



測距用干渉計の最適ビーム径

松本 弘一

計量研究所 〒305 茨城県新治郡桜村梅園 1-1-4

(1985年1月18日受理)

Determination of the Beam Sizes in Distance-Measuring Interferometers

Hirokazu MATSUMOTO

National Research Laboratory of Metrology,

1-1-4, Umezono, Sakura-mura, Niihari-gun, Ibaraki 305

This paper describes a clue of designing distance-measuring interferometers, which are not affected by atmospheric air turbulence. At first, optical phase fluctuations are measured in the usual experimental room, using a phase-locked interferometer. Using these results, the optimum geometrical sizes of the laser beams in the interferometer for length measurement are analyzed to be fairly small. On the contrary, the sizes are restricted by intensity fluctuations in the visible region and diffraction effects in the infrared region. Also, the averaging time in data processing is discussed for elevating the measuring accuracy.

1. はじめに

光波干渉を利用した測長法は高精度な測定が可能であることから多くの分野で利用されているが、このような測定は大気中で行なわれるのが普通である。この場合、大気の位相ゆらぎが重要な要因となる。なぜなら、大気の位相ゆらぎによって干渉縞パターンが乱れ、コントラストが低下するからである。とりわけ、最近増えている生産現場のような環境の悪い所で使う干渉計や長い寸法を測定するための干渉計を設計する場合に、この大気の位相ゆらぎは重要な問題となっている。このため、位相ロック型の干渉計を用いて、大気の位相ゆらぎを測定した。この結果をもとに、測距用干渉計の設計の指針について検討したので、これらの結果に関して記述する。

2. 大気の位相ゆらぎ

2.1 ゆらぎ

光が大気中を伝播する場合、大気によってその光はゆらぎを受ける^{1,2)}。このゆらぎは大きく分けて、強度ゆらぎと位相ゆらぎに分類される。このうち、前者は干渉計のように比較的光路長の短い場合においてはほとんど問

題とならない。一方、後者は重要である。これは、また、位相の変動と位相面のひずみの二つの要因に分類される。ここで大きな問題となるのは後者の位相面のひずみである。なぜなら、このひずみによって干渉縞パターンが乱れるので、干渉縞のコントラストが低下し、最後には干渉縞が観測できなくなるからである。このひずみを解消するには干渉計のビーム径をできるだけ小さくすればよいわけであるが、ビーム径が小さいと強度ゆらぎや機械的振動によって、ビームがダンシングするので、干渉ビームがビームスプリッターで重なり合わなくなる。また、小さいビーム径においては、回折による光量の損失や干渉縞のコントラストの低下が生じる。これに対し、前者の位相の変動のバイアス的な項は、ひずみの項よりも大きいけれども、干渉縞パターンを変形させないので、干渉縞の位相の測定を不可能にしたり、ミスカウントさせることがあまりない。

2.2 実験

Fig. 1 は、大気の位相ゆらぎを測定するための実験系である³⁾。0.63 μm He-Ne レーザービームは拡大された後、遠方にある反射鏡に向かい、これからの反射光がレーザー光源の近くに戻ってくる。この反射光は二つ

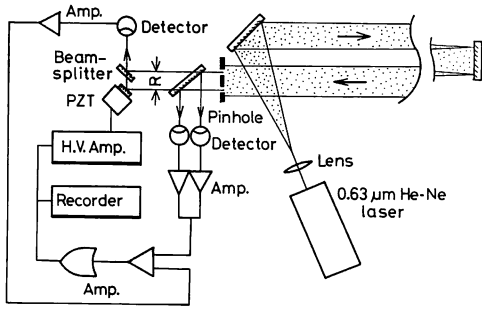


Fig. 1 Experimental set up for measuring the optical phase fluctuations.

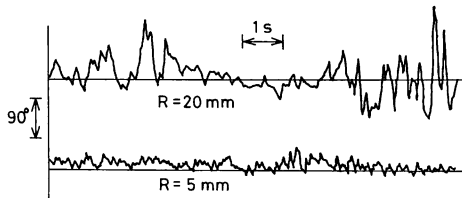


Fig. 2 Typical charts of the optical phase fluctuations, taken at each of two spacings, R=5 and 20 mm.

