

特別実験レポート
マッハツェンダー干渉計によるレーザー光源の周波数安定化

学籍番号 21576

矢幡洋

共同実験者

坂口聡志

2003年9月18日

目次

第 1 章	はじめに	6
第 2 章	実験の原理	7
2.1	光学系	7
2.1.1	マッハツェンダー干渉計の原理	7
2.2	制御系	9
2.2.1	ロックインアンプによる位相差検出	9
2.2.2	フィードバック制御	11
2.2.3	PID 制御	11
2.2.4	制御系の設計	12
2.2.5	レーザーダイオードによる位相差の制御	13
2.2.6	ペルチェ素子による位相差の制御	13
2.2.7	2-loop 制御による位相差の安定化	14
2.3	レーザー干渉計における雑音源	14
2.3.1	地面振動	14
第 3 章	実験の方法と結果	15
3.1	レーザーダイオード・フォトダイオードの基本特性	15
3.2	マッハツェンダー干渉計の特性	22
3.2.1	ビームスプリッタの分岐比の測定	22
3.2.2	マッハツェンダー干渉計の光学特性測定	22
3.3	ロックインアンプによる位相検出	23
3.4	制御による位相差の安定化	24
3.4.1	レーザーダイオードによる位相差の安定化	24
3.4.2	ペルチェ素子による位相差の安定化	26
3.5	校正	27
3.5.1	制御量の校正	27
3.5.2	ペルチェ素子によるアクチュエータの校正	29
3.5.3	レーザーダイオードの校正	32
3.6	2-loop 制御による位相差の安定化	35
3.7	フィルターの改良を行った 2-loop 制御による位相差の安定化	40
3.8	雑音源の評価	44
第 4 章	まとめ	48
	参考文献	
	謝辞	

目次

2.1	マッハツェンダー干渉計	7
2.2	ビームスプリッタ	7
2.3	マッハツェンダー干渉計	7
2.4	ロックインアンプ	9
2.5	ロックインアンプによる位相検出	9
2.6	レーザーダイオードによる位相差の制御	13
2.7	ペルチェ素子による位相差の制御	13
2.8	2-loop 制御による位相差の安定化	14
3.1	レーザーダイオード・フォトダイオードの基本特性測定	15
3.2	プリアンプ	15
3.3	Im-Vr 特性	16
3.4	Im-Pf 特性 (規格値)	17
3.5	Pf-Vr 特性	18
3.6	Rth-Vr 特性	19
3.7	T-Rth 特性 (規格値)	20
3.8	T-Vr 特性	21
3.9	ロックインアンプによる位相検出	23
3.10	アッテネータ	23
3.11	ローパスフィルタ	23
3.12	レーザーダイオードによる位相差の安定化	24
3.13	アンプ	24
3.14	加算アンプ	24
3.15	フィルター	25
3.16	フィルターの設計	25
3.17	ペルチェ素子による位相差の安定化	26
3.18	ペルチェドライバ	26
3.19	校正値の測定の設定	27
3.20	ペルチェ素子によるアクチュエータの校正	29
3.21	ペルチェ素子によるアクチュエータの校正	30
3.22	ペルチェ素子によるアクチュエータの校正 (位相特性)	31
3.23	レーザーダイオードの校正	32
3.24	レーザーダイオードの校正	33
3.25	レーザーダイオードの校正 (位相特性)	34
3.26	2-loop 制御による位相差の安定化	35
3.27	ペルチェ素子の制御系のオープンループ伝達関数測定 G_P	36
3.28	2-loop 制御系のオープンループ伝達関数測定 G_{LP}	36

3.29	オープンループ伝達関数 G_P, G_{LP}	37
3.30	ペルチェ素子の制御系のスペクトル測定 S_P	38
3.31	2-loop 制御系のスペクトル測定 S_{LP}	38
3.32	スペクトル S_P, S_{LP}	39
3.33	フィルターの改良による 2-loop 制御	40
3.34	改良フィルターの特性	41
3.35	フィルターの改良後のオープンループ伝達関数 G_P, G_{LP}	42
3.36	フィルターの改良後のスペクトル S_P, S_{LP}	43
3.37	雑音源の評価	44
3.38	回路要素の雑音 (出口)	45
3.39	回路要素の雑音 (入口換算)	46
3.40	回路雑音の寄与	47

表 目 次

3.1	ビームスプリッタの分岐比	22
3.2	マッハツェンダー干渉計の光学特性	22

第1章 はじめに

本レポートでは、マッハツェンダー干渉計を用いたレーザー光源の周波数安定化の制御実験について述べる。実験の目的はマッハツェンダー干渉計を用いた周波数安定化の制御の知識の取得、構築、動作の確認である。

重力波は、光速で伝播する時空の歪である。最初に重力波の理論的存在を指摘したのは、A.Einstein で、1916年に重力場の方程式(アインシュタイン方程式)を線形近似して波動方程式を得た。現在ではこのような近似解とは別に非線形なアインシュタイン方程式の厳密解としての波動解がいくつか求められている。

電荷の振動により起きた電磁波が真空を伝わるように、質量の分布が時間的に変化するればそれに伴ってそのまわりの重力場も変化し、それは中心から遠方に向かって伝播していく。

電磁波の場合、最低次の放射は双極子放射となるが、重力波の場合は4重極放射が最低次である。

ミンコフスキー空間を伝わる重力波は直進するが、背景となる空間が平坦でなく極率をもっている場合は、電磁波と同様に距離0の測地線によって進路が与えられる。また重力波は物質との相互作用が小さいため、ほとんど減衰することなく星などの物質も通り抜けてしまう。

物質の質量四極子が時間的に変化するれば重力波が放出される。たとえば2つの質量をばねでつないだものを振動させれば重力波を発生することができる。

重力波の源としては、天体のうちで急激な変化を伴う星などが考えられている。すなわち、大きな星の重力崩壊、それに伴う超新星爆発、中性子星など、ブラックホールによる星の獲得やブラックホールどうしの衝突、二重星の合体などがある。これらの天体現象の多くは数ms程度の持続時間を持ち、そのとき放出される重力波はバースト波とよばれ、そのエネルギースペクトルは周波数の低いところから数kHzくらいまで伸びている。これに対して連続波とよばれ一定の周波数をもった重力波もある。二重星の重心のまわりでの回転、非軸対称な中性子星の回転や振動などの発生機構が考えられている。たとえば、かに星雲の中のパルサーは30.1Hzの周波数で回転している中性子星であり、60.2Hzの連続重力波を放出していると考えられており、地表でのエネルギーフラックスは $10^{-19} \sim 10^{-11} \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ 程度であると予想されている。

1978年、J.H.Taylorは連星パルサー(PSR 1913+16)の軌道周期の減少率を調べた観測データをもとに、これが重力波の放出によってエネルギーを失い軌道がだんだん小さくなるためだとすると、減少率が計算とよく一致することを見出した。これによって間接的ではあるが初めて重力波の存在が確認された。

重力波を検出するには、それに伴う時空のひずみを観測すればよい。2つの自由な質点を考えると、その相対的な位置ベクトルの変化は測地線偏差の方程式に従う。そこへ重力波が入射するとリーマン・テンソルが有限の値をもつようになるので質点間の距離が変化する。もし、二質点間に拘束があれば応力が生じる。

重力波の特徴である透過性の良さによって、これまでの電磁波で見てきた宇宙の姿に対して新しい情報を得ることができる。レーザー干渉計重力波検出器計画が提案され、いくつかは既にプロジェクトがスタートしている。

第2章 実験の原理

2.1 光学系

2.1.1 マッハツェンダー干渉計の原理

マッハツェンダー干渉計は二光束干渉計である。

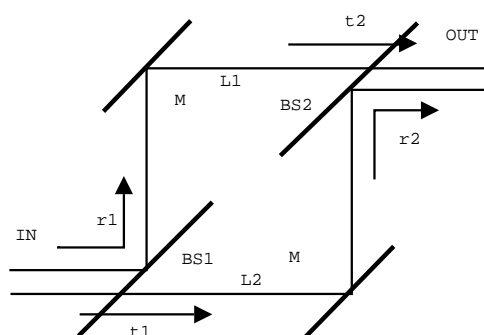


図 2.1: マッハツェンダー干渉計

レーザーダイオード LD、2つのビームスプリッタ BS1、BS2、フォトダイオード PD から構成される。LD からの光は第1のビームスプリッタ BS1 で分割され、それぞれ別の経路を通り、第2のビームスプリッタ BS2 で再び重ね合わされる。干渉効果を PD で測定する。

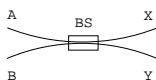


図 2.2: ビームスプリッタ

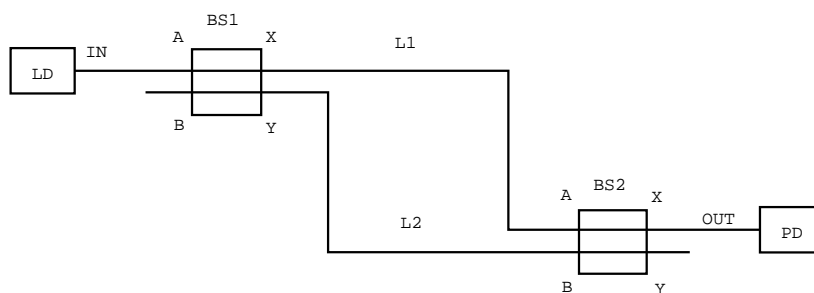


図 2.3: マッハツェンダー干渉計

それぞれの BS の振幅反射率と透過率を、 r_1 、 t_1 、 r_2 、 t_2 とする。(ビームスプリッタ BS の入力を A、B、出力を X、Y とする。入力 A から X への出力を透過 r_1 、B への出力を反射 t_1 、入力 B から X への出力を透過 r_2 、B への出力を反射 t_2 とする。) 光 (角周波数 Ω) が BS 間 (距離 L) を進む際に生まれる位相を $\Delta = \Omega L/c$ とする。

光源からの光の電場、干渉計から出る光の電場を

$$\begin{aligned} E_{in} &= E_0 e^{i\Omega t} \\ E_{out} &= (r_2 t_1 e^{i\frac{\Omega}{c}L_1} + t_2 r_1 e^{i\frac{\Omega}{c}L_2}) E_0 e^{i\Omega t} \\ &= (r_2 t_1 e^{i\Delta_1} + t_2 r_1 e^{i\Delta_2}) E_{in} \end{aligned}$$

とする。

干渉計から出る光強度 P_{out} は、

$$\begin{aligned} P_{out} &= |E_{out}|^2 \\ &= E_{out}^* E_{out} \\ &= (r_2 t_1 e^{-i\Delta_1} + t_2 r_1 e^{-i\Delta_2}) E_{in}^* \cdot (r_2 t_1 e^{i\Delta_1} + t_2 r_1 e^{i\Delta_2}) E_{in} \\ &= ((r_2 t_1)^2 + r_2 t_1 t_2 r_1 e^{i(-\Delta_1 + \Delta_2)} + t_2 r_1 r_2 t_1 e^{i(-\Delta_2 + \Delta_1)} + (t_2 r_1)^2) |E_{in}|^2 \\ &= ((r_2 t_1)^2 + (t_2 r_1)^2 + r_2 t_1 t_2 r_1 (e^{i(-\Delta_1 + \Delta_2)} + e^{i(-\Delta_2 + \Delta_1)})) |E_{in}|^2 \\ &= ((r_2 t_1)^2 + (t_2 r_1)^2 + r_2 t_1 t_2 r_1 2 \cos(\Delta_1 - \Delta_2)) |E_{in}|^2 \end{aligned}$$

となる。

ここで、位相差 ϕ を定義する。

$$\phi \equiv \Delta_1 - \Delta_2 = \frac{\Omega}{c} (L_1 - L_2)$$

位相差 ϕ を用いて、 P_{out} は

$$P_{out} = ((r_2 t_1)^2 + (t_2 r_1)^2 + r_2 t_1 t_2 r_1 2 \cos \phi) |E_{in}|^2$$

