

長距離用トランスポンダ 2 色距離計

Two-Color Distance Meter of Transponder Method

for Long Distance Measurement

藤間一郎、○瀬田勝男、松本弘一、大石忠尚

Ichiro FUJIMA, Katuo SETA, Hirokazu MATSUMOTO and Tadao O'ISHI

計量研究所

National Research Laboratory of Metrology

A optical distance meter of transponder method has been developed to measure long distance of over ten kilo meters. The light source consists of two lasers, 633 nm He-Ne and 1.06 μm Nd:YAG, to correct the refractive index of air. The distance of about 18 km was measured between National Research Laboratory of Metrology and Mt.Tsukuba.

1. はじめに

長距離の標準を設定し、GPS、SLRなどの手法による距離測定の信頼性を向上させ、また、地殻変動の測定や地震の予知に役立つため、高精度長距離測定装置を開発した。長距離を安定に測定するために測定距離の両端に置いた光源から双方向にレーザービームを飛ばすトランスポンダ方式を採用し、また、大気屈折率の補正を高精度で行うために 2 色で測定を行っている。

2. トランスポンダ法による測定

トランスポンダ方式の距離計は主局と従局により構成され、それぞれに光源と受光器が置かれる。その概要と信号の流れを Fig.1 に示す。両局においてRb発振器からの 10 MHz (f) 基準信号を逡倍して変調及び復調信号を発生させ、同時に基準信号を分周してヘテロダイン検出の参照信号を得ている。変調信号は主局で 1 GHz ($M \cdot f$) + 25 kHz (f/N)、従局で 250 MHz、一方復調信号は、主局で 250 MHz + 6.25 kHz、従局で 1 GHz であり、それぞれが電気光学変調器(EOM)を駆動させるために使用される。EOM は高さ 1.3 mm、幅 1.0 mm、長さ 25 mm のLiTaO₃ 結晶製の進行波型偏光変調器であり、ペルチエ素子により温度制御された金属容器内に置かれている。半波長電圧はおよそ 110 V で 1 GHz まで平坦な周波数特性を持っている。この EOM により変復調された光を検出し、ヘテロダイン周波数 25 kHz 及び 6.25 kHz での位相を測定することにより距離 D を求める。このとき問題になるのは両局 Rb発振器間の周波数差 $\delta f(t)$ であり、発振器のゆらぎのため時間の関数となる。両局から発射される He-Ne レーザ光の変調信号を、振幅を無視して

$$\text{主局: } \cos\{2\pi(M \cdot f + f/N) \cdot t\} \quad (1), \quad \text{従局: } \cos[2\pi(M/4) \cdot \{f + \delta f(t)\} \cdot t] \quad (2),$$

と表すと、復調器へ入射する光信号は、波長 633 nm での見掛け上の距離を D_1 として

$$\text{主局: } \cos[2\pi(M/4) \cdot \{f + \delta f(t)\} \cdot t - 2\pi(M/4) \cdot \{f + \delta f(t)\} \cdot D_1/c_0] \quad (3),$$

$$\text{従局: } \cos[2\pi(M \cdot f + f/N) \cdot t - 2\pi(M \cdot f + f/N) \cdot D_1/c_0] \quad (4),$$

となる。ここで c_0 は真空中光速である。これに対して復調器を駆動する信号は

$$\text{主局: } \cos\{2\pi\{M \cdot f/4 + f/(4N)\} \cdot t\} \quad (5), \quad \text{従局: } \cos[2\pi M \cdot \{f + \delta f(t)\} \cdot t] \quad (6),$$

また、復調後のヘテロダイン周波数における位相測定用の参照信号は

$$\text{主局: } \cos\{2\pi f \cdot t/(4N)\} \quad (7), \quad \text{従局: } \cos[2\pi\{f + \delta f(t)\} \cdot t/N] \quad (8),$$

