



長距離測定における大気屈折率の 2 色補正

藤間 一郎・松本 弘一・瀬田 勝男・大石 忠尚

計量研究所量子部 〒305 つくば市梅園 1-1-4

(1992年5月22日受付, 1992年9月25日受理)

Two-Color Correction for the Atmospheric Refractive Index in Long Distance Measurement

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

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

(Received May 22, 1992; Accepted September 25, 1992)

Correction for the atmospheric refractive index is important in order to measure long distance accurately by optical distance meters. Two color method was utilized to obtain the average refractive index through a long optical path of 18 km. Two laser beams of 633 and 1064 nm wavelengths were modulated by a LiTaO₃ crystal simultaneously at 1 GHz, and then the difference between two phase delays of the modulated laser beams was measured by a two-way method. The results show that the air refractive index can be determined with a standard deviation of 0.13 ppm.

1. はじめに

近年, 地震予知や測地等のために, 10 km を越える長距離を高精度で測定することが求められている. このような長距離を測定する方法としては, GPS (global positioning system)¹⁾, VLBI (very long baseline interferometer)²⁾, SLR (satellite laser ranging)³⁾ 等の宇宙を利用した測地法以外に, 光波距離計を用いる方法がある. GPS や VLBI を用いる方法は, 主に距離分解能と大気屈折率の補正量の点から, 測定される距離に関係なく, 絶対測長誤差がほぼ一定であると考えられる. これに対して光波距離計を用いた場合の誤差は, 装置の分解能による定数項と, 距離に比例した屈折率の補正項で表される. したがって相対測定誤差を考えると, 50 km を越える超長距離では GPS や VLBI が有利であり, 10 km 以下の距離においては光波距離計による測定でより高い精度が期待できる. 10~50 km の距離はその中間にあり, この領域で GPS や VLBI の性能を比較・評価するためにも, これらとは異なる方法である光波距離計の

開発は有意義である.

光波距離計を用いる方法の測距の精度は主に大気屈折率の補正精度で決定される. この大気屈折率の補正法としては, 光路に沿った数点で屈折率を気象センサーや真空干渉計によって離散的に直接測定する方法と多色の光源の分散特性から屈折率を求める多色法とがある. 数 km を超える長距離では光路に沿った屈折率の分布が無視できなくなり, 直接測定による補正の精度は 10^{-6} 程度が限界であるため⁴⁾, その意味では, 全光路の平均屈折率を算出することができる多色法が有利である. しかしながら多色法においては, 最終的な距離の目標精度に対して数十分の 1 という高い分解能で各色での光路長を測定することが要求され, GHz 帯の高周波で正弦波変調された光ビームの位相を測定して高い分解能を達成する手法がとられている⁵⁾. 一方, 信号強度の観点から考えると, 特に 10 km を越える距離では, 光パルスの往復時間測定法が正弦波変調法よりも有利である. しかしこの方法は分解能の制限もあり, 多色法での補正は 10~50 km の領域において高い精度の実現に成功していな

い^{6,7)}.

そこで、今回波長の異なる2種類の正弦波変調されたレーザー光を伝搬させ、光電検出された変調信号の間の相関を計算することによって信号の位相差を精密に求め、大気屈折率を算出した。また、10 km を越える長距離で信号強度を確保するために、1台のレーザーからのビームを1方向のみに伝播させるツーウェイ (2-way) 方式を採用した。

2. 測定原理

2.1 2色法

波長 λ_1 , λ_2 の変調光を用いて測定された光学的距離をそれぞれ D_1 , D_2 とすると、波長 λ_1 における大気屈折率 n_1 は、

$$n_1 - 1 = A(D_1 - D_2)/D \quad (1)$$

で表される。ここで、

D : 幾何学的距離の概略値

A : 大気屈折率の補正係数 (A 係数と呼ばれる)