の小さな穴 (約 2 mm^φ) のあいたスクリーンによって遮られ、二つの細いビームとなる。一つのビームは直接にビームスプリッターに向かい、もう一つのビームは電歪素子 (PZT) に取り付けられた反射鏡を経た後に、ビームスプリッターに入射し、干渉する。得られる干渉縞を光電検出し、干渉縞の位相が一定になるように干渉縞信号を利用して干渉計が制御される。つまり、大気のゆらぎによって二つのビームの間に位相差が発生すれば、誤差信号が発生し、位相差を解消するように PZT によって反射鏡の位置が制御される。したがって、この誤差信号をモニターすれば、位相ゆらぎ量がわかる。なお、強度ゆらぎの影響を小さくするために、スクリーンの後にビームスプリッターを置き、それぞれのビームの強度をモニターし、干渉縞信号から差し引いた。この制御系の周波数応答は約 300 Hz である。

Fig. 2 は記録された位相ロック型干渉計の誤差信号のチャート図である。発熱物体の少ない室内において、光路長が 10 m のときに得られたものである。ここで、R はビーム間隔を示し、縦軸は換算された位相を示す。位相ゆらぎの解析は、低周波数領域では記録されたチャート図から位相ゆらぎ量を読み取って、計算機を用いて行ない、高周波数領域では、スペクトラムアナライザー (HP 社製モデル 3528 A) を用いて行なった。

2.3 解析結果

光路長とビーム間隔を関数として位相ゆらぎを解析した結果、Clifford ら⁴⁾ が既に報告しているように、位相ゆらぎの標準偏差 σ_ϕ は

$$\sigma_\phi = kL^{1/2}R^{5/6} \quad (^\circ) \quad (1)$$

によって表わされることがわかった。ここで、 k は定数、 L は光路長 (単位: m) そして R はビーム間隔 (単位: mm) である。0.63 μ m He-Ne レーザーを光源とした場合、室内において k は 0.8 となる。

いま、干渉計におけるビームの大きさについて考えると、平均の位相ゆらぎ $\bar{\sigma}_\phi$ は、

$$\bar{\sigma}_\phi = \frac{\int I \sigma_\phi dA}{\int I dA} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 I はビームの断面の光強度分布を示す。半径が R の等強度分布の場合、平均の位相ゆらぎは $\bar{\sigma}_\phi = 0.67 kL^{1/2}R$ によって表わされる。また、強度分布が $1/e$ になる点が描く円の半径が R であるガウス型強度分布の場合、 $\bar{\sigma}_\phi = 0.57 kL^{1/2}R$ によって表わされる。ここで、簡単のために、位相ゆらぎはビーム間隔に比例するとした。この結果、強度分布がガウス型であるほうが、位相ゆらぎの影響が小さいことがわかる。したがって、レーザービームの場合には都合がよい。

なお、異なった波長に対しては、位相ゆらぎは $\sigma_{\phi,\lambda} = (\lambda_0/\lambda)\sigma_{\phi,\lambda_0}$ によって与えられるので、波長の大きさに逆比例する。したがって、波長の長い赤外線光源として用いることは、大気のゆらぎによる影響を小さくするのにかなり有効であることがわかる。

3. 干渉計の幾何学的設計

3.1 一般論

前節の位相ゆらぎの実験結果から明らかなように、干渉計における光路は短いほど都合がよい。つまり、Fig. 3 (a) に示すように、参照鏡はビームスプリッターの近くに置くのがよい。従来は、Fig. 3 (b) に示すように参照鏡がプローブ光路の中央部に置かれていた。これは

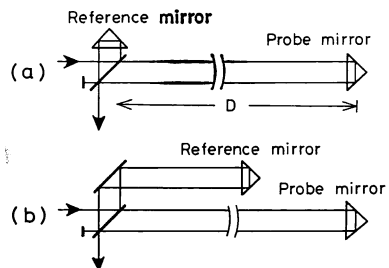


Fig. 3 Two kinds of interferometers.