であるから、最終的に測定されるヘテロダイン信号の位相 ϕ は

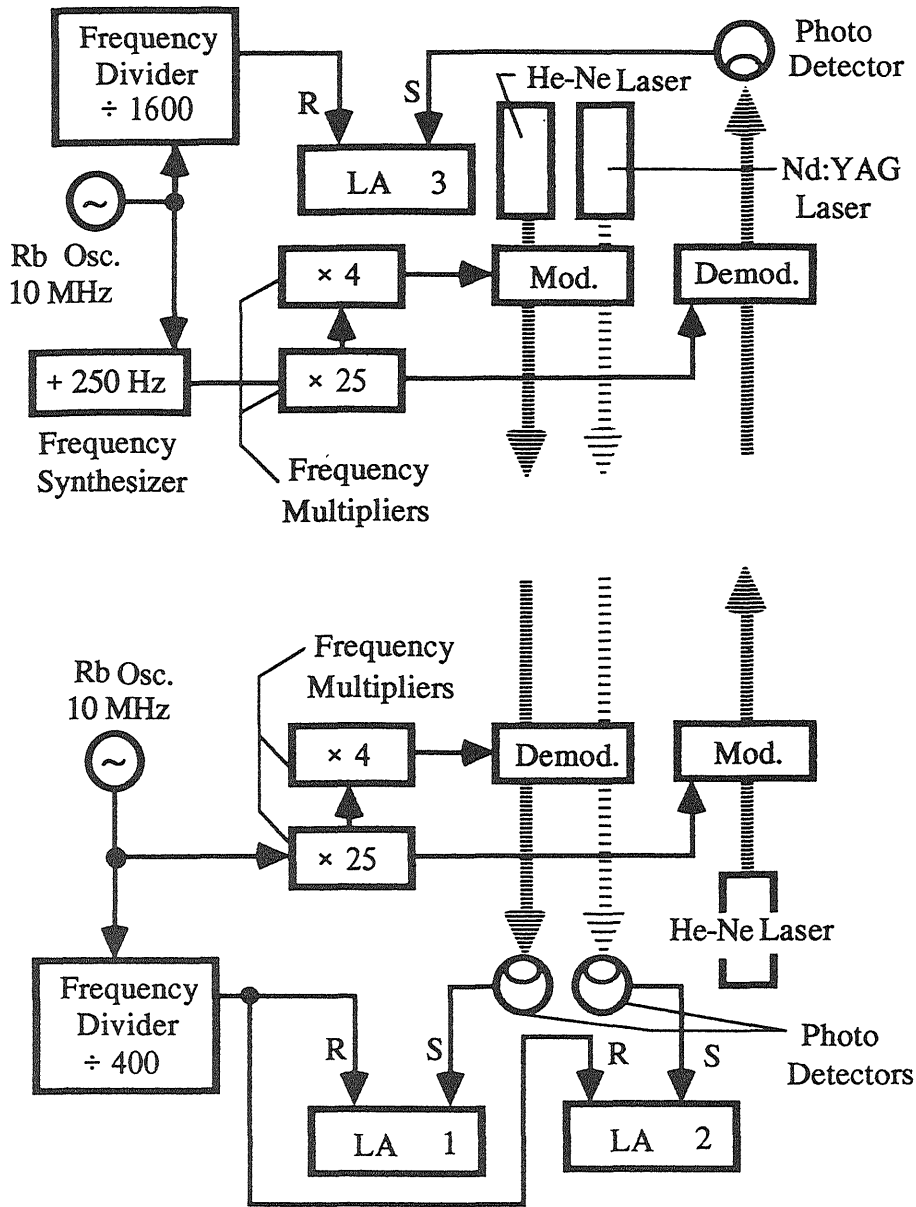


Fig.1 Signal flow for the apparatus: R & S, reference & measured signal in phase measurement; LA, lock-in amplifier; Mod., optical modulator; Demod., optical demodulator.

$$\text{主局: } \phi_A = -2\pi(M/4) \cdot [\int \delta f(t) dt - \{f + \delta f(t)\} \cdot D_1/c_0] - 2\pi K_A \quad (9),$$

$$\text{従局: } \phi_{B1} = -2\pi(M + 1/N) \cdot [\int \delta f(t) dt + f \cdot D_1/c_0] + 2\pi K_{B1} \quad (10),$$

となる。ただし K_A, K_{B1} は整数部で、変調周波数を変えての測定等により決定される。(9), (10) 式は角速度 $-2\pi(M/4) \cdot \delta f(t)$ (主局)、及び、 $-2\pi M \cdot \delta f(t)$ (従局) で回転する位相信号が両局で観測されることを示している。周波数シンセサイザにより、 $\delta f(t)$ は 1 mHz ステップで調整可能であるためその最大値は 0.5 mHz であり、位相回転の周期は最短でも 20 秒となって、位相測定の精度に大きな影響はない。また、Rb発振器の安定度を考慮すると $f \times 10^{-9} > \delta f(t)$ であるから(9)式下線の項は無視できる。さらに、

$$4\phi_A - \phi_{B1}/(1 + 1/MN) = 4\pi M \cdot f \cdot D_1/c_0 - 2\pi\{4K_A + K_{B1}/(1 + 1/MN)\} \quad (11),$$

により $\int \delta f(t) dt$ の項も消去されることから、

$$D_1 = \{c_0/(2M \cdot f)\} \cdot [\{4\phi_1 - \phi_2/(1 + 1/MN)\}/2\pi + K_{AB}] \quad (12),$$