となる。

P_{out} の最大値、最小値は

$$\begin{aligned} P_{out(max)} &= ((r_2 t_1)^2 + (t_2 r_1)^2 + 2r_2 t_1 t_2 r_1) |E_{in}|^2 \\ P_{out(min)} &= ((r_2 t_1)^2 + (t_2 r_1)^2 - 2r_2 t_1 t_2 r_1) |E_{in}|^2 \end{aligned}$$

となる。

一般に、干渉計の出力強度の最大値を P_{max} 、最小値を P_{min} とするとき、

$$C = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max} + P_{min}}$$

という量をコントラスト (contrast) C と呼ぶ。 P_{max} 、 P_{min} は明縞、暗縞に対応し、C は干渉縞の明瞭度を表す指標となる。

2.2 制御系

2.2.1 ロックインアンプによる位相差検出

制御量として位相差 ϕ に比例した量を得たい。このために以下に方法を述べる。

ロックインアンプは次に示すブロック図のように構成される。測定信号と、それと同じ周波数をもつ参照信号の2つを入力する。参照信号は位相調整器によりその位相を必要な値に変化させられ、入力信号とともに位相検波器 (PSD) に送られる。位相検波器は、2つの交流信号を掛算する回路とそれに続くローパスフィルター (LPF) からなる。

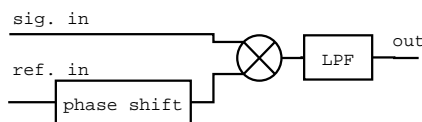


図 2.4: ロックインアンプ

マッハツェンダー干渉計の出力 V_{out} がマッハツェンダー干渉計 (外部パラメータ) V_{in} に対してゆっくり変化する関数であるとき、 V_{in} に角振動数 Ω で振動する小さな振幅の交流で変調をかけてやると、 V_{out} の信号にも同じ周波数の交流成分が現れる。この交流成分をロックインアンプで検出すれば、 V_{out} をこの外部パラメータ V_{in} で微分した量が求められる。

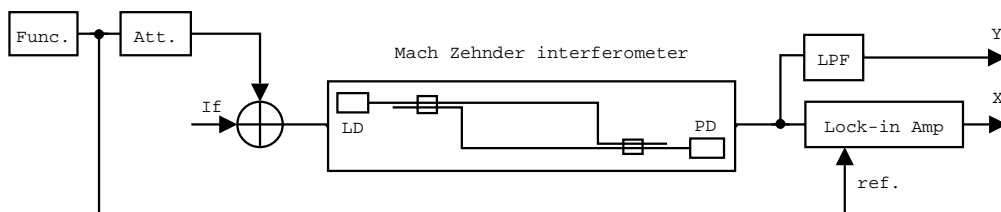


図 2.5: ロックインアンプによる位相検出

マッハツェンダー干渉計

$$V_{out}(V_{in}) = (1 + \cos \Delta\phi(V_{in}))V_{in}$$

入力、

$$\begin{aligned} V_{in} &= V_{in0} + \Delta\hat{V} \\ \Delta\hat{V} &= \Delta V \cos \Omega t \end{aligned}$$

干渉計の出力、

$$\begin{aligned} V_{out}(V_{in}) &= V_{out}(V_0 + \Delta\hat{V}) \\ &= V_{out}(V_0) + \frac{dV_{out}(V_{in})}{dV_{in}} \Big|_{V_{in}=V_{in0}} \Delta\hat{V} \\ &= (1 + \cos \Delta\phi(V_{in0}))V_{in0} - \sin \Delta\phi(V_{in0}) \frac{d\Delta\phi}{dV_{in}} \Big|_{V_{in}=V_{in0}} \Delta\hat{V} \end{aligned}$$

従って、

$$\begin{aligned} V_{out} &= (1 + \cos \Delta\phi(V_{in0}))V_{in0} - \sin \Delta\phi(V_{in0}) \frac{d\Delta\phi}{dV_{in}} \Big|_{V_{in}=V_{in0}} \Delta\hat{V} \\ &= (1 + \cos \Delta\phi(V_{in0}))V_{in0} - \sin \Delta\phi(V_{in0}) \frac{d\Delta\phi}{dV_{in}} \Big|_{V_{in}=V_{in0}} \Delta V \cos \Omega t \end{aligned}$$

ロックインアンプ出力には、 $\cos \Omega t$ との掛算、LPF から、

$$X = -\sin \Delta\phi(V_{in0}) \frac{d\Delta\phi}{dV_{in}} \Big|_{V_{in}=V_{in0}}$$

が得られる。

$\Delta\phi$ が微小であれば、

$$X = -\Delta\phi(V_{in0}) \frac{d\Delta\phi}{dV_{in}} \Big|_{V_{in}=V_{in0}}$$

位相差 $\Delta\phi$ に比例した制御量を得る。

マッハツェンダー干渉計の出力、

$$V_{out}(V_{in}) = (1 + \cos \Delta\phi(V_{in0}))V_{in0} - \sin \Delta\phi(V_{in0}) \frac{d\Delta\phi}{dV_{in}} \Big|_{V_{in}=V_{in0}} \Delta V \cos \Omega t$$

LPF より、

$$Y = (1 + \cos \Delta\phi(V_{in0}))V_{in0}$$

が得られる。

X-Y 表示では位相差 $\Delta\phi$ により円弧を描く。

$$\begin{aligned} X &= -\sin \Delta\phi(V_{in0}) \frac{d\Delta\phi}{dV_{in}} \Big|_{V_{in}=V_{in0}} \\ Y &= (1 + \cos \Delta\phi(V_{in0}))V_{in0} \end{aligned}$$

2.2.2 フィードバック制御

われわれが制御しようとしている量を制御量とよび、この制御量が示すこと希望している値を目標値という。目標値と制御量の差は制御の誤差であるが、これを制御誤差 (error) とよぶ。

フィードバック制御系は次のように構成される。

- 1) 制御量を測定する。
- 2) 目標値と検出した値を比較し、制御偏差を取り出す。
- 3) 制御偏差の符号、大きさなどに応じて、偏差をなくすように制御対象に働きかけ、訂正動作を行う。

2.2.3 PID 制御

PID 制御とは、比例 (Proportional) 制御、積分 (Integral) 制御、微分 (Derivative) 制御を同時に行うことで、制御量を目標値に素早く制御する方法である。

P 制御

P 制御 (比例制御) とは、ある時刻 t における制御量 $x(t)$ と目標値 x_{obj} の偏差 $\Delta x(t) = x(t) - x_{obj}$ に比例する操作量

$$K \Delta x(t)$$

制御器に与える制御方法である。一見、これだけで目標値に制御できるように思えるが、実はこれでは不完全である。偏差がある程度まで小さくなると、それに比例する操作量は小さすぎて、制御量に変化を与えるには不十分になってしまう。すなわち、ある程度未満の外乱を取り除くことができないのである。操作量を大きくするために比例係数 K を大きくしすぎると、今度は系が不安定になり、発振してしまう。したがって、比例制御だけでは、ある程度の定常偏差が残ってしまう。

PI 制御

そこで、比例制御ではとりきれない定常偏差を除去するために、積分制御 (I 制御) を加える。ある時刻 t における I 制御の操作量は、 t までの偏差の積分値に比例する量である。これにより、偏差がなくなるまで操作量が増加する。偏差が 0 になったときに残った定常偏差量が、P 制御でとりきれなかった定常偏差を打ち消すための操作量である。

時刻 t における、PI 制御による操作量は

$$K \cdot [\Delta x(t) + \frac{1}{T_I} \int_{t_0}^t \Delta x(t) dt]$$

で得られる。このときの I 制御は、 T_I より長い時間に対して感度を持つ。

ただし、この場合積分が済むまでに時間がかかる。つまり過渡特性が悪いのが欠点である。

PID 制御

PI 制御の過渡特性を改善するために、微分制御 (D 制御) を加える。ある時刻 t における D 制御の操作量は、 t における偏差 $\Delta x(t)$ の微分係数、すなわち t における制御量 $x(t)$ の微分係数に比例する量である。よって、偏差が減少傾向にあるときは、操作量が減少することになる。つまり、D 制御は制御のブレーキと

して作用する。これでは、一見、応答は遅くなるように思える。しかし、ブレーキがあることで発振が抑制されるため、P制御の係数を大きくすることが可能になる。これにより、過渡特性を改善できるのである。

時刻 t における、PID 制御による操作量は、

$$\begin{aligned} & K \cdot \left[\Delta x(t) + \frac{1}{T_I} \int_{x_0}^t \Delta x(t) dt + T_D \frac{d\Delta x}{dt} \right] \\ & = K \cdot \left[\Delta x(t) + \frac{1}{T_I} \int_{x_0}^t \Delta x(t) dt + T_D \frac{dx}{dt} \right] \end{aligned}$$

で得られる。このときの D 制御は、 T_D より短い時間の変化に対して感度を持つ。

PID パラメタの最適化

このように、PID 制御の特性は、 K 、 T_I 、 T_D の 3 つのパラメタにより決定される。これらのパラメタを決める方法はいくつか提案されているが、いずれも経験則であり、実際には実験を繰り返して最適化していくしかない。

2.2.4 制御系の設計

フィードバックループを設計する際に問題となるのが、制御系の安定性の問題である。安定性を調べる 1 つの判定法として、系のオープンループ伝達関数の絶対値が 1 になる周波数 (Unity Gain Frequency : UGF) における位相遅れを調べる方法である。UGF において、オープンループ伝達関数の位相遅れが 180 度よりも小さければ系は安定であり、逆に 180 度よりも大きく遅れていけば系は不安定になり、発振を始める。

フィードバック制御系の安定度を示す量の一つとして、位相余裕がある。フィードバック制御系の周波数応答において、ゲインが 0dB になる点での位相遅れが 180 度 (位相ずれ-180 度) に対してどれくらい余裕があるかを示す値で、フィードバック系の安定性の尺度となる。

位相余裕、ゲイン余裕ともにその値が大きいほど制御系は安定度を増す。一般に位相余裕としては 30 度程度、ゲイン余裕としては 10~20dB 程度に設定される。

2.2.5 レーザーダイオードによる位相差の制御

図 3.12 のように構成する。レーザーダイオードの波長 (角振動数 Ω) は、レーザーダイオード入力電圧に依存すると考えられている。制御量をレーザーダイオード入力電圧へフィードバックし、角振動数 Ω の制御により位相差の制御を行う。

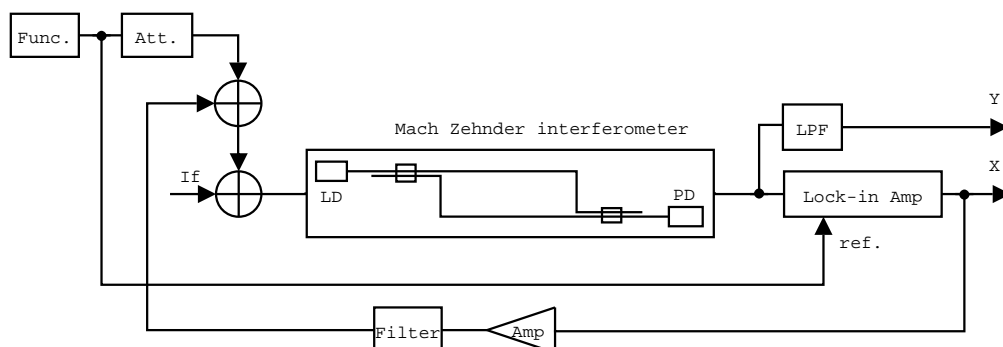


図 2.6: レーザーダイオードによる位相差の制御

2.2.6 ペルチェ素子による位相差の制御

図 3.17 のように構成する。マッハツェンダー干渉計の光路長差の制御を、光ファイバーの温度変化による伸縮により行う。光路長差の制御により位相差の制御を行う。

光ファイバーの温度変化を行うためにペルチェ素子を用いる。ペルチェ素子は電流を供給することによって、一方の面から他方の面へ能動的に熱の移動を起こさせる素子である。電流の向きに応じて熱の移動する方向が変化するので、この素子によって冷却と加熱の両方を行うことができる。