である。 A は光源の波長 λ_1 , λ_2 の組み合わせによって決まる値であり、温度変化が 10°C 程度より小さい時はほとんど定数となり、

$$A = (n_{10} - 1)/(n_{10} - n_{20}) \quad (2)$$

で表される。ここで、 n_{10} , n_{20} はそれぞれ波長 λ_1 , λ_2 における標準状態の大気群屈折率である。最終的な屈折率 n_1 の決定精度はそれぞれの波長による光路長の測定精度に比べて A 倍悪くなることがわかる。また、 A を小さくするためには、 $(n_{10} - n_{20})$ の差を大きく、すなわち、 λ_1 または λ_2 のいずれかとして短波長の青色もしくは紫外域の光を用いることが有利である。しかし大気の散乱・吸収を考えると長い距離では短波長の光は減衰が大きいという問題点がある。以上を考慮して、本研究においては、光源として波長 633 nm の He-Ne レーザーと波長 1064 nm の YAG レーザーを選んだ。

大気分散特性に対してよく用いられる Edlén の式は位相屈折率を示している。これを群屈折率に変換して、上記波長の組み合わせによる A を計算した。工業標準状態 (気温 20°C , 気圧 1013.25 hPa, 水蒸気圧 13.33 hPa, CO_2 濃度 0.03%) の付近において A の値は約 36 となる。したがって、最終的な目標とする精度に対して、個々のレーザーによる測定はその $1/36$ という高い分解能で行う必要がある。そこで本実験においては、 LiTaO_3 結晶を用いて 1 GHz で動作する同一仕様の光変調器を2台製作し、それぞれの測定地点で光変調用、復調用として使用した。

2.2 2-way 方式

通常の光波距離計においては、発振器からの信号を用いて周波数 f で強度変調した光ビームを、距離 D だけ離れた位置にあるコーナーキューブ等の反射鏡で反射させ、この反射光を光電検出器により検出する。このとき光電検出器から得られる信号と発振器からの信号との位相差を ϕ とすると、幾何学的距離 D は、

$$D = (K + \phi/2\pi) \cdot (\lambda/2)$$

$$\lambda = c_0/(n \cdot f) \quad (3)$$

で与えられる。ここで、 λ は変調光の波長、 c_0 は真空中の光速、 n は大気屈折率、そして K は複数の変調周波数 f を用いることによって決定される自然数である。

このように、反射鏡を用いることによって、距離が決定されるが、長距離の場合、伝搬するレーザー光の強度が大気吸収・散乱により弱くなり、最後には十分な SN 比の信号が得られなくなる。特に日本のように、大気中に水蒸気が多く含まれる所では、10 km を越える長い距離を測定できる条件の良い日は極めて少ない。光強度は伝搬距離 $2D$ に対し減衰率を β として指数関数 $\exp(-2\beta \cdot D)$ で減衰するため、距離が長くなると、信号の SN 比が急速に低下し、測定精度も劣化する。

このため、発射された光ビームが片道のみ通過して受光される 2-way 方式が利用される。つまり、反射鏡の代わりに、出射側 (主局) と同様な装置 (従局) を配置し、伝搬して来るレーザー光を光電検出器で受光して、この信号と同期して、従局にあるレーザー光が変調され、主局に向かって出射される。このレーザー光を受光し、参照信号と位相を比較することによって距離が決定される。この場合には伝搬距離が $1/2$ となるため光信号の減衰は $\exp(-\beta \cdot D)$ となり、光を往復させる場合との信号強度比は距離の指数関数で増大して有利となる。大気が極めて透明と考えられる $\beta = 0.2 \text{ km}^{-1}$ 程度の場合でも、距離 18 km での往復光路と片道光路との場合の光信号強度減衰率は 0.00075 および 0.027 となり、1桁半ほど有利になる。霞がかかっているような場合は $\beta = 1 \text{ km}^{-1}$ 程度であり、片道での減衰率は 1.5×10^{-8} で SN 比の劣化は大きいものかろうじて測定可能である。しかし往復光路では 2.3×10^{-16} の減衰率となって測定は全く不可能となる。

このような 2-way 方式を採用すると測定システムは複雑で大きくなるものとなる。しかし (1) 式より明らかのように、最も高い分解能を必要とする測定は距離そのものではなく光路長の2色間の差 ($D_1 - D_2$) であり、

