

J 4 正弦波状波長走査SLD干渉計による高精度な距離測定

村田憲彦* 佐々木修己** 鈴木孝昌**

*新潟大学大学院自然科学研究科 **新潟大学工学部電気電子工学科

1. はじめに

通常のレーザ干渉計では、光の伝搬距離を干渉により $0 \sim 2\pi$ の位相変化として検出するため光波長以上の光路差の変化を測定することはできない。光波長以上の光路差を測定するために複数の光波長を用いる多波長干渉法がある。本報告では、多波長干渉法の1つである波長走査干渉法において、光波長を時間的に正弦波状に走査する正弦波状波長走査干渉法を用いる。干渉信号の位相は時間的に正弦波状に変化し、その位相変調振幅 Z_b は光路差 L と波長走査幅 $2b$ に比例する。従って、位相変調振幅を検出することで波長以上の光路差の値 L_2 が得られる。このとき、測定感度は波長走査幅に比例するため、発振光スペクトル幅の広いスーパーミネッセントダイオード (SLD) を用い波長走査幅の大きな光源を構成する。また、干渉信号の位相の時間平均値は従来の干渉信号の位相 α であり、この値から波長以下の光路差の値 L_0 が得られる。この L_0 を L_2 と組み合わせることにより、波長以上の光路差を数 nm の精度で測定できる。

2. 正弦波状波長可変光源の構成

図1に正弦波状波長走査 SLD 干渉計を示す。SLD からの平行光は回折格子 G1 で回折され、その1次回折光をレンズ L2 でフーリエ変換すると、図2に示すような SLD の光スペクトラム分布がフーリエ変換面に得られる。ここで λ_0 は SLD の

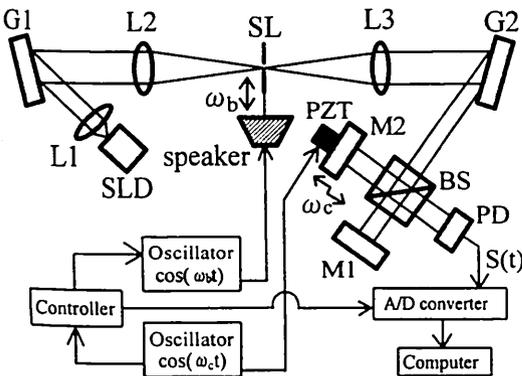


Fig.1. Experimental setup.

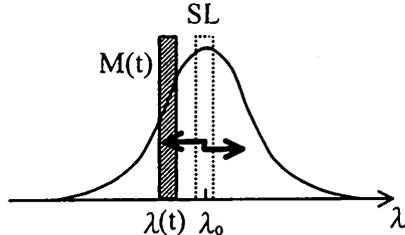


Fig.2. Continuous spectrum of a SLD and its filtering

中心波長である。スリット SL より特定の波長成分を取り出し、レンズ L3 で逆フーリエ変換する。この光場が回折格子 G2 で回折されると、すべての波長の1次回折光は等しい伝搬方向を持つ平行光となり、干渉計への入射光となる。

このとき、SL をスピーカにより角周波数 ω_b で正弦波振動させると、干渉計への入射光の中心波長は、 $\lambda(t) = \lambda_0 + b \cos \omega_b t$ となり、波長走査幅 $2b$ の光源が得られる。また、二重正弦波位相変調干渉法を用いるため、ミラー M2 を圧電素子 PZT により角周波数 ω_c 、振幅 a で振動させる。SLD の λ_0 の標準値規格値は 788.7nm であり、発振光スペクトラム幅の半値幅は約 20nm である。1200 本/mm の回折格子を G1 と G2 に用いた。変調周波数 $\omega_b/2\pi$ 、 $\omega_c/2\pi$ はそれぞれ、70Hz 及び 1120Hz とした。

3. 干渉信号と光路差の算出方法

ミラー M1 を測定物体とみなし、光路差を L とする。 $b < \lambda_0$ の時、干渉信号の位相変化は、 $\Psi(t) = 2\pi L / \lambda(t) = -2\pi [\Delta\lambda(t) / \lambda_0^2] L + (2\pi / \lambda_0) L$ である。また、波長走査による光源の強度変化を $M(t)$ 、干渉信号の可視度を V とすると、干渉信号は次式で表現される。

$$S(t) = M(t) + M(t) V \cos(Z_c \cos \omega_b t + Z_b \cos \omega_c t + \alpha)$$
 ここで、 $Z_c = (4\pi / \lambda_0) a$ 、 $Z_b = (2\pi b / \lambda_0^2) L$ 、 $\alpha = -(2\pi / \lambda_0) L$ である。2重正弦波位相変調干渉法¹⁾に従って、干渉信号 $S(t)$ を処理すると、 $\phi(t) = Z_b \cos \omega_c t + \alpha$ が得られ、 Z_b と α の値が求まる。比例定数 $2\pi b / \lambda_0^2$ が既知であれば、 Z_b より光路差が得られ、その値を L_2 とする。また、 α より得られる光路差を L_0 とする。 α は $-\pi$ から π の範囲で求まるので、 L_0 の値は $-\lambda_0/2$ から $\lambda_0/2$ の範囲となる。従って、光

路差 L は $L = m\lambda_0 + L_\alpha$ で与えられ、正の整数 m は、 L_2 の測定精度が $\lambda_0/2$ より高ければ、 $m_c = (L_2 - L_\alpha) / \lambda_0$ により得られる数値 m_c を四捨五入することによって決定される。このように、2つの測定値 L_2 および L_α を組み合わせることにより、波長以上の光路差を数 nm の高精度で測定することができる。

