



光導波路変調器を用いた高分解能距離計

斉藤 道明*・松本 弘一**・藤間 一郎**・大石 忠尚**

* (株)ニコン光機設計部 〒244 横浜市栄区長尾台町 471

** 計量研究所量子部 〒305 つくば市梅園 1-1-4

(1992年9月26日受付, 1992年12月4日受理)

High-Resolution Distance-Meter Using Optical Wave-Guide Modulators

Michiaki SAITOH,* Hirokazu MATSUMOTO,** Ichiro FUJIMA** and Tadanao O'ISHI**

* Designing Department of Nikon Corporation, 471,
Nagaodai, Sakae-ku, Yokohama 244

** Quantum Metrology Department, National Research Laboratory of Metrology,
1-1-4, Umezono, Tukuba 305

(Received September 26, 1992; Accepted December 4, 1992)

A high-resolution distance-meter is constructed using a laser diode light source operating at a wavelength of $1.3 \mu\text{m}$ and phase sensitive detection by a photodiode. The laser diode beam is modulated at a frequency of about 3.5 GHz by optical modulators based on Mach-Zehnder interferometer composed of single-mode waveguides in Ti:LiNbO₃ crystals. The laser beam reflected back off a target and demodulated at a frequency of 3.5 GHz-50 kHz. The signal phase is measured by a heterodyne technique with a 50 kHz reference frequency. The distance under test is therefore determined with a resolution of about $7 \mu\text{m}$ for targets in the distance range of several meters to several hundred meters.

1. はじめに

最近, 建設, 土木, 鉄鋼産業, 地震予知および科学などの分野の大型化, 高度化にともない, 数 m~数百 m の絶対距離を, 高精度に非接触で測定する要求が高まってきた。現在精密測長技術として, 屋内の近距離領域ではさまざまな光波干渉計の研究が盛んに行われている¹⁾。また, 長距離では衛星を用いた GPS などの宇宙測位技術が注目を集めている。中距離領域では, 変調周波数 75 MHz で精度 1 mm 程度のものや, 変調周波数 500 MHz で精度 $100 \mu\text{m}$ の光波測距儀が市販されているが²⁾, さらに高精度に距離を測定する装置を開発することが期待されている。このような光波変調を利用する距離計において測定精度を上げるためには, 変調周波数を高くして測定分解能を高める技術, 伝搬光路中の空気屈折率を高精度に補正する技術などが要求される。われわれは測定分解能を高めることを目的として, 光通信な

どの分野で脚光を浴びている光導波路型変調器の高速性に着目し, 光を 3.5 GHz までの高い周波数で変調することができる測距技術を開発した。その特性の評価実験を行った結果, 約 $7 \mu\text{m}$ という高い測定分解能を得ることができた。

2. 測距原理と分解能

Fig. 1 は強度変調された光波が目標物までの間を, 往復する瞬時の様子である。この出射光と戻り光の位相差 Φ を測定することより, 次式より目標物までの距離 L を求める。

$$L = (N + \Phi/2\pi)c/2f \quad (1)$$

ここで, N は整数値, c は大気中における光速, そして f は変調周波数である。整数値 N は, 複数の変調周波数 f を使うことにより決定することができる³⁾。今, 二つの周波数 f_1, f_2 ($f_1 > f_2$) を考えると, f_1 と f_2 の周波数による測定から,

$$L = \{N_1 + (\Phi_1/2\pi)\} c/2f_1 \quad (2)$$

$$L = \{N_2 + (\Phi_2/2\pi)\} c/2f_2 \quad (3)$$

が得られる。ここで、 $N_1=N_2$ のとき、(2)、(3)式より、

$$L = \{c/2(f_1-f_2)\} \times \{(\Phi_1-\Phi_2)/2\pi\} \quad (4)$$

が得られる。 $L \leq c/2(f_1-f_2)$ の範囲では、 $N_1=N_2$ となることより、(4)式を用いて Φ_1 、 Φ_2 の測定から L を一意的に決定することができる。すなわち、 f_1 、 f_2 を適当な値に選ぶことで目標物までの距離を計算することができる。また、(2)、(4)式を組み合わせることで L を高分解能に求めることができる。実際には位相測定精度に応じていくつかの変調周波数を組み合わせて距離を求める。

この方法による距離測定分解能 δL は次式より決定される。

$$\delta L = (c/2f) \times (\delta\phi/2\pi) \quad (5)$$

ここで、 $\delta\phi$ は位相読み取り分解能である。(5)式から変調周波数 f 、および位相読み取り分解能 $\delta\phi$ が高いほど、距離測定分解能は高くなることわかる。