これのみを測定する場合にはある程度簡単なシステムですむ。本研究で用いたシステムの信号の流れを Fig. 1 に示す。特に同期させていない2台の周波数 f_s の基準発振器を両局で用いている。両局での周波数通倍次数を M 、従局における分周次数を N とし、主局においた周波数シンセサイザーにより $f_s/(MN)$ に相当する周波数差を与える。このとき2波長 λ_1, λ_2 の光ビームに対して変復調の周波数差は f_s/N となり同じ周波数の分周信号を基準として位相を測定することができる。このヘテロダイン周波数 f_s/N で測定される2位相 ϕ_1, ϕ_2 は、従局の基準発振器周波数の主局基準発振器周波数からの偏差を $\delta f_s(t)$ とすると

$$\phi_1 = -2\pi \left(M + \frac{1}{N} \right) \cdot \left\{ \int \delta f_s(t) dt + \frac{D_1 \cdot f_s}{c_0} \right\} + 2\pi K_1 \quad (4)$$

$$\phi_2 = -2\pi \left(M + \frac{1}{N} \right) \cdot \left\{ \int \delta f_s(t) dt + \frac{D_2 \cdot f_s}{c_0} \right\} + 2\pi K_2 \quad (5)$$

である。ここで K_1, K_2 は(3)式における K と同様の不定整数である。また、今回の測定における具体的な数値は、 $f_s=10$ MHz, $M=100$, $N=400$, $\delta f_s < 1$ mHz であった。(4), (5)式ともに周波数偏差 δf_s の積分項を

含んでいるために、回転する位相が観測される。しかし2位相の差から

$$D_1 - D_2 = \frac{c_0}{(M+1/N) \cdot f_s} \cdot \left\{ (K_1 - K_2) - \frac{\phi_1 - \phi_2}{2\pi} \right\} \quad (6)$$

となり、 $(D_1 - D_2)$ を求めることができる。 $(K_1 - K_2)$ は、2波長間の光路長差 $(D_1 - D_2)$ が標準大気の下で距離 18 km に対して高々 138 mm であることを考慮すれば $-1, 0, +1$ のいずれかであるため、そのうちの最適値として容易に決定できる。

3. 装置の設計と製作

3.1 光学系

Fig. 2 (a) に、計量研側 (主局) の光学系を示す。光源は、多縦モード He-Ne レーザー (UniPhase 社 1135 P: 波長 633 nm, 出力 10 mW) と単一縦モード YAG レーザー (Lightwave 社 120-03: 波長 1064 nm, 出力 40 mW) である。これらのレーザービームは、ビームミキサで光軸を揃えて混合され、偏光子 (グラントムソンプリズム) を通り、レンズで絞られて光変調器 (変調周波数; 1 GHz) に入射する。この光変調器は LiTaO₃ 結晶 (大きさは xyz 方向に、 $1 \times 25 \times 1.3$ mm³) を用いて作製されている⁹⁾。結晶の両端面 (xz 面) には、波長 633 nm と 1064 nm 用の無反射コートが施され、上下2面 (xy 面) には Cr-Au の電極が蒸着されている。電極は進行波動作となるように設計されており、入力コネクタから入ったマイクロ波は抵抗で終端される。この光変調器の電気光学結晶は自然複屈折の温度依存性のため変調のバイアス点が変化するので、これを防ぐためにペルチエ素子を用いて 1/100°C の分解能で変調器の温度を制御する。

このようにして変調された2色のレーザー光は、コーリメーターレンズを通った後、カセグレン式望遠鏡 (有効径 250 mm, 焦点距離 980 mm) に入り、直径 250 mm のビームで計量研究所6階建てビルディングの5階 (主局: 標高 28 m, 地上高 15 m) から出射される。大気中を伝搬した2色ビームは 18 km 離れた筑波山中腹2階建て建物の2階 (従局: 標高 540 m, 地上高 6 m) で受光される。Fig. 2 (b) に従局側の光学系を示す。ビームは計量研側と同タイプの望遠鏡で細くされた後、ミラーで折り返され、放物面鏡により光変調器に入れられて電気光学的に復調される。この場合、光学系の三次元配置により偏光面が回転するので、復調器を光軸の回りに回転させ、最適位置で固定した。さらに、検光子を経て放