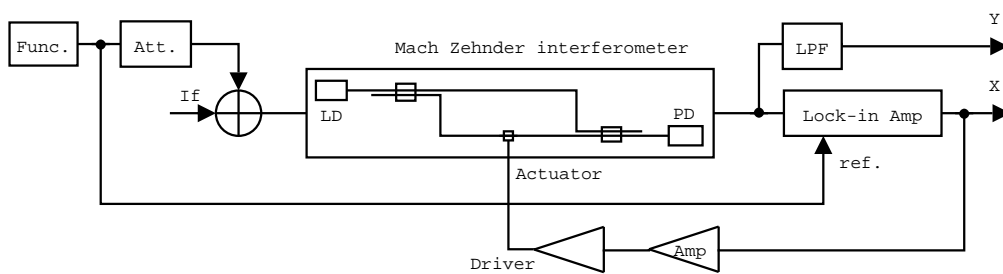


図 2.7: ペルチェ素子による位相差の制御

2.2.7 2-loop 制御による位相差の安定化

図 2.8 のように構成し、2-loop 制御による位相差の安定化を行う。ペルチェ素子を用いた温度制御による光路長制御のフィードバックの 2-loop 制御からなる。

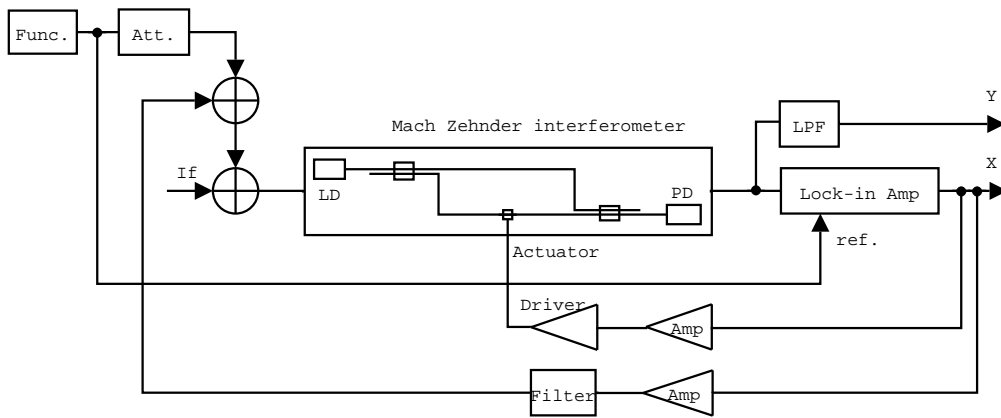


図 2.8: 2-loop 制御による位相差の安定化

2.3 レーザー干渉計における雑音源

2.3.1 地面振動

地面は、地震などなくても常に微小振動している。特に低周波数では、この振動が干渉計の行路長を変化させ、雑音となる。

地面の常時微動のスペクトルは、地域によっても差があるが、おおよそ、

$$\delta x(f) \sim 10^{-7} \times \left(\frac{1[\text{Hz}]}{f} \right)^2 [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi} [\text{Hz}]$$

に従うことが知られている。

第3章 実験の方法と結果

3.1 レーザーダイオード・フォトダイオードの基本特性

レーザーダイオード (LD)・フォトダイオード (PD) の基本特性測定について述べる。LD の光出力 P_f と PD の電圧 V_r の関係、LD の光出力 P_f の温度依存性を求めた。図 3.1 に示すように、LD と PD を直接つなぎ、図 3.2 に示すプリアンプにより PD の電流を電圧信号 V_r に変換して得る。

LD は ANRITSU 社製 Model:AB5A234P1 の LD ユニットを用いる。波長 λ は 1552.4[nm] である。この LD ユニットは内部に PD を備えておりモニタ電流 I_m を得る。また、温度制御のための TE クーラーとサーミスタが内蔵されており、このサーミスタ抵抗 R_{th} から、LD の温度を知ることができる。以後干渉計の光源として用いる。

I_m - V_r 特性を求め、規格値である I_m - P_f 特性から、LD の出力パワー P_f と PD の電圧 V_r の関係を求めた。 I_m - V_r 特性を図 3.3 に、 I_m - P_f 特性を図 3.4 に、図 3.5 に示す P_f - V_r 特性は V_r が 1~2V の領域まで比例関係にある。従って、制御系はこの領域内で使用する必要がある。

次に、LD の光出力の温度依存性を求めた。 R_{th} - V_r 特性を測定し、規格値である T - R_{th} より T - V_r 特性を求めた。 R_{th} - V_r 特性を図 3.6 に、 T - R_{th} 特性を図 3.7 に示す。図 3.8 は V_r が温度に依存して変化することを示している。従って、LD の光出力は温度に依存しているので、温度を一定にして使用する必要がある。

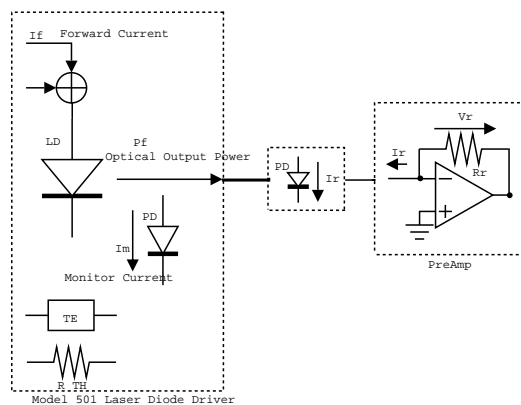


図 3.1: レーザーダイオード・フォトダイオードの基本特性測定

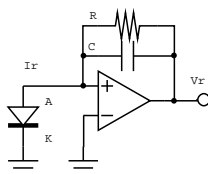


図 3.2: プリアンプ

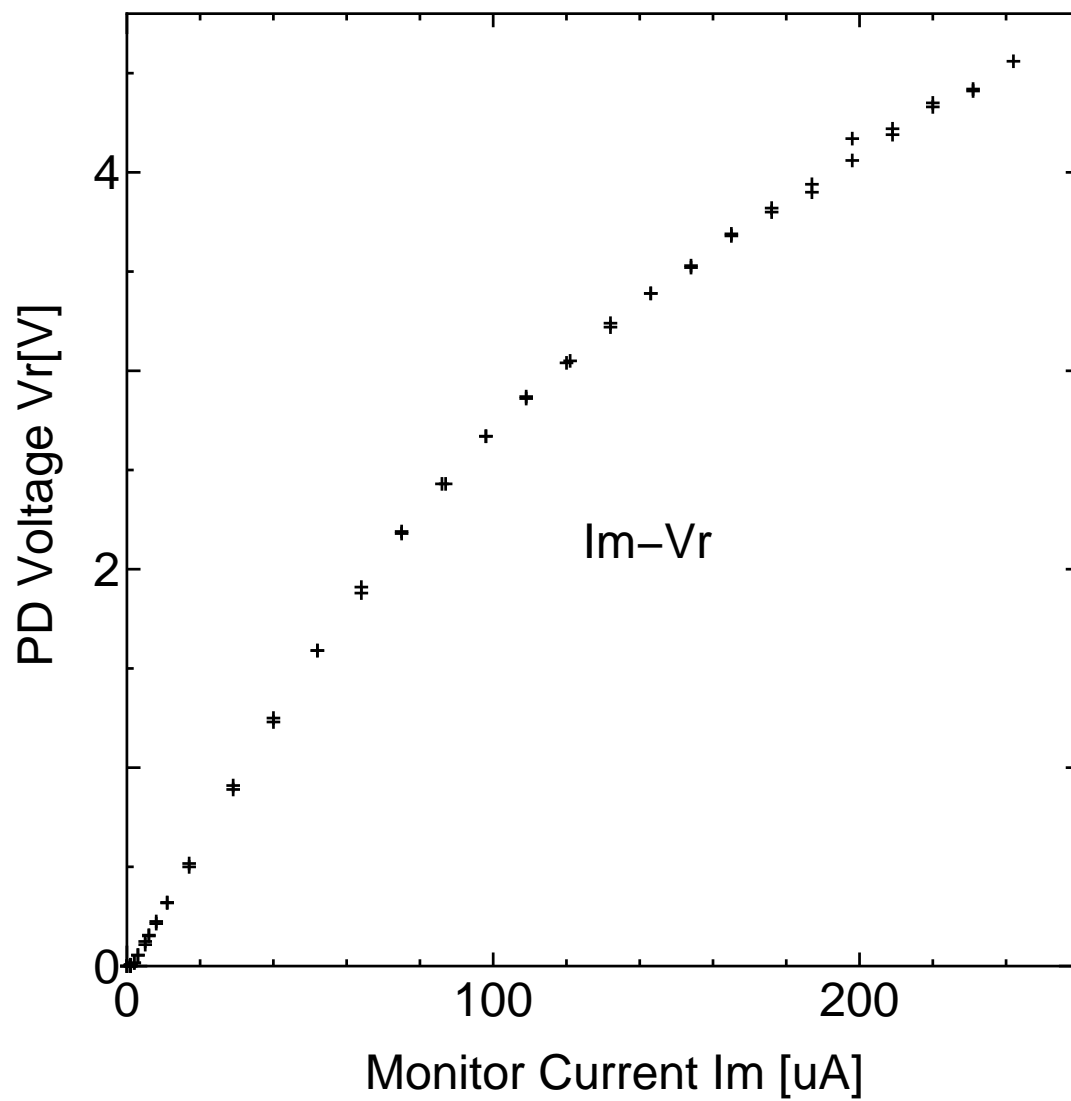


图 3.3: I_m - V_r 特性

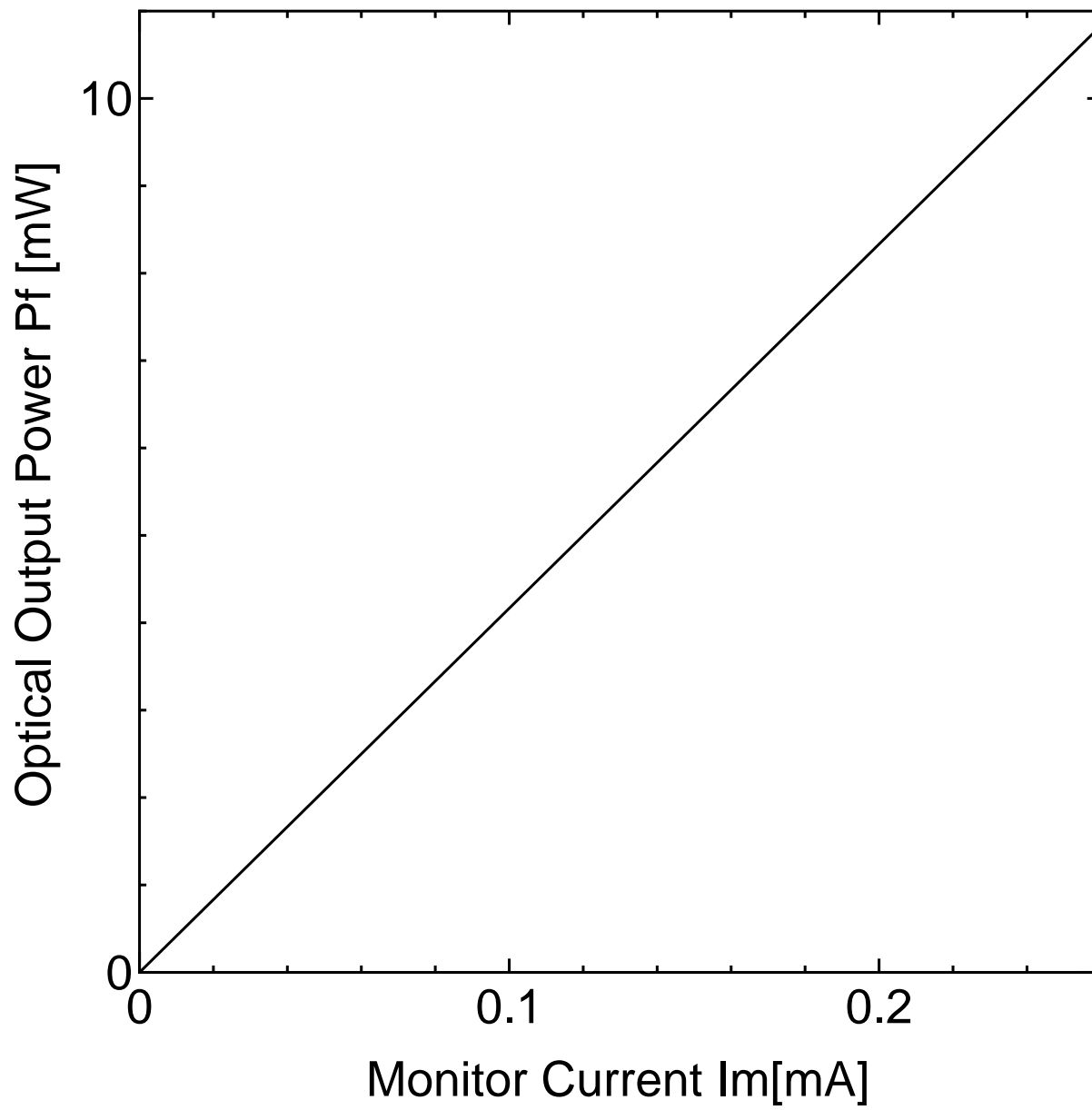


图 3.4: I_m - P_f 特性 (规格值)