3. 測距システム

3.1 光変調器

光導波路変調器とは、電気光学結晶基板上に Ti などの金属を拡散し、基板より屈折率がわずかに高い光導波

路を形成し、これに外部から電界を加えることによって電気光学効果により導波光の位相を変調するものである。導波路を構成することにより印加電界が高効率に結晶に作用するため、低電圧で駆動できることおよび広い周波数帯域で動作することなどが特長である。これは変調周波数 f を高くすることと、供給電力が小さくすむこ

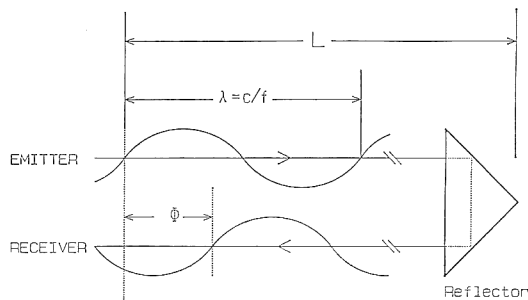


Fig. 1 Principle of distance measurement.

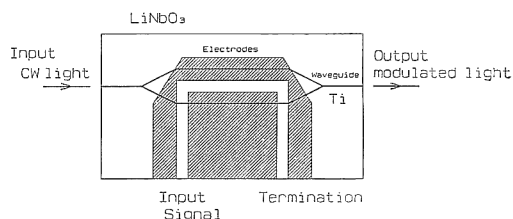


Fig. 2 Layout of a Mach-Zehnder modulator.

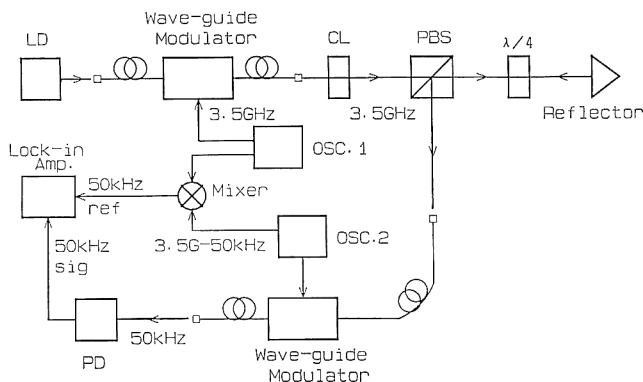


Fig. 3 Electric block-diagram of the distance meter.

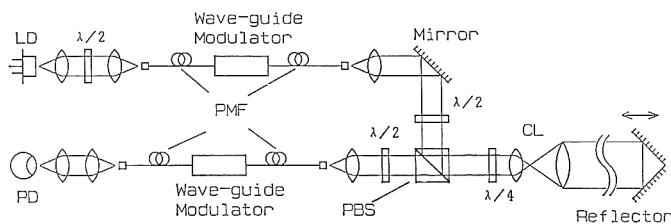


Fig. 4 Optical block-diagram of the distance meter.

とによる安定性の向上や小型化など、光波距離計用の変調器として大きなメリットである。実験には、市販のマッハツェンダー型強度変調器を使用した。Fig. 2 にマッハツェンダー型変調器の原理図を示す。マッハツェンダー型光学系を用いると、分岐した光路の片側の光路長を変調することで、合流後に干渉効果により強度変調された光波を得ることができる。

3.2 システム

構成した距離計のブロック図を Fig. 3 に、また光学系のブロック図を Fig. 4 に示す。波長 $1.3\mu\text{m}$ の半導体レーザー光を、偏波面保存光ファイバ付き光導波路変調器に入射させて変調周波数 f_1 で変調する。変調された光波は、コリメータレンズによりビーム径 $4\text{mm}\phi$ でコリメートされた後、偏光ビームスプリッタを透過する。偏光ビームスプリッタを透過した光波は、 $\lambda/4$ 板を透過後、ビームエキスパンダーによりビーム径 $25\text{mm}\phi$ とされ目標地点に置かれたコーナークューブ(ターゲット)に向けて射出される。コーナークューブにより反射された光波は、ビームエキスパンダーを通り、 $\lambda/4$ 板により射出光波に対して偏光面を往復で $\pi/2$ だけ回転され偏光ビームスプリッタで反射される。偏光ビームスプリッタで反射された光波は、集光レンズにより復調用光導波路変調器に偏波面保存ファイバを介して結合される。復調用変調器に結合された光波は、周波数 f_2 で復調される。光検出器では、 f_1 の変調光信号の位相情報が $(f_1 - f_2)$ のヘテロダイン周波数で検出される。本システムの特長は、ヘテロダイン検波法を用いることにより、低周波(ヘテロダイン周波数)で距離情報を持つ光信号位相を測定できることである。したがって、光電検出の測定感度が高くなるとともに、位相の検出にはロックインアンプを用いることができる。 f_1 と f_2 の変・復調用電気信号の混合により参照信号を得て光信号との位相差を測定した。