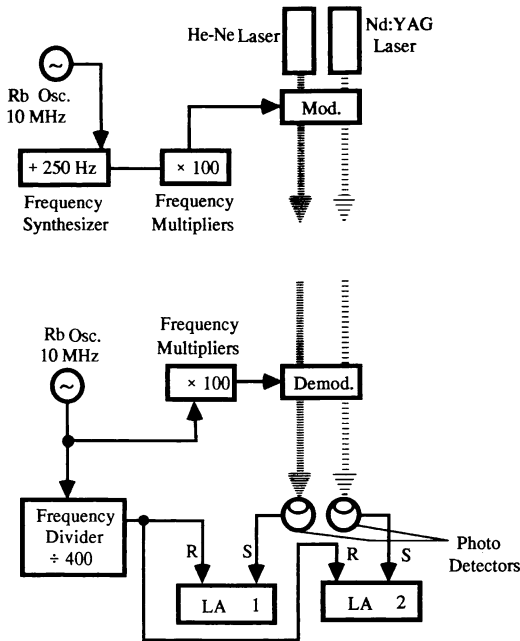


Fig. 1 Signal flow in the measurement system: LA, lock-in amplifier; Mod., optical modulator; Demod., optical demodulator; R, reference signal; S, measured signal.

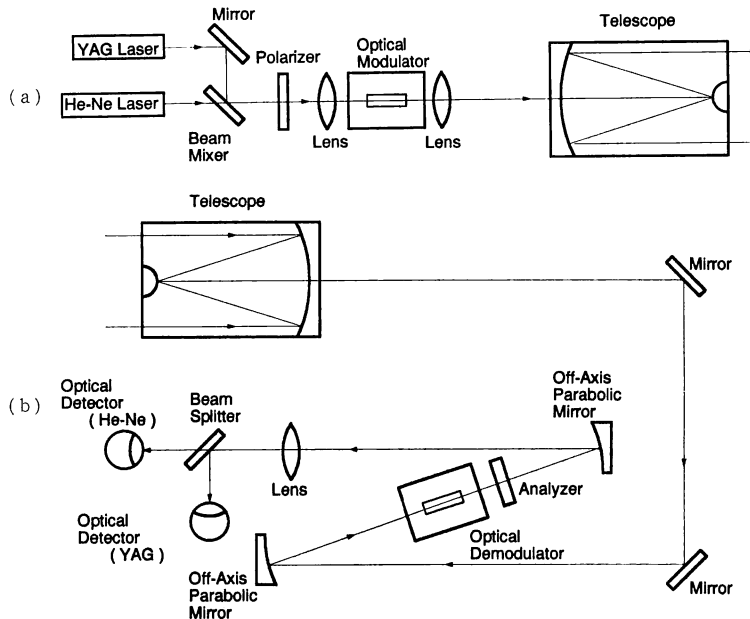


Fig. 2 Block diagrams of optical systems at NRLM(a) and at Mt. Tsukuba(b).

物面鏡でコリメートされた後、ビームスプリッターで波長分離されてそれぞれの光検出器 (New Focus 社: Model 2001) に入る。この光検出器は電流電圧変換、増幅、帯域通過フィルタの機能を内蔵しており実験では、増幅度 30000 倍、通過帯域 1~100 kHz に設定した。

3.2 電気系

Fig. 3(a), (b) にそれぞれ計量研, 筑波山における電気系のブロック図を示す。光変復調に用いる駆動信号発生用の基準信号としては、周波数 10 MHz の Rb 発振器 (NEC 社: Rb 3100 N, 周波数安定度: 数時間で 5×10^{-11} , 数ヵ月で 3×10^{-10}) を用いた。この基準信号は、100 倍の周波数逡倍器により 1 GHz に変換される。これをパワーアンプで 1 W に増幅して光変復調器に入力する。計量研側では、Rb 発振器の後に周波数シンセサイザー (HP 社: 3325 B) を挿入することにより 100 逡倍後の周波数が 1 GHz + 25 kHz となるように設定する。筑波山側では受信される変調波の位相が復調器において 1 GHz 信号とのヘテロダイン検波により 25 kHz の信号に移される。この信号は、Rb 発振器の 10 MHz を 400 分周することにより得られた 25 kHz を参照信号としてロックインアンプ (NF 社: 5610 B, 位相分解能: 0.1°) を用いて位相が測定される。この信号が、DAT レコーダー (TEAC 社: RD-101 T) に収録されると同時に FFT アナライザー (岩通社: SM 2701) でモニターされる。

