われる。以下、原理、実験システムの構成、実験結果などについて述べる。

2. 原理と装置の基本構成

2. 1 基本原理

マイケルソン干渉計の光回路を構成する。図1を用いて説明する。

発光素子から三角波状に周波数変調された光を発し、ハーフミラーを通してこれを2分する。2分された光の一方の光を基準光とする、この光は基準反射ミラーで反射され、再びハーフミラーに戻り、これを通過後、光検出器へ入射する。

2分されたもう一方の光は目的物に向かって進んだ後、反射されてハーフミラーに戻り、光検

* 電気電子工学科

出器に入射する。光検出器には、基準光と目的物から戻ってくる信号光の2つの光が入る。光検出器は入射光の電界の自乗検波により、基準光と信号光の光周波数差の電気信号が発生する。発光素子からの光が三角波状に周波数変調されている場合、ハーフミラーから基準光ミラーまでの距離と、ハーフミラーから目的物までの距離との差に比例した周波数の電気信号を取り出すことができる。

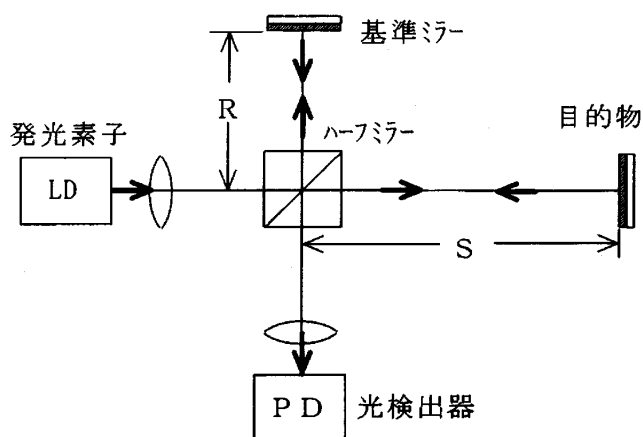


図1 原理図

以下、これを図2を用いて以下説明する。

半導体レーザーダイオードからの光が基準光の経路を経て光検出器に達する周波数変調光の電界を次式とする。

$$E_r(t) = AE_0 \exp\{j2\pi[\nu_0 + \nu_m(t)]\}$$

ここで、

ν_0 : LD 光の中心光周波数

$\nu_m(t)$: 光周波数の変調量

$\nu_0 + \nu_m(t)$: LD 光の瞬時光周波数

目的物からの光が基準光に比べて時間 τ だけ遅れて光検出器に達すると、フォトダイオードには次の電界が加わる。

$$E(t) = E_r + E_s = AE_0 \exp\{j2\pi[\nu_0 + \nu_m(t)]\} + BE_0 \exp\{j2\pi[\nu_0 + \nu_m(t - \tau)]\}$$

ここで、 E_s は目的物から反射してフォトダイオードに入る電界。 A 、 B は任意定数、 τ は $\tau = 2(S - R)/C$ で (C : 光速)、LD からの光が2分されて光検出器に達する信号光と基準光との伝播時間差である。

光検出器の出力電流 I は入射パワーすなわち電界 $E(t)$ の自乗に比例するので次の電流が出力する。

$$I = E^*(t)E(t) = E_0^2 [A^2 + B^2 + 2AB \cos 2\pi\{\nu_m(t) - \nu_m(t - \tau)\}]$$

光周波数の周波数変調量を図2に示すように三角波状とする。三角波の立上がりでは

$$\nu_m(t) = \frac{\Delta\nu}{\frac{1}{2f_m}} t = 2f_m \Delta\nu t$$

となり、次のビート周波数が得られる。

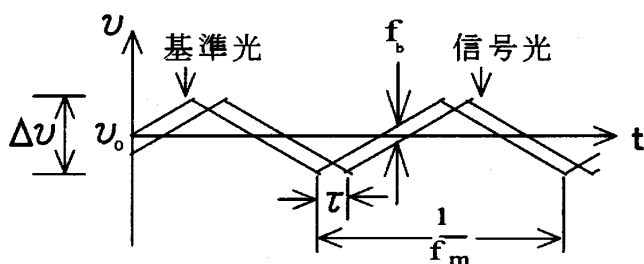


図2 光周波数の変化

$$f_b = \nu_m(t) - \nu_m(t - \tau) = 2f_m \Delta \nu \tau = 4f_m \Delta \nu \frac{S - R}{C}$$

目的物が移動物体の場合、目的物から戻ってくる光にはドブラーシフト f_d が生じている。その結果、たとえば光源から物体が離れるように移動している場合には、図3に示すような周波数の関係が生じ、三角波の立上りと立下りでは $f_d + f_b$ 、 $|f_d - f_b|$ のように周波数が異なることになる。