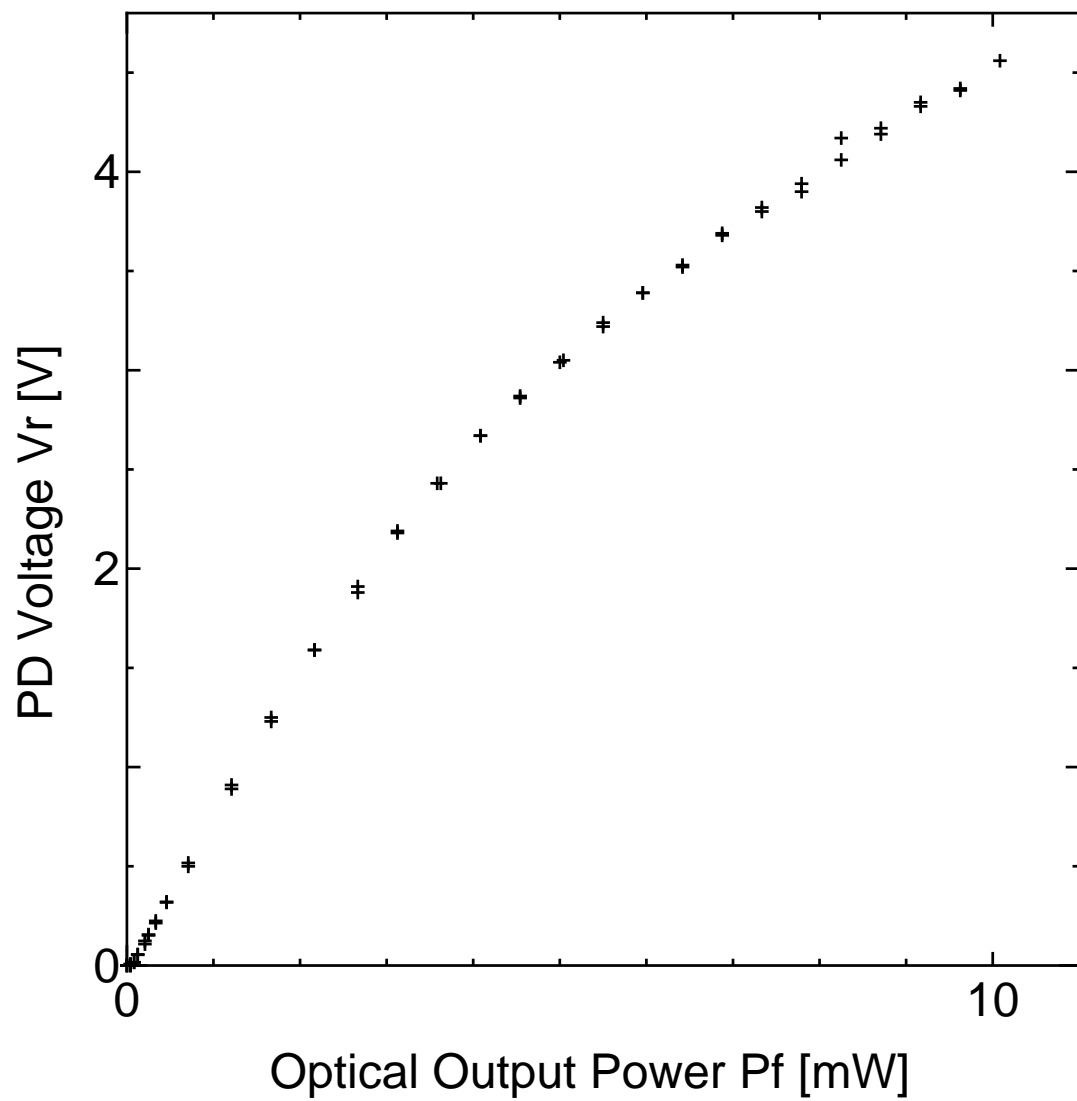


図 3.5: P_f - V_r 特性

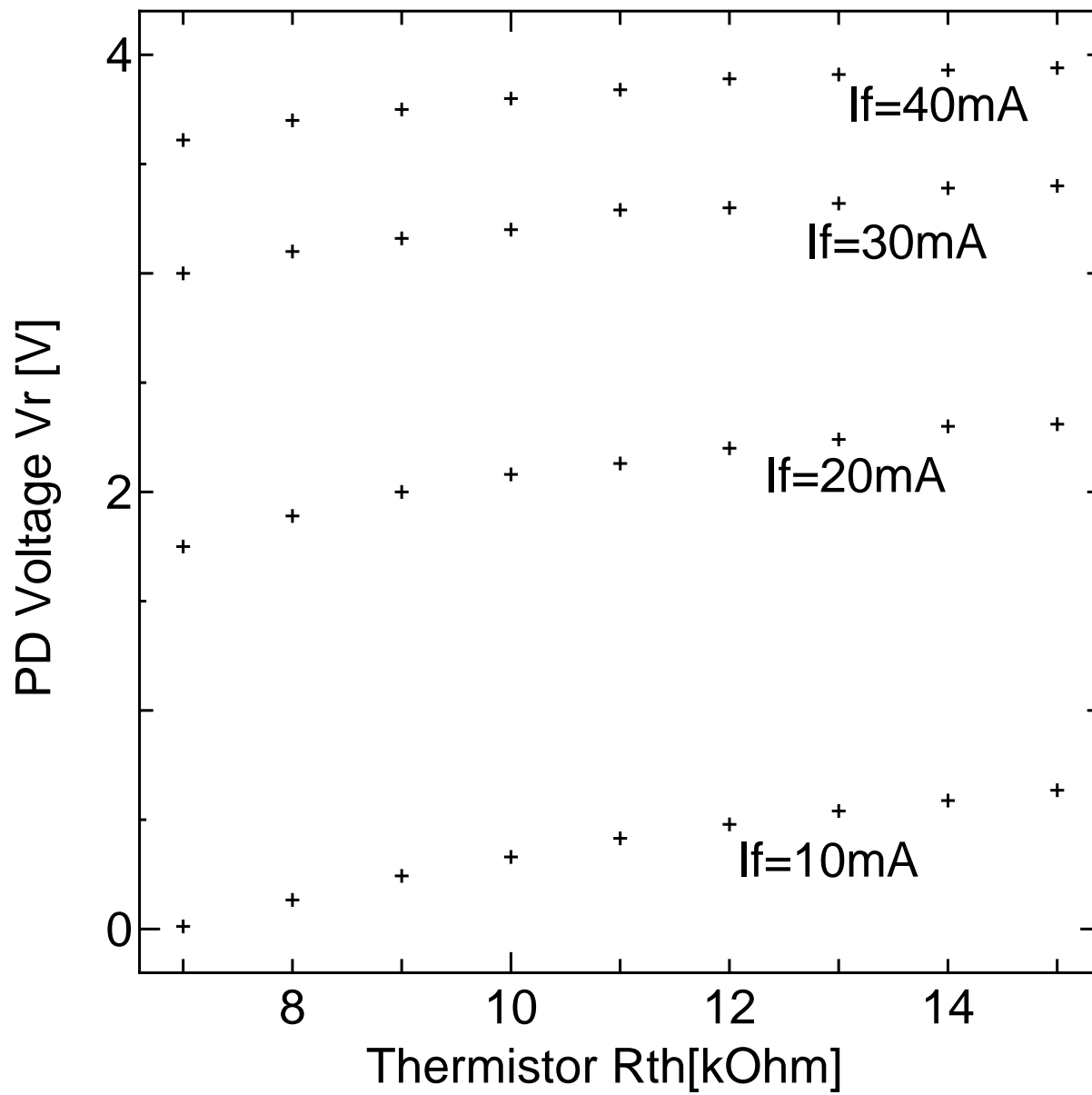


图 3.6: Rth-Vr 特性

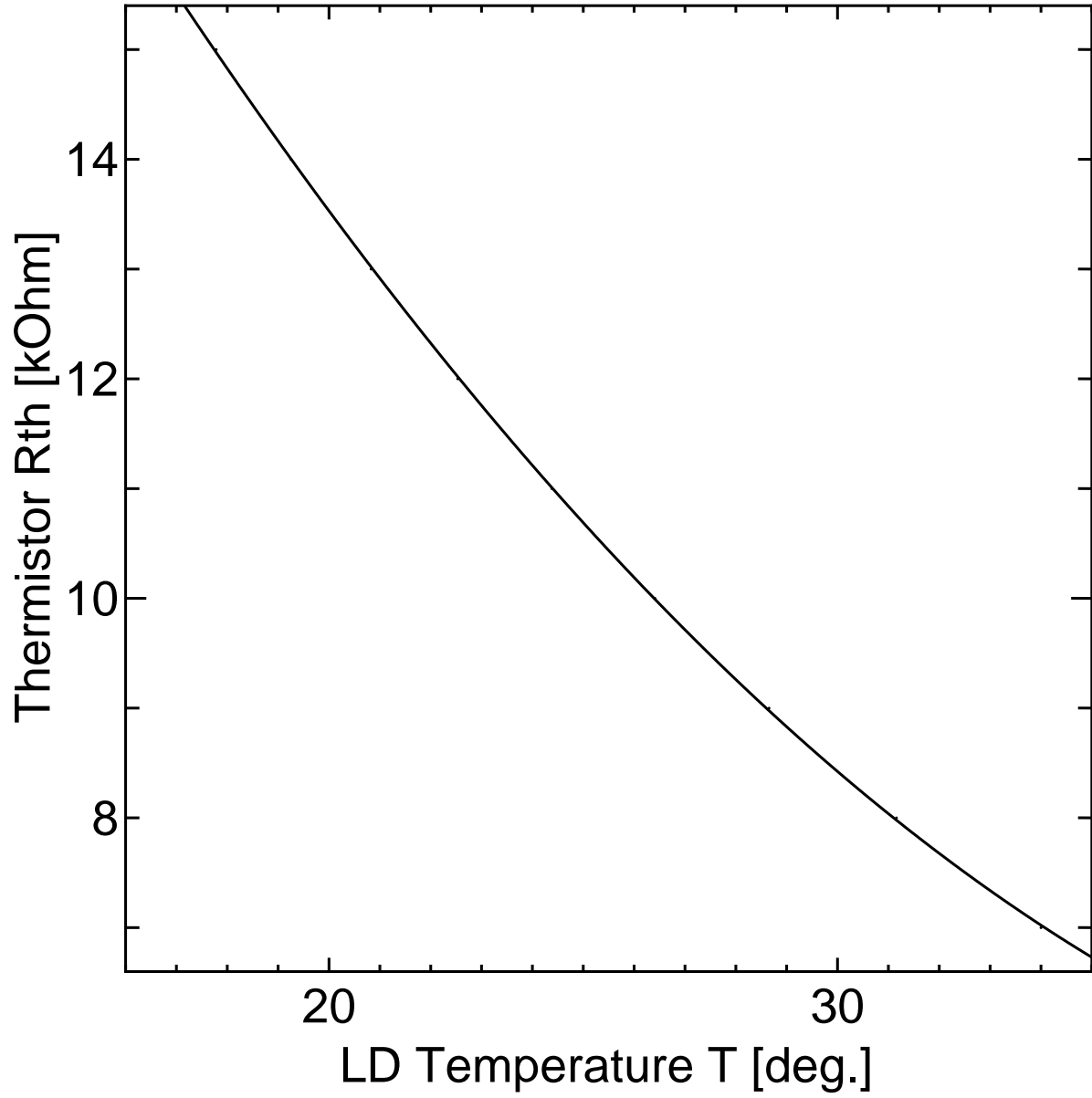


图 3.7: T-R_{th} 特性 (规格值)