となり、光学的距離 D_1 を求めることができる。 K_{AB} は(11)式第2項{ }中の整数で短時間の測定ではほぼ定数として処理できる。

3. 2色法による屈折率補正

2波長を用いて屈折率の補正を行うとき、幾何学的距離を D 、各波長での群屈折率を n_{G1}, n_{G2} とすると、各波長での光学的距離は $D_1 (=n_{G1}D)$ 、 $D_2 (=n_{G2}D)$ となる。このことから

$$D = D_1 - A(D_1 - D_2), \quad A = (n_{G1} - 1)/(n_{G1} - n_{G2}) \cong (n_{G1S} - 1)/(n_{G1S} - n_{G2S}) \quad (13),$$

となって幾何学的距離 D が求められる。ただし添字 S は標準状態での値を示している。 A は一般に A 係数と呼ばれ、波長の組み合わせにより様々な値となる。しかし大気状態の変化に対してはほとんど定数となるため(13)式の近似が成立し、屈折率補正された D を求めることができる。この装置のように633 nm (He-Neレーザ)、1.06 μ m (Nd:YAGレーザ)の2波長を用いたときの A 係数は約36となり、 $D_1 - D_2$ の測定分解能を δD_{12} とすると最終的な測定誤差 δD は $36 \cdot \delta D_{12}$ となる。このため $D_1 - D_2$ の測定には高い分解能が要求され、1 GHzという高い周波数を用いる必要が生じる。しかし距離そのものでなく2色間の差を測定すればよいことから、片側(主局⇄従局)光路のみの測定で十分であり、Nd:YAGレーザ変調光の位相として

$$\text{従局: } \phi_{B2} = -2\pi(M + 1/N) \cdot [\int \delta f(t) dt + f \cdot D_2/c_0] + 2\pi K_{B2} \quad (14),$$