おもに、光源の可干渉性と波長の安定性の悪さのためであると考えられる。しかしながら、最近ではレーザーの単一モード化および波長の高精度な安定化が実現され、簡単な内部鏡型安定化 He-Ne レーザーにおいても 2×10^{-10} の安定度が実現されている⁶⁾。これは、20 m の光路差の干渉計において、干渉縞の変動は約 1/150 フリンジに対応する。したがって、測定環境にもよるが、Fig. 3 (b) に示すように参照鏡を配置して、波長の安定度による影響を半分にするよりも、Fig. 3 (a) のように配置して大気のゆらぎの影響を小さくするほうが有効である。

3.2 干渉縞計数法

長いベッドと移動台を利用して、プローブ鏡の移動にともなって発生する干渉縞列を計数する方法においては、干渉縞のコントラストがゼロにならなければよいから、 $6\sigma_\phi < 90^\circ$ が満足されればよい。ゆえに、室内における実験から、 $D^{1/2}R < 37\lambda$ が導かれる。ここで、 D は干渉計の腕の長さ (単位: m)、 R はビームの半径 (単位: mm) そして λ は光源の波長 (単位: μm) である。

Fig. 4 は、光源を $0.63 \mu\text{m}$ He-Ne レーザーとした場合に、この条件式を図示したものである。可視域においては、強度ゆらぎ⁶⁾や機械的振動によるビームダンシングの影響が大きく、これによってビーム径を小さくすることが制限される。図において斜線の部分が最適のビーム径を示し、50 m 程度までを測定する干渉縞計数型干渉計を設計するには、ビーム径は 6 mm^ϕ 前後がよいことがわかる。なお、光源を $10.6 \mu\text{m}$ CO₂ レーザーとした場合には、 20 mm^ϕ のビームで D の値は 1.5 km となり、現実的に、大気のゆらぎの影響を無視してよく、光源の波長変動のほうが重要である。

3.3 合致法

多数のスペクトラムに対する干渉縞の端数のみを測定し、これらの端数値から得られる長さの組で合致を得る

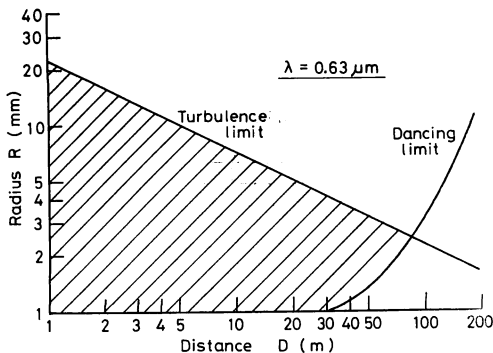


Fig. 4 Optimum regions for beam diameters in the fringe-counting interferometer.

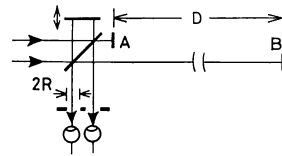


Fig. 5 An interferometer for the multi-wavelength interferometer.

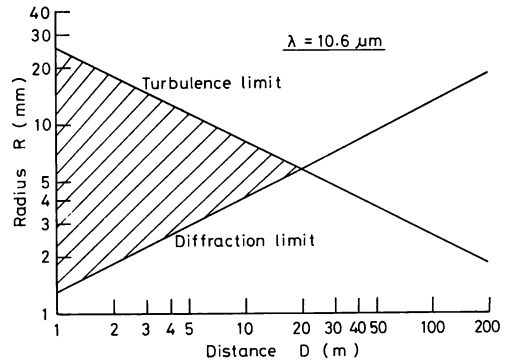


Fig. 6 Optimum region for beam diameters in the multi-wavelength interferometer.