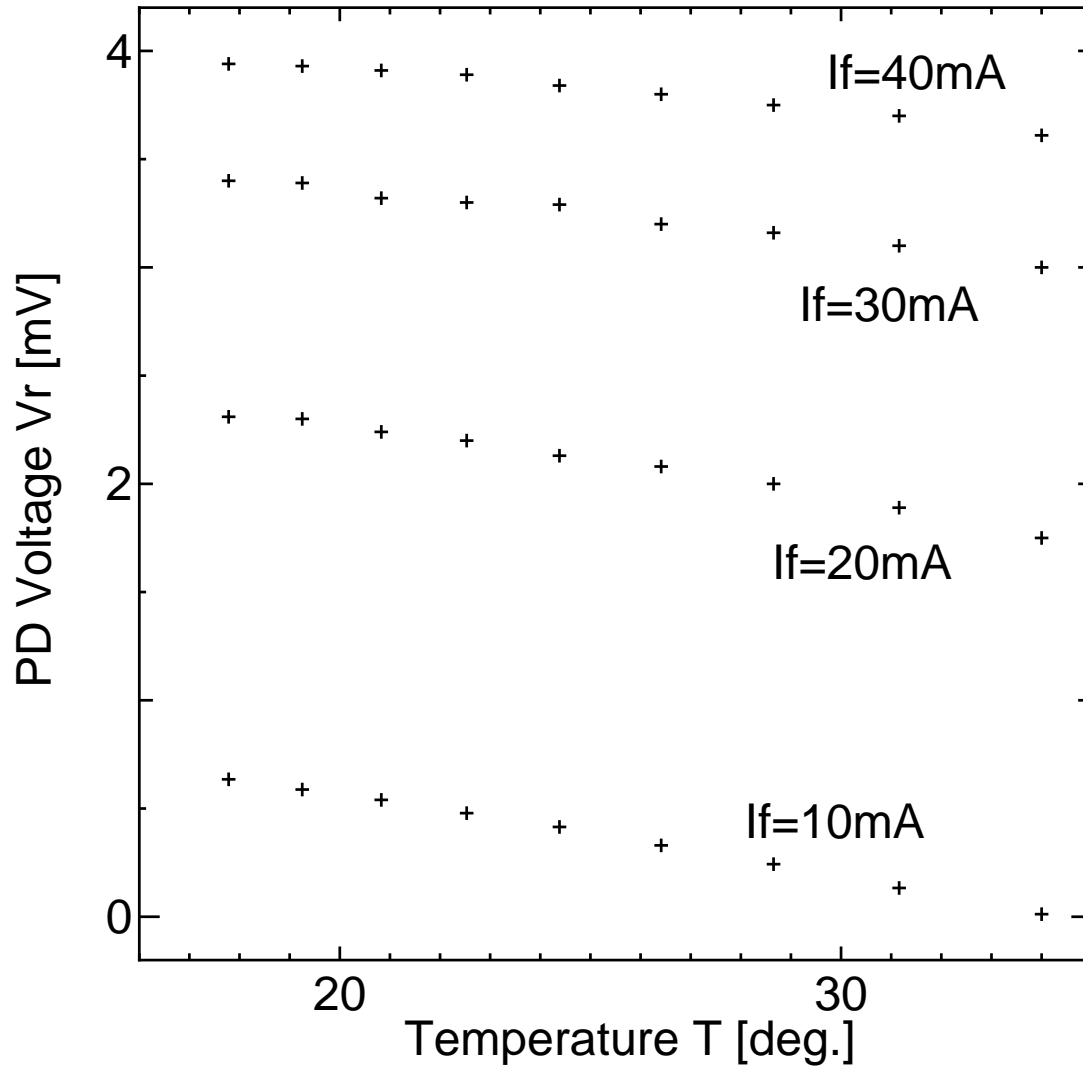


图 3.8: T-Vr 特性

3.2 マッハツェンダー干渉計の特性

3.2.1 ビームスプリッタの分岐比の測定

ビームスプリッタの分岐比を測定した。 $I_f = 10mA$ 、 $15mA$ に対する V_r の測定から、透過率、反射率を求めた。

接続	$I_f=10mA$	$I_f=15mA$	反射率又は透過率
	[mV]	[mV]	
LD-AtoX(1)-PD	33.0	102.9	-
LD-AtoX(1)-AtoX(2)-PD	17.3	54.0	$r=0.53$
LD-AtoX(1)-AtoY(2)-PD	15.4	48.7	$t=0.47$
LD-AtoX(1)-BtoX(2)-PD	14.9	46.7	$r=0.49$
LD-AtoX(1)-BtoY(2)-PD	15.5	50.1	$t=0.51$

表 3.1: ビームスプリッタの分岐比

各の反射率、透過率はほぼ等しく、位相差 ϕ として干渉計から出る光強度は $1 + \cos \phi$ に比例として扱うことができる。

3.2.2 マッハツェンダー干渉計の光学特性測定

マッハツェンダー干渉計を構成し、コントラスト C を求めた。 $I_f = 30mA$ としている。各 BS の出力についてコントラスト C を次の表に示す。

干渉計出力	$V_r(\min)$	$V_r(\max)$	C
	[mV]	[mV]	
X(1)	14.0	580	95.3
Y(1)	6.5	560	97.8
X(2)	4.5	590	98.5
Y(2)	1.5	560	99.5

表 3.2: マッハツェンダー干渉計の光学特性

干渉縞の明瞭度は強く、強い干渉を示している。

3.3 ロックインアンプによる位相検出

ロックインアンプによる位相検出について述べる。図 3.9 のように構成した。LD 順電流 $I_f=20\text{mA}$ に振幅 1mA 、周波数 20kHz の正弦波を重ね合わせ、変調を行い、位相差検出を試みた。

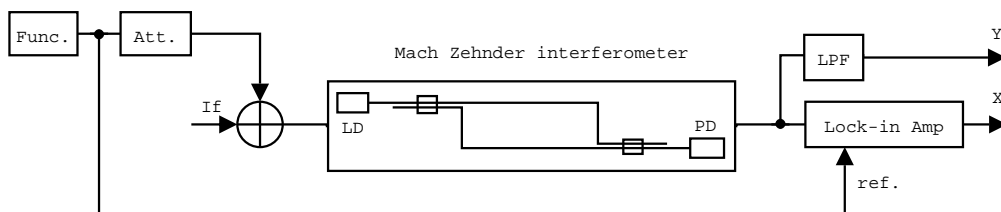


図 3.9: ロックインアンプによる位相検出

LD ユニットは変調のための外部入力端子をもち、電圧信号により 20mA/V で LD 順電流に変調がかけられる。ファンクションジェネレータ (Func.) より 20kHz 、振幅電圧 1V の正弦波を得て、アッテネータ (Att.) で $1/20$ に減衰させ振幅電圧 50mV にして、上記の変調を行った。アッテネータは図 3.10 のように構成した。

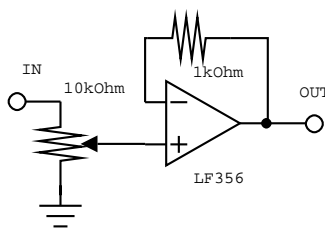


図 3.10: アッテネータ

変調により干渉計出力は変調信号と同じ周波数の交流成分が現れる。これをローパスフィルタ (LPF) により除去する。LPF はカットオフ周波数を 1kHz 程度に設定し、これより高周波成分は除去される。従って、図 3.9 の Y には無変調と同等の干渉計出力が得られる。図 3.11 に LPF を示す。出力反転を考慮し、2 段の LPF とした。

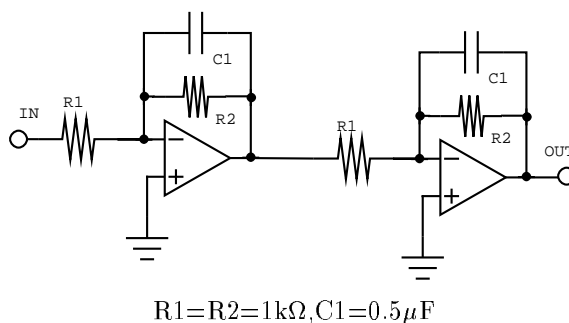


図 3.11: ローパスフィルタ

出力 X は干渉計出力の微分形を出力し、出力 X, Y のオシロスコープ X-Y 表示は干渉計の位相差 ϕ により円弧を描いた。

3.4 制御による位相差の安定化

3.4.1 レーザーダイオードによる位相差の安定化

レーザーダイオードによる位相差の安定化について述べる。構成を図 3.12 に示す。

図中の出力 X には干渉計出力 $1 + \cos \phi$ の微分形 $-\sin \phi$ に比例した信号が得られる。動作点付近での微小変化に対しては出力 X は $-\phi$ に比例した信号が期待される。この出力 X をアンプ (Amp.) で増幅し、フィルター (Filter) を通し、LD 信号にフィードバックさせ、信号出力 X の安定化、すなわち位相差の安定化を試みた。