4. 波長走査幅 $2b$ と中心波長 λ_0 の決定方法

光路差変化の大まかな値が既知の場合、波長走査幅 $2b$ と中心波長 λ_0 を Z_b と α の測定値から求めることができる。ここで Z_b について、

$$Z_b = (2\pi b / \lambda_0^2) L = DL = (2\pi / \lambda_0) (1/C) L$$

という関係式を考える。今、一定の光路差変化 ΔL を順次与えるごとに測定値 Z_{bi} 、 α_i ($i=1 \sim N$) が得られたとする。これらの測定値より比例定数 D を求める。

また、 $C\Delta Z_{bi} = CZ_{b_{i+1}} - CZ_{bi}$ 、 $\Delta\alpha_i = (\alpha_{i+1} - \alpha_i) + 2\pi M$ とする。但し、 $-\pi < \Delta\alpha_i < \pi$ であるが、既知の光路差変化の値を考慮して定数 M を決定し、 $\Delta\alpha_i$ の値を求める。 $\Delta\alpha_i$ と $C\Delta Z_{bi}$ がすべての測定値に対して等しくなるように比例定数 C を最小二乗近似法で求めると $C = (\sum \Delta\alpha_i \Delta Z_{bi}) / (\sum \Delta Z_{bi}^2)$ となる。 D 、 C により、中心波長 $\lambda_0 = 2\pi / (CD)$ 、波長走査幅 $2b$ が得られる。また、 $m = (CZ_b - \alpha) / 2\pi$ により m が得られる。

5. 実験結果

微動台の上に固定されたミラーM1をマイクロメーターで移動させ、 $\Delta L = 1.0 \mu\text{m}$ 間隔で光路差変化を与え、 Z_b の値を求めた。

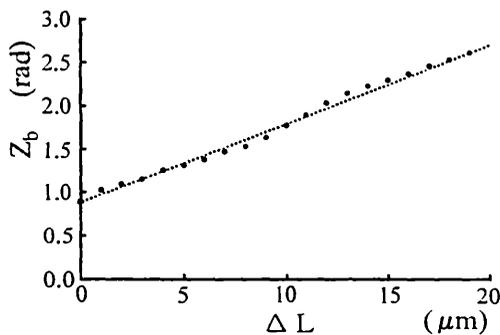


Fig.3. Values of Z_b measured for different values of change ΔL in L .

測定結果を図3に示す。これらの測定値に対して比例定数 D を求めた結果、 $Z_b = 0.093 \times L (\mu\text{m})$ の関係が得られた。また、比例定数 C は 86.6 であった。これらの値より $\lambda_0 = 787.8 \text{ nm}$ 、 $2b = 18.6 \text{ nm}$ が得られた。 Z_b の時間的な変動を図4に示す。こ

の結果により、光路差 L_2 の測定精度は $0.17 \mu\text{m}$ であることが分かる。この測定精度は $\lambda_0/2$ より高いので、2つの測定値 L_2 および L_α の組み合わせが可能である。表1に、 $\Delta L = 5 \sim 15 \mu\text{m}$ に対する測定結果を示す。数値 m_c の整数値 m からのずれは 0.4 以内であるため、整数値 m を決定でき、 L_α の測定精度により光路差 L を正確に求めることができた。 L_α の測定精度は 3 nm であった。 L_α の値の変動は機械的な振動の影響から生じている。ここで、 ΔL と実際に与えた光路差 ΔL_e の差は、マイクロメーターの読み取り誤差のためである。

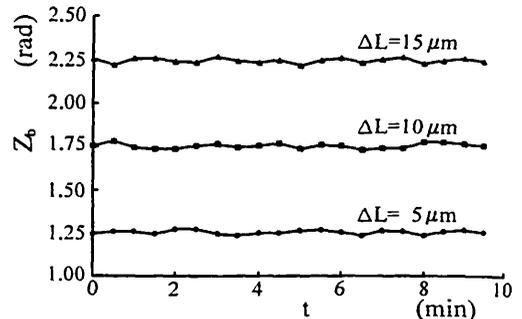


Fig.4. Variation of Z_b with time when $\Delta L = 5 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$ and $15 \mu\text{m}$.

Table 1. Experimental results about the measurements.

$\Delta L (\mu\text{m})$	$L_z (\text{nm})$	$L_\alpha (\text{nm})$	m_c	$L (\text{nm})$	$\Delta L_e (\text{nm})$
5	13429	-153	17.2	13240	762
6	14075	-149	18.1	14031	791
7	14771	-100	18.9	14869	838
8	15775	28	19.9	15784	916
9	16393	123	20.7	16667	883
10	17573	386	21.8	17717	1050
11	19040	79	24.1	18986	1269
12	20327	-161	26.0	20322	1336
13	21772	-283	27.9	21775	1454
14	23029	40	29.2	22886	1111
15	23896	326	29.9	23960	1074

6. むすび

SLDによる正弦波状波長走査光源を用いることで、 18.6 nm の大きな波長走査幅が容易に得られた。 L_2 の測定精度は $0.17 \mu\text{m}$ となり、測定値 L_2 と L_α の組み合わせにより、波長以上の光路差を 3 nm の精度で測定することができた。今後は、段差形状測定を行う予定である。

参考文献

- 1) O.Sasaki, T.yoshida, and T.suzuki, "Double sinusoidal phase-modulating laser diode interferometer for distance measurement", Appl. Opt.30,pp.3617-3621(1991).