3.3 データ処理系

ロックインアンプで測定された 2 波長の位相および振幅のデータは、DAT レコーダを用いて、サンプリング周波数 48 kHz, 垂直分解能 14 ビットで、4 チャンネル同時収録が行われ、パソコン (NEC: PC 9801 CV) により解析される。位相の測定分解能は 0.1° であるが、大気ゆらぎ等の効果により数度以上のばらつきを持った 2 系列の回転する位相データが得られる。信号振幅に関する 2 系列のデータは、大気ゆらぎの測定に用いられると同時に、ゆらぎにより信号がほとんど検出できないときの位相データを除去するために使用される。位相データは 2 波長間の差をとり、 $(K_1 - K_2)$ を調整して平滑化したのち、数分間の平均値をとって $(D_1 - D_2)$ を求め、(1), (2) 式により屈折率を算出する。

4. 大気ゆらぎに関する検討

測定に先立って大気ゆらぎの観測と検討を行った。Fig. 4 に屈折率測定とほとんど同じ時刻に FFT アナライザーで観測された 18 km 伝搬ビームの 50 Hz~50 kHz における周波数スペクトルの一例を示す。大気ゆらぎ測定のバンド幅は 50 Hz であり、この時の光検出器の通過帯域は DC~100 kHz に設定した。低周波領域で大きくなるバックグラウンド雑音は主に大気ゆらぎの影響によるもので、低周波領域から 2~3 kHz までは大気ゆらぎの理論で指摘されるようにほぼ周波数の $-8/3$