用いたアンプ、加算アンプをそれぞれ図 3.13、図 3.14 に示す。フィルターについては次に述べる。

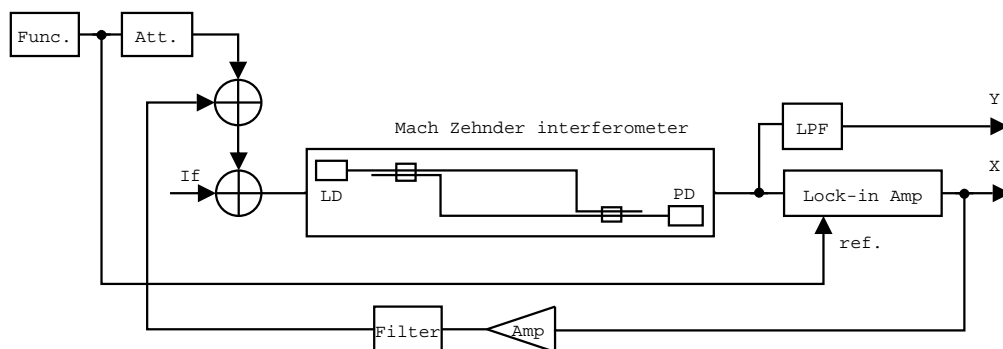


図 3.12: レーザーダイオードによる位相差の安定化

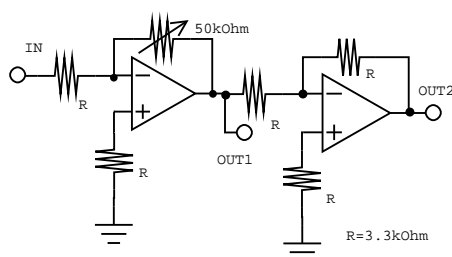


図 3.13: アンプ

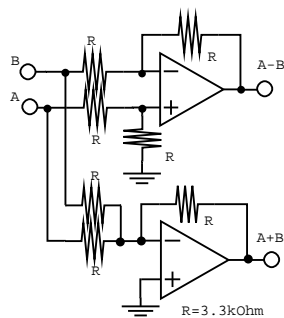


図 3.14: 加算アンプ

フィルターの設計

PID 制御を行うため、フィルターを構成する。

フィルターの構成を図 3.15 に、設計したフィルターの特性及び素子の値を図 3.16 に示す。

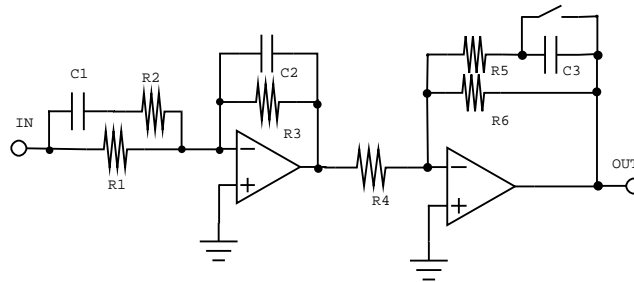


図 3.15: フィルター

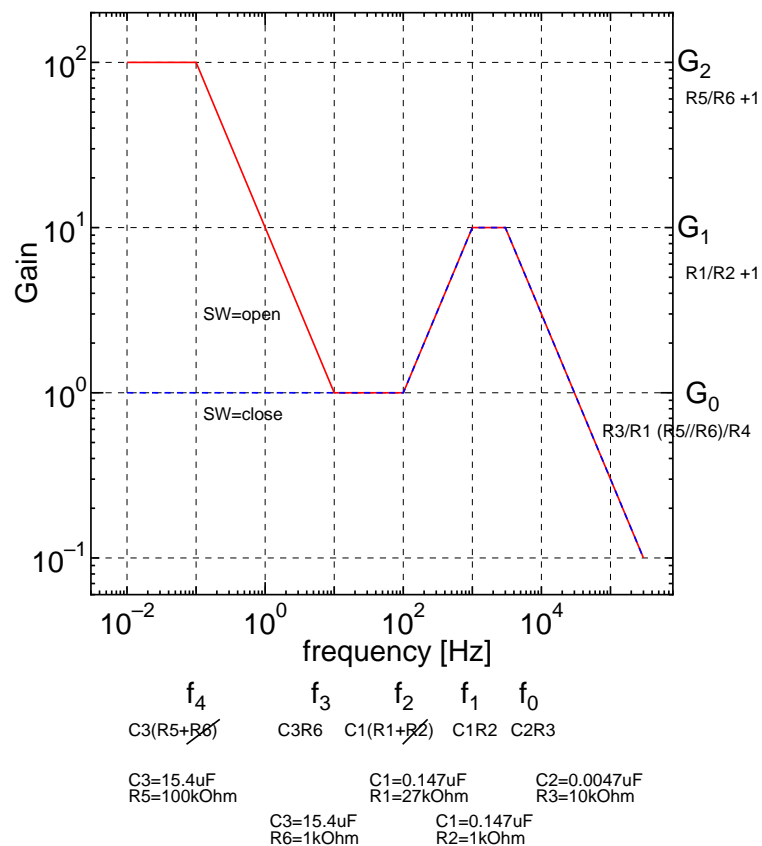


図 3.16: フィルターの設計

3.4.2 ペルチエ素子による位相差の安定化

ペルチエ素子による位相差の安定化の構成を図 3.17 に示す。

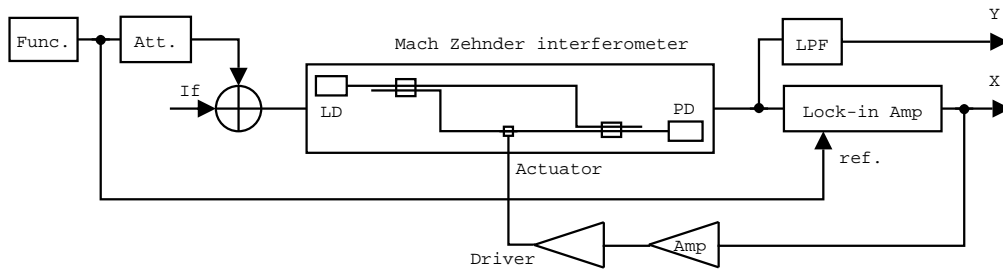


図 3.17: ペルチエ素子による位相差の安定化

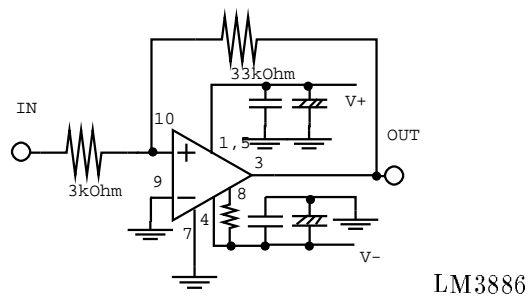


図 3.18: ペルチエドライバー

ペルチエドライバーは制御量を大きくするために、容量の大きいドライバーを選んだ。また、光ファイバーとは熱伝導性を良くするためにシリコングリスを塗布し接着している。

3.5 校正

3.5.1 制御量の校正

干渉計の出力は電圧 ($[V]$ 又は $[V/\sqrt{Hz}]$) である。そのため、この電圧値を、干渉計の光路長差の変位 ($[m]$ 又は $[m/\sqrt{Hz}]$) に変換するための係数が必要となる。この係数を求める為に校正 (calibration) を行う。光路長差 ΔL と出力信号 V との変換係数を求める。校正値の測定の設定を、図 3.19 に示す。

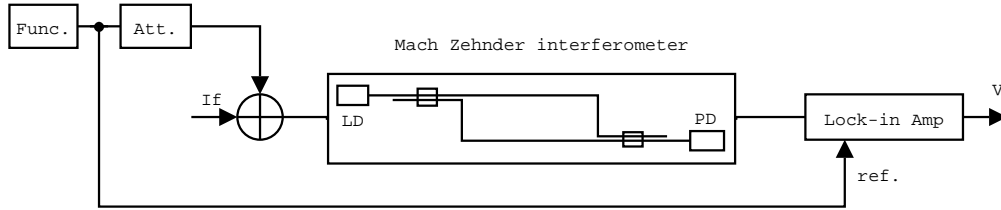


図 3.19: 校正値の測定の設定

干渉計の位相差 $\phi(\Omega, L)$ の微小変位 $\Delta\phi$ は、

$$\begin{aligned}\phi(\Omega, L) &= \frac{\Omega L}{c} \\ \Delta\phi(\Delta\Omega, \Delta L) &= \frac{\partial\phi}{\partial\Omega}\Delta\Omega + \frac{\partial\phi}{\partial L}\Delta L \\ &= \frac{\Delta\Omega L}{c} + \frac{\Omega\Delta L}{c}\end{aligned}$$

となる。

光源の角振動数 Ω は一定であるとして、すなわち、 $\Delta\Omega = 0$ のもとで、

$$\begin{aligned}\Delta\phi(\Delta L) &= \frac{\partial\phi}{\partial L}\Delta L \\ &= \frac{\Omega\Delta L}{c}\end{aligned}$$

となる。

Lock-in Amp. 出力は、

$$\begin{aligned}V(\Delta L) &= V_{pp} \sin \Delta\phi \\ &= V_{pp} \sin \frac{\Omega\Delta L}{c}\end{aligned}$$

より、このとき、動作点付近での微小変化に対しては、

$$\begin{aligned}\left.\frac{\partial V}{\partial \Delta L}\right|_{\Delta L \rightarrow 0} &= \left.\frac{\partial}{\partial \Delta L} V_{pp} \sin \frac{\Omega\Delta L}{c}\right|_{\Delta L \rightarrow 0} \\ &= V_{pp} \frac{\Omega}{c} \cos \frac{\Omega\Delta L}{c} \Big|_{\Delta L \rightarrow 0} \\ &= V_{pp} \frac{\Omega}{c}\end{aligned}$$

$$= V_{pp} \frac{2\pi}{\lambda} [V/m]$$

となる。よって、制御をかけないときの出力電圧 $v_{pp} = v_{max} - v_{min}$ と、レーザー光の波長 λ から、光路長差 ΔL と出力信号 V との変換係数が求められる。

この値は、

$$V_{pp} = 0.578[V]$$

$$\lambda = 1552.4[nm]$$

より、

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial \Delta L} |_{\Delta L \rightarrow 0} &= V_{pp} \frac{2\pi}{\lambda} \\ &= 0.578[V] \cdot \frac{2\pi}{1552.4[nm]} \\ &= 1.17[mV/nm] \end{aligned}$$

と求められた。

3.5.2 ペルチエ素子によるアクチュエータの校正

信号を加えたときの変動を基準変位として各信号の変位に対する感度を求めることができる。

制御をかけた状態で、ペルチエ素子によるアクチュエータの loop の信号 V_{sig}^P の変位に対する感度 V_{err} を求める。設定を、図 3.20 に示す。

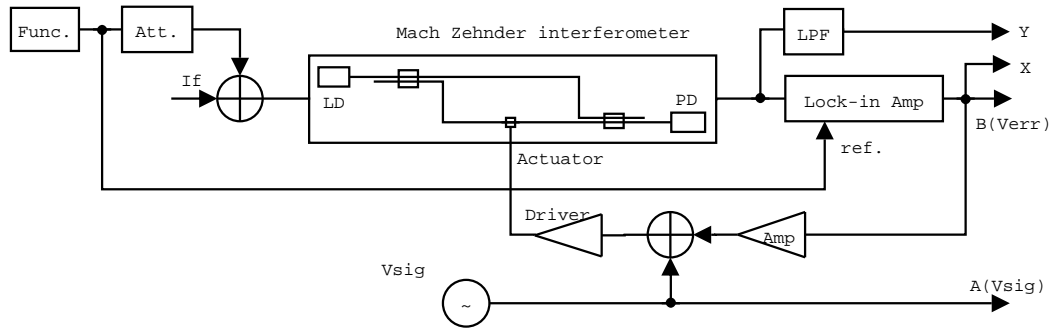


図 3.20: ペルチエ素子によるアクチュエータの校正

V_{err}/V_{sig}^P が求まる。 $\partial V_{err}/\partial \Delta L|_{\Delta L \rightarrow 0}$ より、 $\Delta L/V_{sig}^P$ が求まる。

信号 $V_{sig} = 0.1[V]$ として、周波数 $f = 0.1 \sim 100k[Hz]$ に対して求めた。このときの結果の絶対値成分を図 3.21、位相成分を図 3.22 に示す。