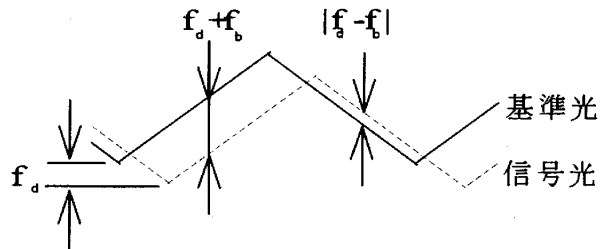


図3 目的物が離れるように移動しているときの光周波数

2-2 実験装置

半導体レーザーダイオード (LD) 光をコリメートレンズを用いて平行光にする。平行光をハーフミラーを通して2分し、固定の直角プリズムおよび移動物体に乗せた直角プリズムに当てる。2つの直角プリズムから反射してくる光はハーフミラーで合成され、集光レンズで集光の上、フォトダイオードで自乗検波し、これを増幅する。三角波状の光周波数の発生は LD の駆動電流を三角波状に変化させることにより行う。

LD には、発光波長が 650nm の東芝製の 5 mW 出力のもの2種と 10 mW のもの1種を用いた。5 mW 出力の TOLD9441MD はカタログ上の用途記載が DVD-player, ROM と記載され、他の TOLD9442M は用途記載の無いものである。出力が 10 mW の TOLD9443M は用途が DVD-ROM, RAM-Read と記載されており、またカタログ記載の発振スペクトラムデータはほぼ単一であった。LD は室温で動作させ、温度制御は実施しない。

3. 実験結果

3-1 無変調光によるドブラー周波数の検出

波長 λ の連続光を速度 v で進む移動物体に当てた場合、基準光と信号光とによりドブラー周波数 $f_d = 2v/\lambda$ が検出される筈である。 $\lambda = 650\text{nm}$, $v = 0.325\text{cm/S}$ では計算上 $f_d = 10\text{kHz}$ の周波数となる。

光学定盤の大きさの制限から目的物と基準ミラーの距離差を 10cm から 30cm の範囲で物体を移動させ、ドブラー周波数を観測した。その結果、最大出力 10 mW 出力の LD のみ 10kHz の明確

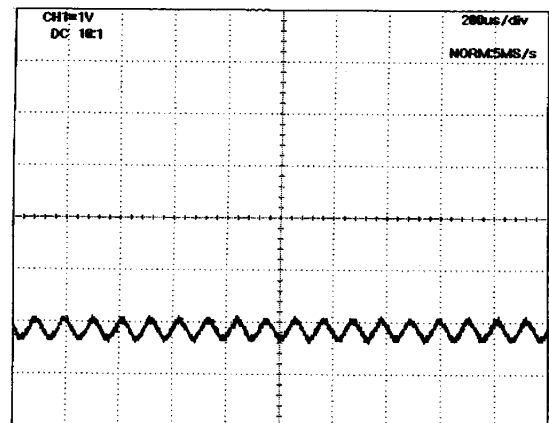


図4 ドブラー周波数
(S-R=30cm $v=0.325\text{cm/S}$)

なドプラー周波数を観測できた。図4にその一例を示す。5 mW 出力の TOLD9441MD , TOLD9442M では前者はドプラー周波数が全く観測されず, 後者は波形の崩れたドプラー周波数が観測された。

3-2 変調光によるビート周波数の観測

LD は駆動電流により, 発光波長が変化する。三角波状の駆動電流を与えれば三角波状の光周波数変化が生じる。カタログ上に記載されている TOLD9443M の発光出力と発光波長, 駆動電流と発光出力の2つのグラフから, 駆動電流に対し次式の発光波長変化が発生すると推定した。

$$\frac{\Delta\lambda}{\Delta I} = 0.074 \text{ nm/mA}$$

繰返し変調周波数幅 $f_m = 100\text{Hz}$, 変調光周波数幅 $\Delta\nu = 83\text{GHz}$ となるように LD 駆動回路の条件設定を行い, 目的物と基準ミラーの距離差を 10cm から 30cm の範囲で変えてビート波形とその周波数スペクトラムを観測した。その結果, 距離に比例したビート周波数 f_b が観測された。距離差 $S-R=20\text{ cm}$ の場合を図5に示す。距離差 $S-R=20\text{ cm}$ の場合のビート周波数の実測値は約 1.7kHz である。これに対し, 電子回路を通じて与えた $\Delta\lambda/\Delta I$ に基づく計算上のビート周波数は 5.6kHz である。外部から与えた 100Hz の三角波状の電流変化に対して LD の内部の物理的な寸法変化が追従していないのが原因の1つと思われる。