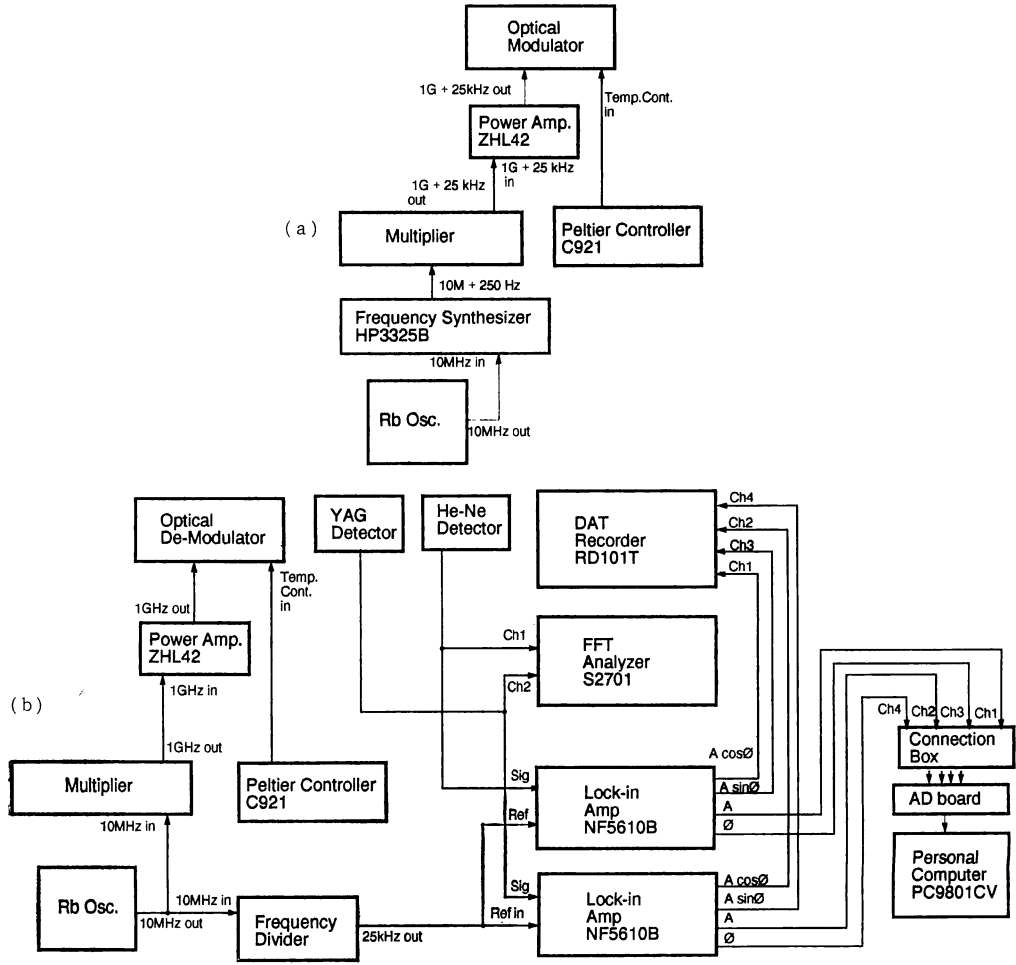


Fig. 3 Block diagrams of electric systems at NRLM(a) and at Mt. Tsukuba(b).

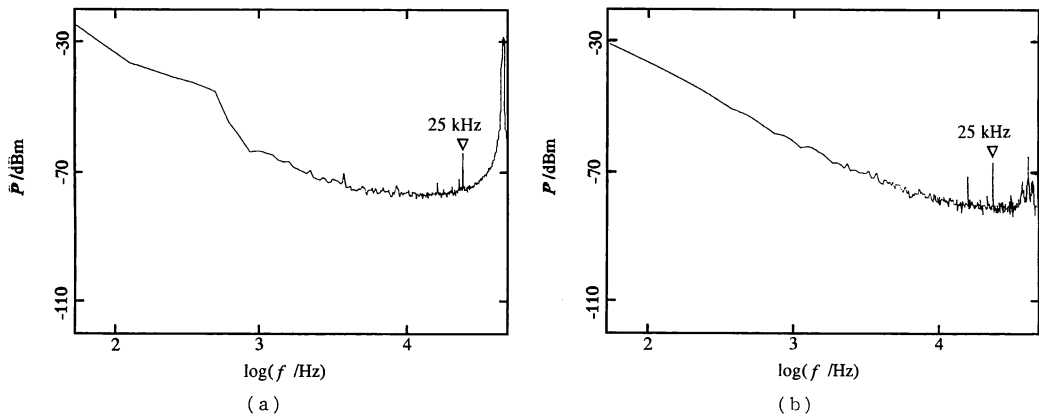


Fig. 4 Power spectra of air turbulence for He-Ne laser(a) and YAG laser(b).

乗則にしたがって減衰している。一方、約 2~3 kHz 以上の周波数領域では、主に測定系固有の雑音レベルが支配的と考えられる。大気ゆらぎによるノイズの影響を小さくするためには、ヘテロダイン信号として数 kHz 以上の周波数を選ぶ必要がある。そして、25 kHz におけるヘテロダイン信号の SN 比は、He-Ne レーザーで 12 dB, YAG レーザーでは 16 dB であることがわかる。

Fig. 5 は筑波山側の望遠鏡 (有効径: 25 cm) によって集光されたレーザービームのビデオカメラによる観測結果である。レーザービームは小さな領域に有効に集光されていることがわかる。しかしながら、この画像を時間的に表示すると、ビームの位置は大きく変化している。また、信号強度の変化データからも、大気条件によってはビームが集光用望遠鏡からはずれるほど大きくゆらぐことが示されている。しかし数秒から数分程度の短時間では、通常の大気条件のもとで 1 m を越えるビームの位置ゆらぎはほとんど起こらないことを考慮して、18 km 伝搬後の He-Ne レーザーのビーム径が約 1.5 m となるように送光用望遠鏡を調整した。このときの YAG レーザービーム径は約 3 m であった。より長い時間では屈折率分布の変動による 2 m を越えるビームの位置変化が起こる。特に日没時には、いったん 1~2 m ほどビームが下がり、その後完全に太陽が没した後、0.5~1 m ほど上方へ戻るといった変化を繰り返した。これは大気中の垂直方向の温度分布変化により説明がつく。この位置変動はビーム径に比べても大きいいため、特にこの時間帯での測定においては、レーザービームが受光用望遠鏡に入射するよう送光用望遠鏡の方向を約 20 分ごとに調整した。