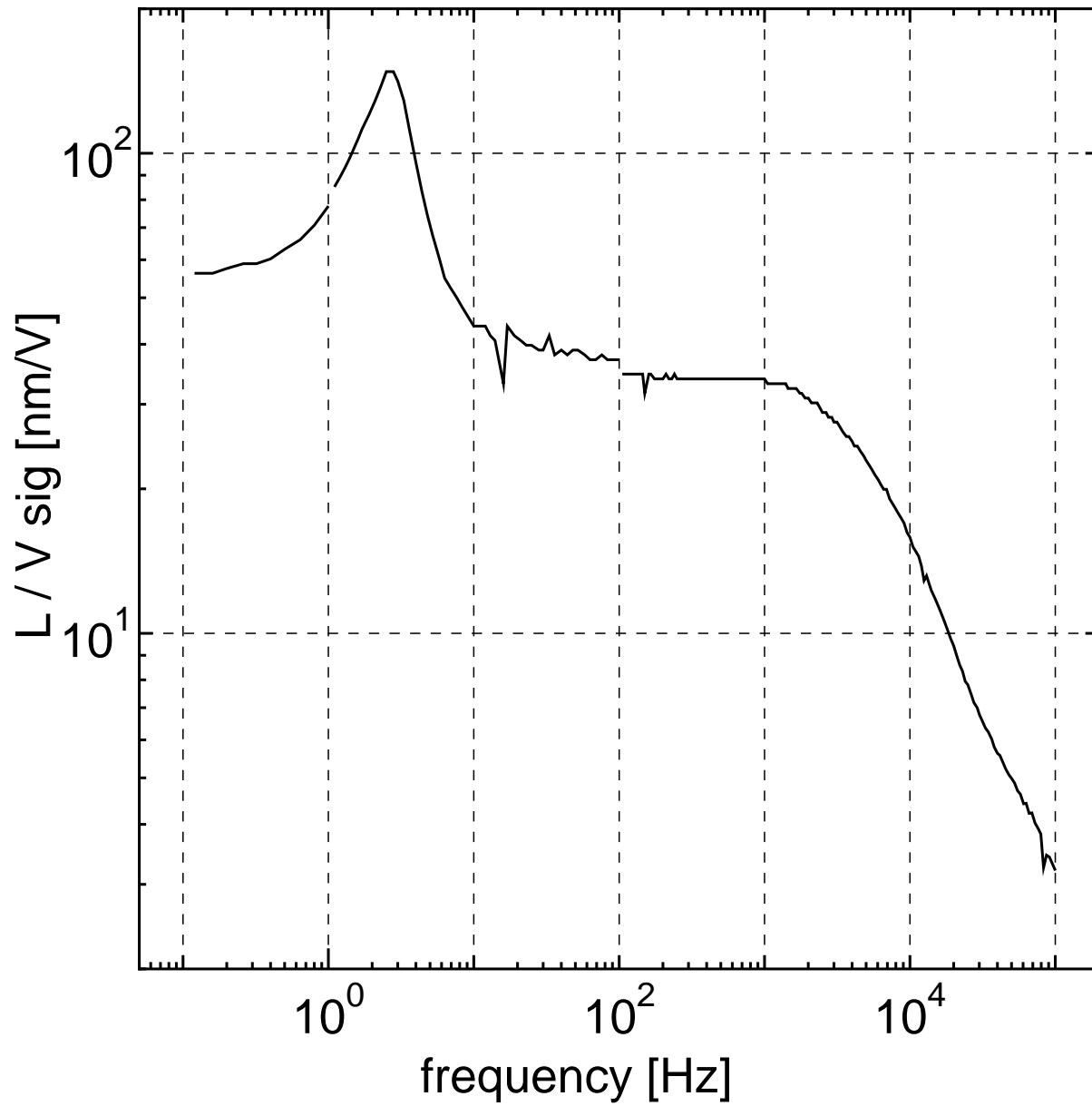


図 3.21: ペルチェ素子によるアクチュエータの校正

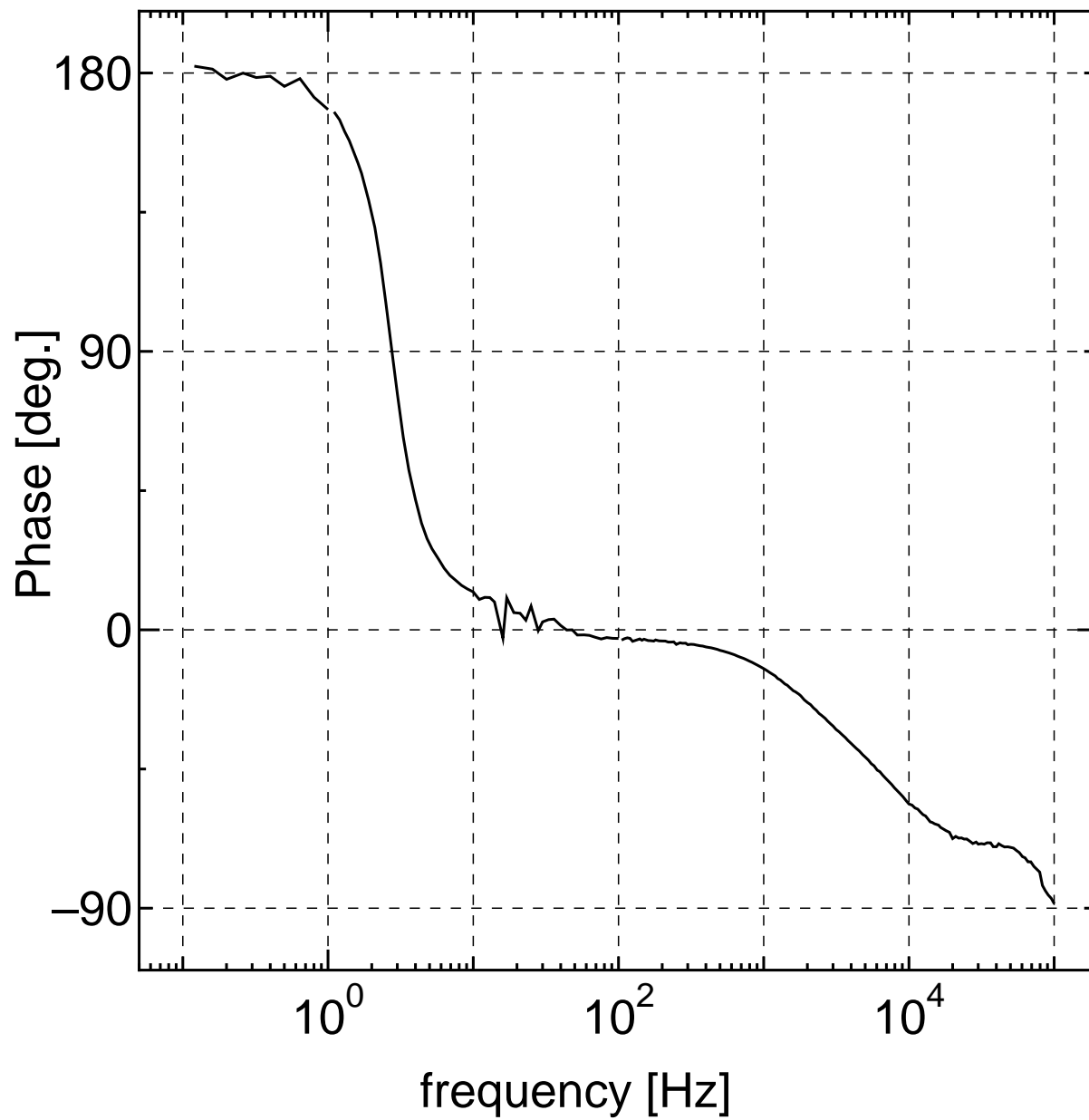


図 3.22: パルチェ素子によるアクチュエータの校正 (位相特性)

3.5.3 レーザーダイオードの校正

制御をかけた状態で、レーザーダイオードのループの信号 V_{sig}^L の変位に対する感度 V_{err} を求める。設定を、図 3.23 に示す。

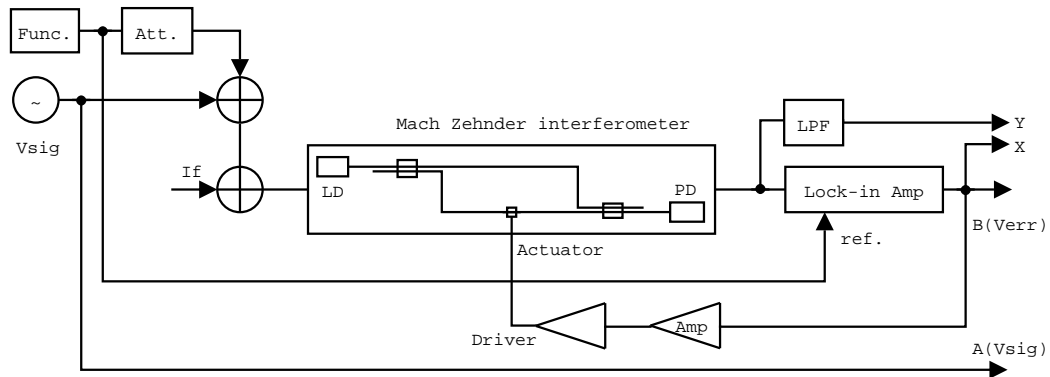


図 3.23: レーザーダイオードの校正

V_{err}/V_{sig}^L が求まる。 $\partial V_{err}/\partial \Delta L|_{\Delta L \rightarrow 0}$ より、 $\Delta L/V_{sig}^L$ が求まる。

信号 $V_{sig} = 0.08[V]$ として、周波数 $f = 1 \sim 100[kHz]$ に対して求めた。このときの結果の絶対値成分を図 3.24、位相成分を図 3.25 に示す。