ことによって、長さを決定する合致法においては、大気の位相ゆらぎに対する条件がさらにきびしくなる。これは、各波長に対する端数値から合致をとるときに、端数値に誤差を含んでいると、誤った合致をとるおそれがあるからである。Fig. 5 に示す干渉計において、位相ゆらぎに対する条件式としては、 $6\sigma_\phi < 6^\circ$ が要求される。したがって、 $D^{1/2}R < 2.4\lambda$ が得られる。ここで、光源として可視域では $0.63 \mu\text{m}$ と $0.61 \mu\text{m}$ He-Ne レーザーを考え、赤外域では $10.6 \mu\text{m}$ と $10.2 \mu\text{m}$ CO₂ レーザーを考える。Fig. 6 に、 $10.6 \mu\text{m}$ CO₂ レーザーに対する条件式を示す。光源が波長の長い赤外線である場合には、ビームダンシングの影響よりも、回折による光強度の損失や干渉縞のコントラストの低下のほうが重要である。Tango ら⁷⁾は、平面波に対して回折による光強度の損失を波長の関数として報告しているが、この損失を94%まで許容するとした。最適のビーム径は斜線をほどこした部分である。したがって、光源として CO₂ レーザーを用いてもこのような環境において、測長できる限界は約 20 m となる。可視光の場合は、このような大気のゆらぎ状態で測定することが不可能であり、カバーなどで干渉計をおおうことが必要である。

以上の結果は、多波長に対する干渉縞の端数を同時測定する場合に得られたものであり、これらの端数を時間において別々の時刻に測定する場合には、さらに、大気

のゆらぎの条件がきびしくなり、条件式は $6(\sigma_\phi + \sigma_e) < 6^\circ$ となる。つまり、大気のゆらぎのバイアス項 σ_e が入ってくる。これは、同時測定の際には多波長に対して同等に働くため、消去されるからである。一般に、 σ_e は σ_ϕ よりも大きく⁹⁾、合致法を用いて長い寸法を測定することはむずかしい。

これに対し、合成波長測長法⁹⁾は、比較的、大気のゆらぎに影響されない。これは、2波長を同時に2光束型の干渉計に入射させ、参照鏡を掃引したときの2波長による干渉縞信号を同時検出する。この信号を2乗した後、フィルタリングすれば、元の波長よりはるかに長い合成波長信号が発生される。この信号の位相を測定すれば、長さがわかる。したがって、この方法では合致をとる必要がないので、目標とする最終精度に見合う精度の測定でよい。したがって、要求される大気のゆらぎの条件式は、 $6\sigma_\phi < 45^\circ$ となる。これから、 $D^{1/2}R < 18.3\lambda$ が導かれる。Fig. 7は、 $0.63\mu\text{m}$ と $10.6\mu\text{m}$ の波長に対する最適のビーム径を示す。この図からわかるように、合成波長法を利用すれば、可視光を光源として用いても、かなり測長できる。赤外線を光源として用いる場合は、ビーム径を40mm程度にするのがよいことがわかる。

4. 干渉縞処理系の設計

一般に、測定値の精度を上げるためには、データを平均化するのが有効であるが、大気のゆらぎを平均化によって精度を上げることはそれほど簡単でない。著者らはすでに報告している³⁾ように、大気のゆらぎは熱気体のかたまりによって発生されるが、このかたまりの中ではコヒーレンスが保たれるからである。つまり、Fig. 8に示すように、位相ゆらぎの分散 D_ϕ は測定値の平均時間 τ にあまり依存しない。ここで、 R はビームの半径、 V は風速そして L_0 は熱気体のかたまりの最大の寸法である。 R/V の平均化時間までは、コヒーレント効果のため平均化効果がなく、これから L_0/V までは $\tau^{-1/3}$ に従って小さくなる。しかし、 L_0/V を越えるとランダムなゆらぎとなって、ゆらぎの分散は τ^{-1} に従って小さくなる。このように、ゆらぎの分散は風速に大きく依存する。地面から1mの高さ付近において、 L_0 は1m内外であるので、風速が1m/sの場合、 $L_0/V \approx 1\text{s}$ となり、平均化時間は数秒以上にする必要がある。カバーでおおわれた干渉計においては、風速が小さいのでゆらぎも十分小さいが、平均化効果がほとんどないことになる。

Clifford ら⁴⁾の式によれば、位相ゆらぎの自己相関ス

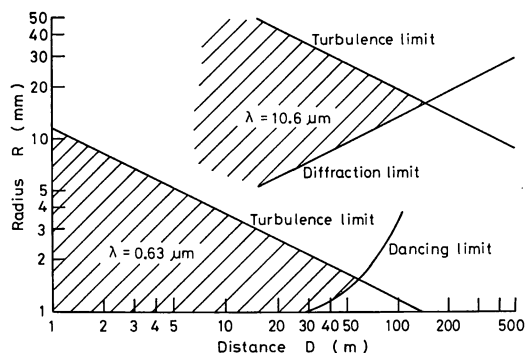


Fig. 7 Optimum region for beam diameters in the synthetic wavelength interferometer.