Fig. 5 Beam pattern disturbed by air turbulence.

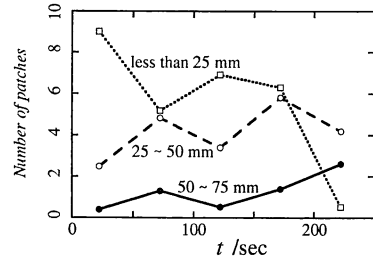


Fig. 6 Distribution of patch scales in disturbed beam patterns.

Fig. 6 は、ビームパターンに含まれるパッチ直径の頻度を示したものである。この直径は 10 cm 以下のものが支配的である。また、今回は長距離にわたっての風速の同時測定が行われていないため明確には言えないものの、このパッチ径の分布は時間的に変化しており、大気ゆらぎの理論からは直径と風速との負の相関が指摘されるところである。

5. 大気屈折率の測定

屈折率の測定は、距離測定の予備実験として、1991 年の 10 月から 11 月にかけて数回行われた。1991 年 11 月 21 日の 12 時 30 分から 13 時 10 分にかけて、行われた実験の結果を Fig. 7 に示す。縦軸は $A(D_1 - D_2)$ 、すなわち大気屈折率変動による距離補正分を表している。●でプロットされている $A(D_1 - D_2)$ の各点は 2 分 30 秒間のデータを平均することにより得られたもので、各データのばらつきは標準偏差で約 1 mm である。この結果はランダム誤差 30 μm 以内の精度で $(D_1 - D_2)$ が求められたことを示しており、約 1 GHz の変調周波数 (変調波長: $\lambda \cong 30 \text{ cm}$) に対して 0.04° ほどの高い分解能で測定ができたことになる。しかし、大気ゆらぎの影響で He-Ne レーザーと YAG レーザーの光路が厳密には一致しないこと、その結果として光復調器内で二つの

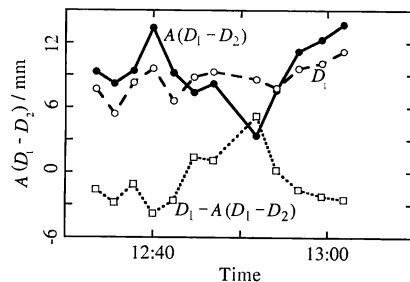


Fig. 7 Measured optical distance D_1 and its correction factor $A(D_1 - D_2)$ for the refractive index of air in the measurement of about 18 km.

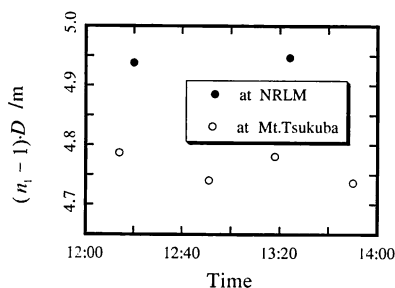


Fig. 8 Variation of the optical distance estimated from the air refractive index which is calculated from meteorological measurements.