4. レーザー干渉計との比較実験

開発した光波距離計の測定位相と距離変位間の直線性評価実験を、計量研究所光学トンネル内および光学トンネル上(屋外)で行った。光学トンネルは全長 310m の光学実験用半地下トンネルで、大気ゆらぎ、温度変化などの環境条件が非常に安定していることを特徴とする。光学トンネル内において、距離計から反射鏡までの距離約 250m において 50m 長の移動台を用いて実験を行った。反射鏡移動距離の測定にはレーザー干渉測長計を用いた。測定される位相 Φ は(1)式を変形すると、

$$\Phi = 2\pi \times (2fL/c - N) \quad (6)$$

によって表される。実験では、変調周波数 f を 3.5GHz とした。したがって反射鏡移動距離 D (L の変位) が約 42.8mm になると、位相 Φ が 2π 回転する。ヘテロダイン周波数は 50kHz とし、NF 社製ロックインアンプ (5610 B) を用いて位相を測定した。本実験系では、 50kHz 付近での信号対雑音比 (SN 比) 40dB を得て、位相計積分時間を 100ms とした。

Fig. 5 に 86mm の区間を 1mm 間隔で反射鏡の移動と位相測定を繰り返し行った往復 173 点の測定結果を示す。また、Fig. 6 に(4)式で表される直線からの測定値の偏差を示す。光速 c を決定するための空気屈折率は、 CO_2 濃度 0.04% の乾燥空気として、温度: 17.5°C 、気圧: 1025hPa 、湿度: 約 50% (共に測定値) で Edlén の式を群屈折率用に修正して計算した⁹。Fig. 6 に表されるような偏差は、変調周波数 f により決定される正弦波関数の和によって近似される。このような偏差は一般に周期誤差(サイクリックエラー)と呼ばれ、次式により表される。

$$\begin{aligned} \Delta E = & A_1 \times \sin \{1 \times 2\pi D / (c/2f) + \Phi_1\} \\ & + A_2 \times \sin \{2 \times 2\pi D / (c/2f) + \Phi_2\} \\ & \vdots \\ & + A_m \times \sin \{m \times 2\pi D / (c/2f) + \Phi_m\}. \end{aligned} \quad (7)$$

ここで ΔE は直線からの偏差、 m は自然数、 A_m 、 Φ_m は装置によって決まる定数である。この周期誤差は、測定信

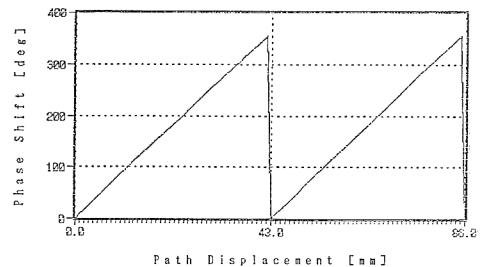


Fig. 5 Linearity of the distance meter from about 250meter length.

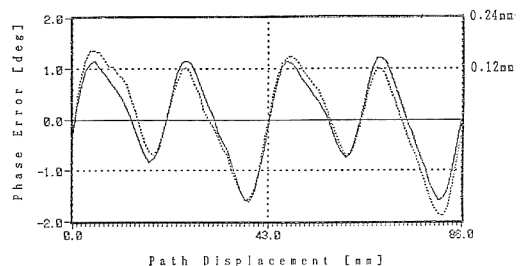


Fig. 6 Deviations from linear phase shift.