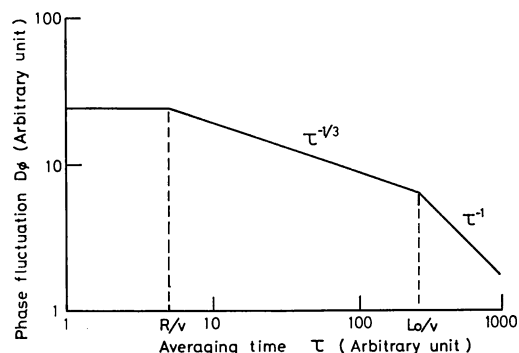


Fig. 8 Optical phase fluctuations as a function of averaging time.

ペクトラムは、風速が高くなると低周波領域のスペクトラムのパワーが小さくなり、かわりに、高周波領域のスペクトラムが大きくなる。したがって、干渉計のビームの断面方向の風速を上げれば、平均化効果が改良されると同時に低周波領域のゆらぎが小さくなる傾向にある。また、 L_0 を小さくすることも有効であり、このために、網を通して風を送ることが知られている。このような方法は、現場のような環境の悪い所において有効であろう。

5. ま と め

以上、測距用干渉計の最適ビーム径を決定するための指針について、測定した大気の位相ゆらぎをもとに記述したが、次のようなことが明らかになった。

- (1) 干渉計の参照ビームの光路は短いほどよい。
- (2) 数十mまでを測定するための干渉計ではビーム径が小さいほどよい。
- (3) しかし、可視域においてはビームダンシングなどのため、干渉縞計数法の場合 6mm^ϕ 前後のビーム径

が適当である。

(4) 一方、赤外域においては回折による損失のため、合成波長法の場合40 mm^φ前後のビーム径が有効である。

(5) データの平均化によって精度を上げるためには数秒間以上の積分時間が必要である。

終りに大気の位相ゆらぎの実験を一緒に行っていただいた国土地理院・塚原弘一氏に感謝申し上げます。

文 献

- 1) V. I. Tatarski: *Wave Propagation in a Turbulent Medium* (McGraw-Hill, New York, 1961).
- 2) R. L. Fante: Electromagnetic beam propagation in turbulent media. *Proc. IEEE*, **63** (1975) 1669.
- 3) H. Matsumoto and K. Tsukahara: Effects of the

atmospheric phase fluctuation on long-distance measurement. *Appl. Opt.*, **23** (1984) 3388.

- 4) S. F. Clifford, G. M. B. Bouricius, G. R. Ochs and M. H. Ackley: Phase variations in atmospheric optical propagation. *J. Opt. Soc. Am.*, **61** (1971) 1279.
- 5) 梅田倫弘, 築地光雄, 桂 卓史, 高崎 宏: 横ゼーマンレーザーの安定化制御, *光学*, **8** (1979) 279.
- 6) 末永直行, 平賀 隆, 原田武治: レーザー位置決め装置の応用. *東芝レビュー*, **26** (1971) 1259.
- 7) W. J. Tango and R. Q. Twiss: Diffraction effects in long path interferometers. *Appl. Opt.*, **13** (1974) 1814.
- 8) G. N. Gibson, J. Heyman, J. Lugten, W. Fitelson and C. H. Townes: Optical path length fluctuations in the atmosphere. *Appl. Opt.*, **23** (1984) 4383.
- 9) H. Matsumoto and S. Seino: Infrared two-wavelength interferometry for measuring long length. *Ann. CIRP*, **31** (1982) 401.