レーザービームがわずかに異なった経路を通ること、ヘテロダイン検出の参照信号による周期誤差が存在すること、および、 A 係数が湿度に対して微妙な変化を示すため完全な定数とは言えない等の理由による系統誤差があるため、最終的にはこれより大きな測定誤差が生じる。

最終的な誤差を評価するには二つの方法がある。一つはこのような短時間においては2地点間の幾何学的距離が変化しないものと考え、 $\{D_1 - A(D_1 - D_2)\}$ により求めた幾何学的距離が変化する量を誤差とする方法であり、もう一つは気象条件の測定から求めた屈折率と比較するものである。前者による評価を行うため、2-way方式により同時に求めた D_1 の値、および、 $\{D_1 - A(D_1 - D_2)\}$ の相対的な変化を Fig. 7 中に示してある。この方法による変動の幅は ± 4.5 mm、標準偏差 σ は 2.4 mm であった。これは相対誤差に換算して σ が 0.13 ppm となり、気象補正の限界を越えたほぼ目標どおりの精度が得られた。また、計量研・筑波山の双方において気象測定を行い、Edlén の分散式を用いて屈折率 n_1 の変化を求めた。これを距離に換算して Fig. 8 に示す。測定時の天候は晴れであり、筑波山側建物屋上の測定で気温約 12°C、湿度約 37%、気圧約 963 hPa、そして風速が約 1 m/s であった。計量研側では、装置のある5階ベランダの測定で気温約 15°C、湿度約 54%、そして気圧が約 1023 hPa であった。この方法では測定の時間間隔が2色法の測定と比較して長く、また、光路の平均屈折率は求められないため参考程度の評価しかできないものの、筑波山側の測定時間内での屈折率変化の方向が、2色法の結果と定性的に一致している。

6. 結 論

2色のレーザー光を 1 GHz で変調して大気中の 18 km を伝搬させ、変調波の位相測定を行った。その結果、2色の位相差の測定値を、2分30秒間ごとに平均したところ、30分間の屈折率補正後の距離測定値の変動は ± 4.5 mm の範囲に収まった。また標準偏差は 2.4 mm であり、測定時間2分30秒に対して、空気屈折率補正後の測距精度として $\sigma = 0.13$ ppm が期待できる。

今後、測定精度の長期安定性を評価するため、数ヶ月間にわたる間欠測定を行うとともに、距離の微小変化に対する応答、絶対距離の算出を目的とした変調周波数を変化させた測定等を行う予定である。

本実験を行うにあたり、実験データの収集にご助力いただいた当所の本多徳行氏、実験当時千葉工業大学の学生であった齊藤晶氏および実験場所を提供していただいた筑波山京成ホテルに感謝いたします。

文 献

- 1) D. Dong and Y. Bock: "GPS network analysis with phase ambiguity resolution applied to crustal deformation studies in California," *J. Geophys. Res.*, **94** (1989) 3949-3966.
- 2) T. A. Clark, D. Gordon, W. E. Himwich, C. Ma, A. Mallama and J. W. Ryan: "Determination of relative site motions in the western United States using Mark III Very Long Baseline Interferometry," *J. Geophys. Res.*, **92** (1987) 12741-12750.
- 3) D. E. Smith, R. Kolenkiewicz, P. J. Dunn, M. H. Torrance, S. M. Klosko, J. W. Robbins, R. G. Williamson, E. C. Pavlis, N. B. Douglas and S. K. Fricke: "The determination of present-day tectonic motions from laser ranging to LAGEOS," *Lecture Notes in Earth Science*, **29**, ed. F. K. Brunner and C. Rizos (Spring-Verlag, Heidelberg, 1989) pp. 221-240.
- 4) 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.
- 5) K. B. Earnshaw and E. N. Hernandez: "Two-laser optical distance-measuring instrument that corrects for the atmospheric index of refraction," *Appl. Opt.*, **11** (1972) 749-754.
- 6) K. E. Im, C. S. Gardner, J. B. Abshire and J. F. MacGarry: "Experimental evaluation of the performance of pulsed two-color laser-ranging systems," *J. Opt. Soc. Am. A*, **4** (1987) 820-833.
- 7) 水島宣彦, 市江更治, 武市盛生, 竹島 晃, 小川一三, 粟科植久: "レーザーによる長距離測距技術", 第15回レーザーセンシングシンポジウム予稿集 (1992) pp. 139-140.
- 8) I. Fujima, K. Seta, H. Matsumoto and T. Oishi: "GHz traveling-wave optical modulator for precision distance measurement," *Proc. SPIE*, **889** (1988) 81-85.