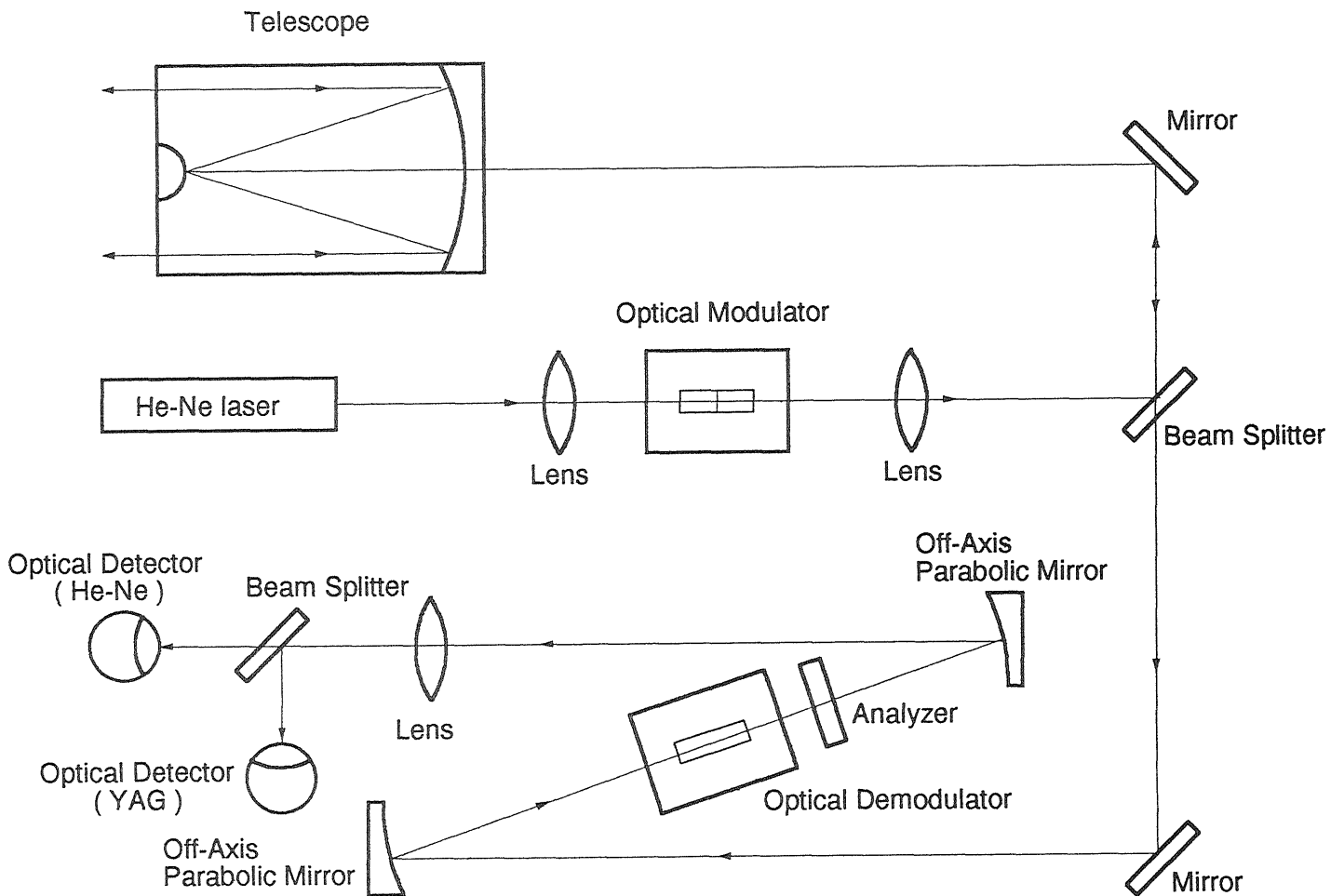


Fig.2 Optical system at Mt. Tsukuba

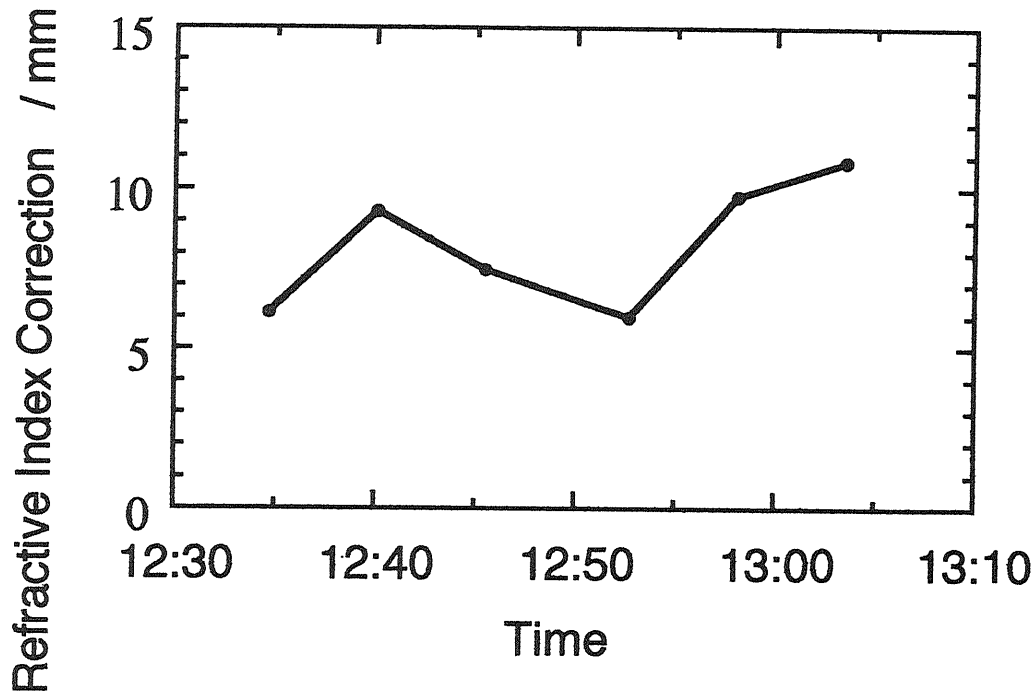


Fig.3 Results of 18 km measurement on Nov.21 1991.

が測定できれば

$$D_1 - D_2 = [c_0 / \{2(M + 1/N) \cdot f\}] \cdot \{(\phi_{B2} - \phi_{B1}) / 2\pi + K_{12}\} \quad (15),$$

となり、変調波長 $c_0 / \{2(M + 1/N) \cdot f\}$ に対応した高い分解能で $D_1 - D_2$ を求めることができる。

4. 測定結果

主局を計量研究所5階に、従局を筑波山中腹の京成ホテル2階に設置し、両局間の距離およそ 18 km を昨年10月から本年1月にかけて測定してきた。従局の光学的配置を図2に、11月21日12:30 ~ 13:10における測定の結果 $A(D_1 - D_2)$ を図3に示す。測定時間5分間での標準偏差がおよそ 1 mm で、これが屈折率補正のランダム誤差を示している。ただしこの補正法自体が持つ系統誤差や屈折率分布等の影響もあるため、最終的な誤差は幾分増加し、3 mm 程度と見込まれる。図のプロットは屈折率の変動を示しており、30分間に約 5 mm、距離に対して 3×10^{-7} に相当する変化があったことが示されている。