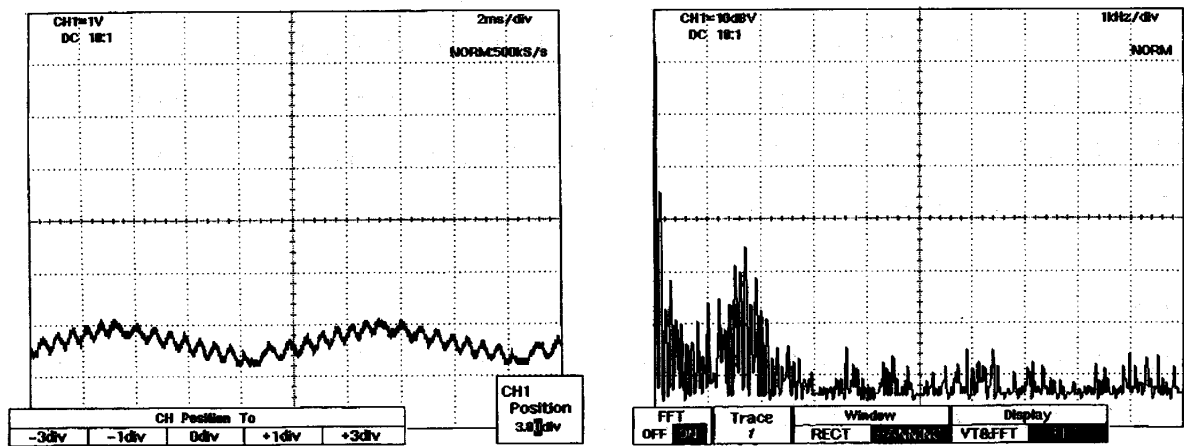


図5 三角波状の光周波数によって発生したビート波形、およびスペクトラム (S-R=20cm)

3-3 変調光によるビート周波数とドプラー周波数との和および差の観測

三角波状に変調された光を移動物体に当て, その反射光と基準光により, 前述の原理に示す $f_d + f_b$, $|f_d - f_b|$ の周波数が発生している筈である。

図6は距離差 $S-R=10\text{cm}$, 20cm , 30cm における観測スペクトラムである。変調しない連続光でのドプラー周波数 $f_d=10\text{kHz}$ に代わって, $f_d + f_b$, $|f_d - f_b|$ の周波数が観測された。

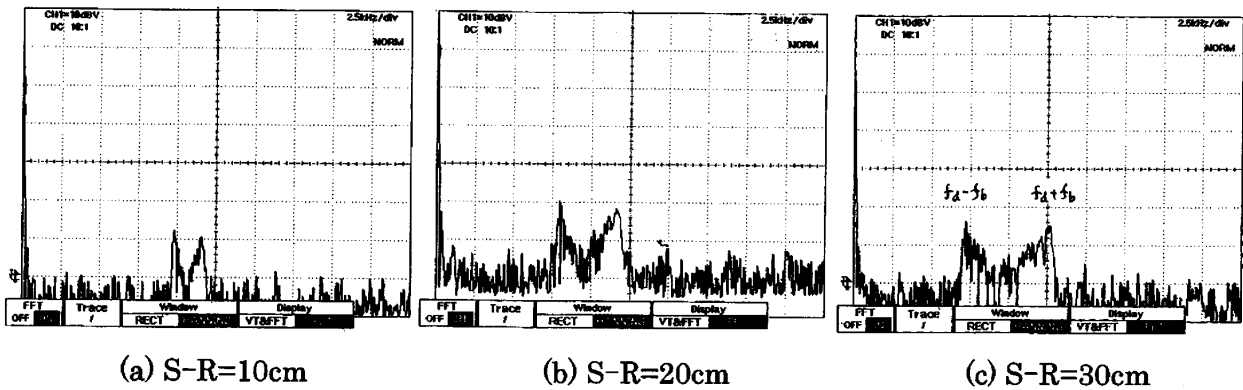


図6 物体を 0.325cm/S で移動させたときのビート周波数のスペクトラム

4. 結論

赤色を発する半導体レーザーダイオードでマイケルソン干渉計によるビート周波数が観測できるか全く、分からない状態で実験を行った。しかし、近年 DVD-ROM, RAM-Read 用に開発された半導体レーザーがあり、これを使うことにより、移動物体に無変調のレーザー光を当ててドプラ周波数 f_d を観測することができた。また移動物体に三角波状に周波数変調したレーザー光を当てた結果、移動速度に関係したドプラ周波数 f_d と物体距離に関係した周波数 f_b の和の周波数 $f_d + f_b$ と、差の周波数 $|f_d - f_b|$ の周波数をスペクトラムアナライザー上で観測することができた。

今後は和の周波数と差の周波数を計測し、加算、減算により f_d と f_b を計測できるようにしたい。

参考文献

1. 小林喬郎：”半導体レーザーによる FM ヘテロダイン測長法”，電子通信学会技術研究報告 OQE-87-153(1988)
2. 東芝 赤色半導体レーザープロダクトガイド'99-7

(平成 14 年 12 月 2 日受理)