号に介入する光学的クロストーク、電気的クロストークなどにより発生する装置固有の誤差と考えられる。本システムによる測定結果において、1次～4次($m=1\sim4$)の周期誤差を計算的に補正した結果を Fig. 7 に示す。この結果から、周期誤差補正後の残差が ± 10 数 μm 程度となることがわかる。また、直線からの標準偏差を分解能とすると、約 $7\mu\text{m}$ の分解能が得られることとなる。

屋外では、レーザー干渉測長計のかわりにマグネスケールを用いて距離250mにおいて、測定位相と距離変位間の直線性評価を行った。Fig. 8 に位相計積分時間1s、平均回数20回の測定結果を示す。屋外では大気ゆらぎや背景光の影響を大きく受けるため、SN比が15dBと光学トンネル内での実験と比較して25dB程度低下した。したがって、ゆらぎの影響を解消するためには、数十秒の平均化が必要となる⁵⁾。

5. 考 察

高い測長分解能を得るためには、(3)式より、①変調周波数を高くすること、②位相読み取り分解能を高くすること、が必要となる。本システムでは光導波路型変調器を用いることで①を実現した(変調周波数約3.5GHz)。②を決定する要因としては、変調光信号の位相の分布などがあげられるが、単一モード光ファイバとロックインアンプを利用することで、これを解決した。

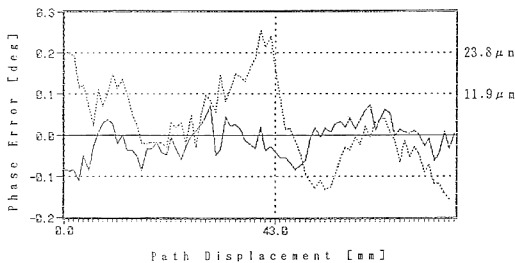


Fig. 7 Phase errors after compensating systematic cyclic errors.

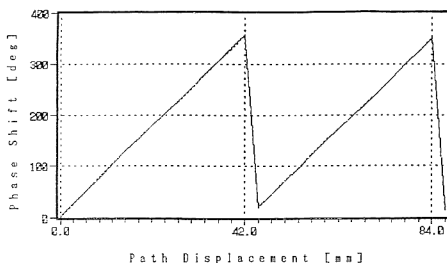


Fig. 8 Linearity of the distance meter in the field from about 250 meter length.

一般にバルク型の電気光学変調器では、結晶内での変調電気信号の電界分布が一様ではないことにより、変調光信号の位相の空間的分布が発生する。しかし光波を単一モード光導波路へ導波すると、電界分布による位相変化の問題を解決することができる。この際、大気によるレーザービームのゆらぎにより、単一モード導波路へ結合される光量の変動(強度ゆらぎ)が幾分か大きくなるが、ロックインアンプの平均化効果の利用によって解消される。つまり本システムで高い分解能が得られたことは、光導波路変調器の利用により②の効果と同時に得られたためと考えられる。

中距離領域(250m)での評価結果から、距離計の光源の波長として $1.3\mu\text{m}$ を応用することが可能であることが示された。一般に、大気中ではこの波長領域は水蒸気により吸収されると考えられていた。しかし、実際に $1.3\mu\text{m}$ の半導体レーザーを大気中で伝搬させたところ、距離250m(往復500m)においても吸収がほとんどないことがわかった。これは水蒸気の吸収スペクトルが連続的なものではなく、離散的であることによるものと考えられる。

6. ま と め

以上、光源に波長 $1.3\mu\text{m}$ の半導体レーザー、変・復調に光導波路型変調器を用いたヘテロダイナ方式で、測定信号をロックイン検出することにより、高周波光変調法による従来技術をはるかに越えた距離計を開発し、250mまでの距離で $7\mu\text{m}$ という高い測距分解能を得た。また、光ファイバーなど光学部品での反射低減、変・復調用電気信号のマイクロ波クロストークをシールドなどにより低減していくことで、周期誤差の問題を解消し、高精度化を実現する見通しが得られた。

本研究は、科学技術庁振興調整費による国際流動基礎研究「レーザ精密測距の高度化に関する研究」(期間:88年4月～91年3月)の中で行った。

文 献

- 1) 松本弘一: “最近のレーザー干渉測長機”, 計量管理, **38** (1989) 758-763.
- 2) 藤間一郎: “光波精密測距儀の現状”, 光技術コンタクト, **27** (1989) 733-740.
- 3) J. M. Rieger: *Electronic Distance Measurement*, 3rd ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1990) pp. 14-18.
- 4) R. Muijlwijk: “Update of the Edlén formulae for the refractive index of air,” *Metrologia*, **25** (1988) 189.
- 5) 松本弘一: “測距用干渉計の最適ビーム径”, 光学, **14** (1985) 279.