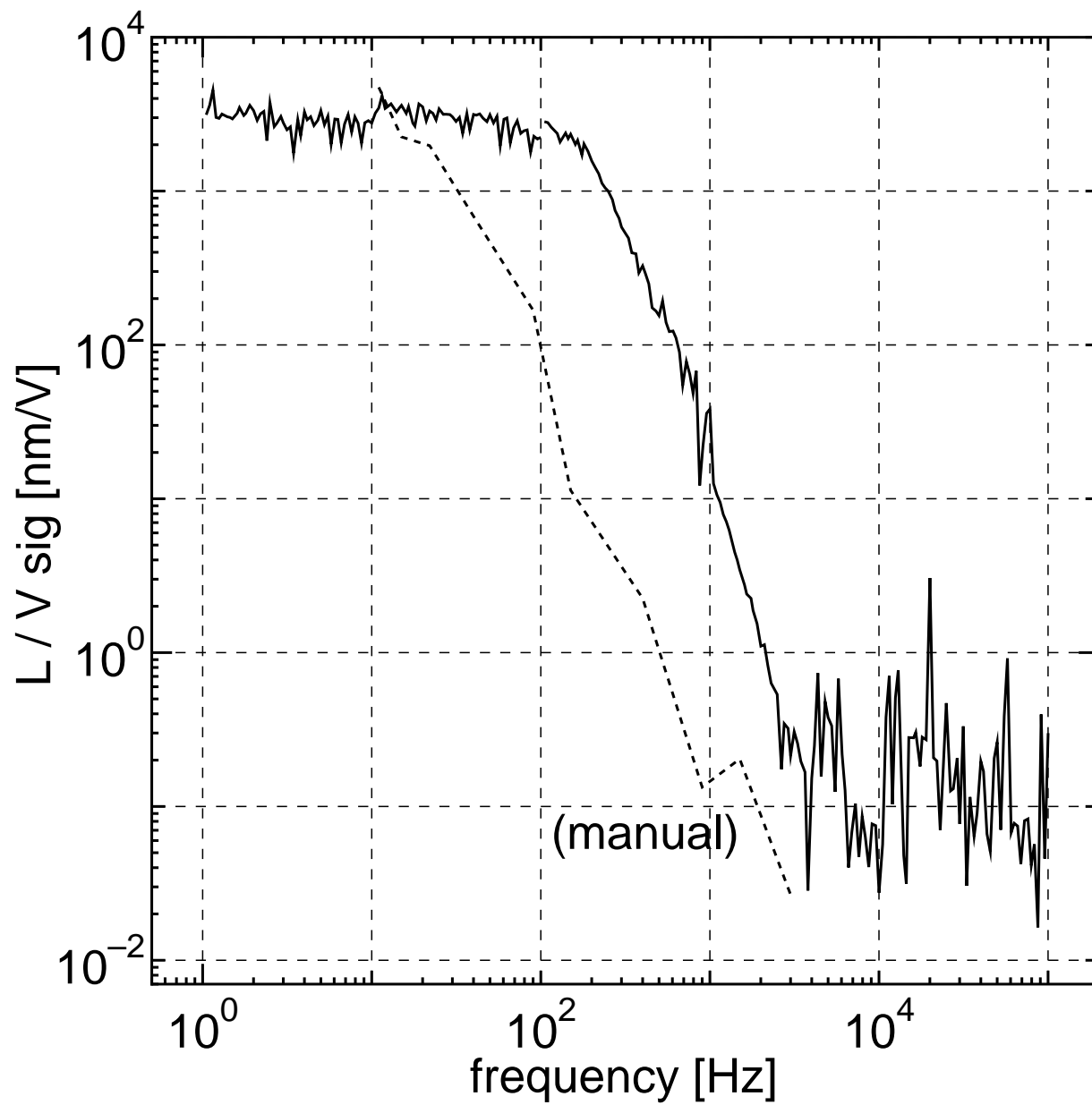


図 3.24: レーザーダイオードの校正

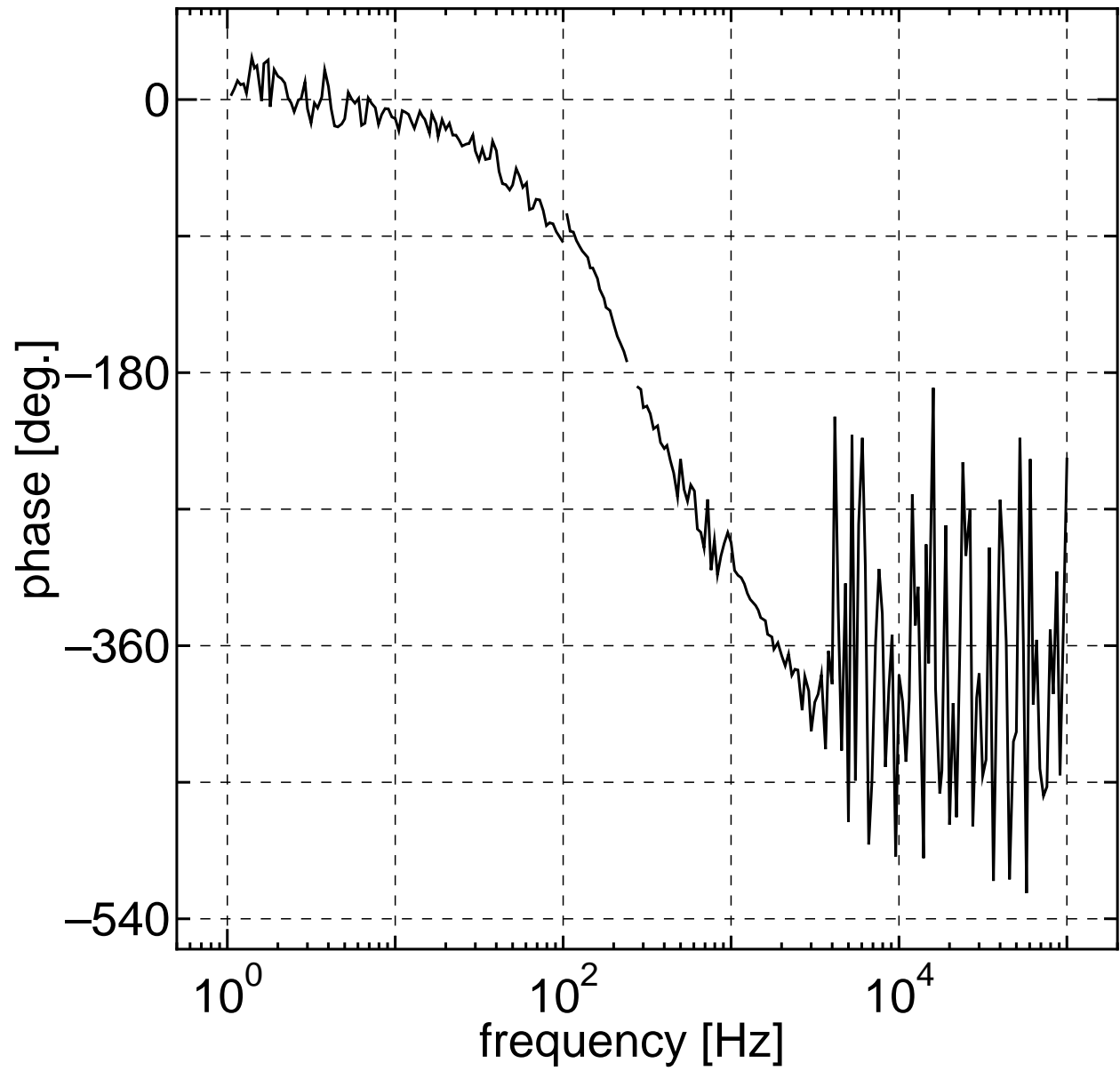


図 3.25: レーザーダイオードの校正 (位相特性)

3.6 2-loop 制御による位相差の安定化

2-loop 制御の構成を図 3.26 に示す。

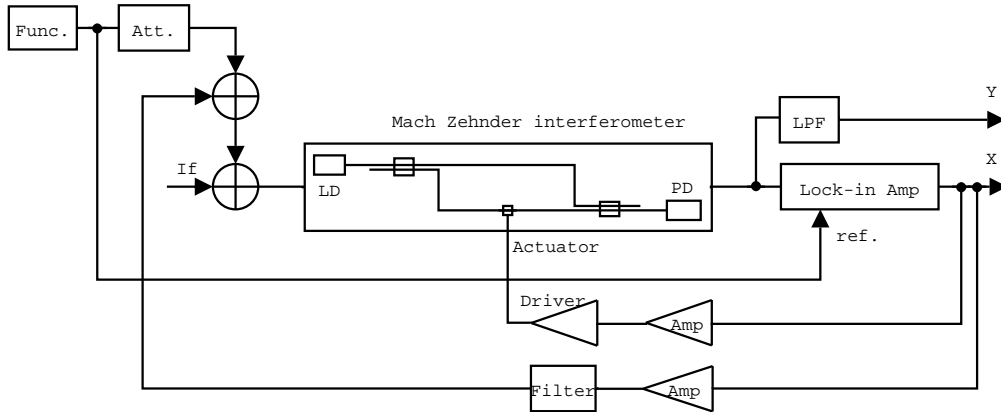


図 3.26: 2-loop 制御による位相差の安定化

干渉計の入力のスペクトルを $S_0[V/\sqrt{Hz}]$ 、2-loop 制御系において制御した時のスペクトルを $S_{LP}[V/\sqrt{Hz}]$ 、ペルチェ素子みのループの制御系において制御した時のスペクトルを $S_P[V/\sqrt{Hz}]$ とする。それぞれの制御回路のゲインを G_{LP} 、 G_P とする。

$$S_P = \frac{1}{1 + G_P} S_0$$

$$S_{LP} = \frac{1}{1 + G_{LP}} S_0$$

スペクトルは安定化されていることを示しており、 S_{LP} と $\frac{1+G_P}{1+G_{LP}} S_P$ がよく一致している。安定化の制御が動作している。

オープンループ伝達関数測定 G_P, G_{LP}

ペルチエ素子の制御系のオープンループ伝達関数測定 G_P を図 3.27 のように構成し測定した。

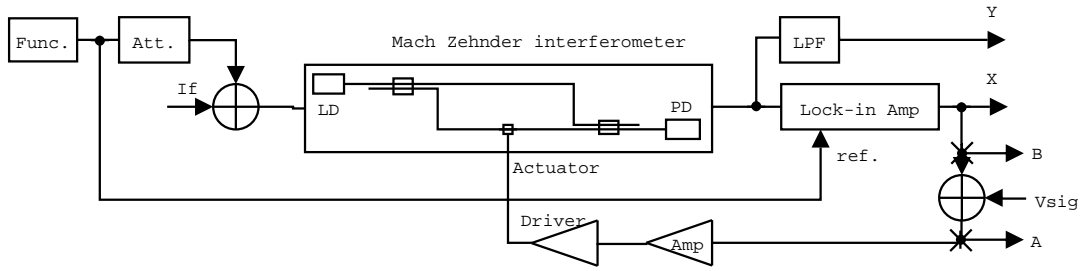


図 3.27: ペルチエ素子の制御系のオープンループ伝達関数測定 G_P

2-loop 制御系のオープンループ伝達関数測定 G_{LP} を図 3.28 のように構成し測定した。

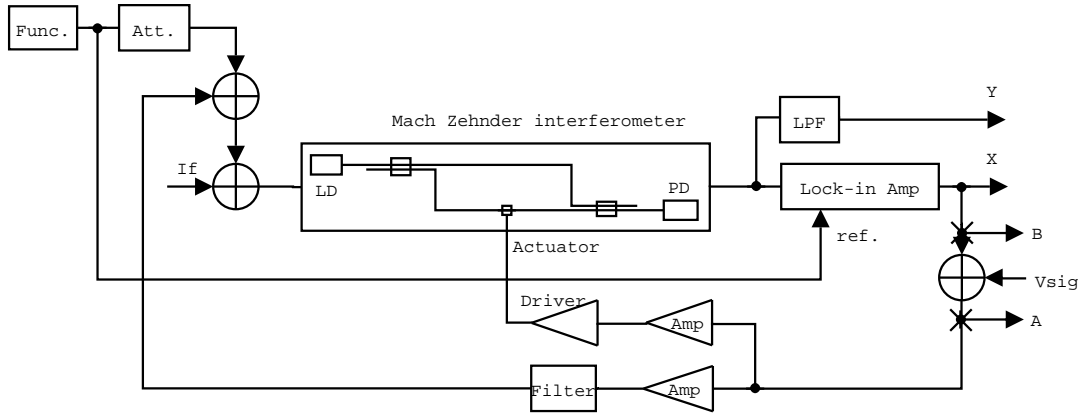


図 3.28: 2-loop 制御系のオープンループ伝達関数測定 G_{LP}

サーボ系のオープンループ伝達関数を (株) アドバンテストのサーボアナライザ R9211 で測定した。

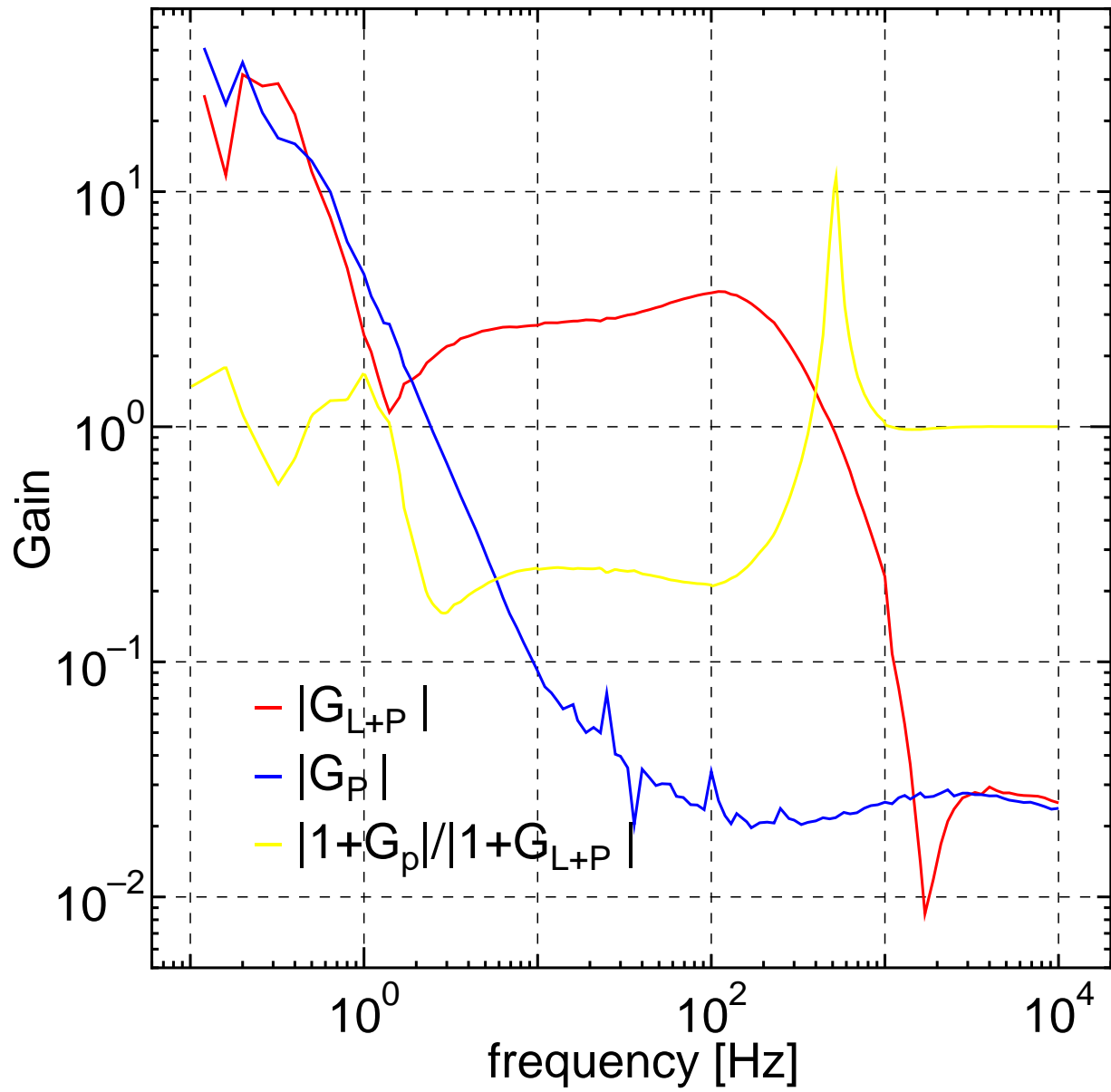


図 3.29: オープンループ伝達関数 G_P, G_{LP}

スペクトル測定 S_P, S_{LP}

ペルチェ素子の制御系のスペクトル S_P を図 3.30 のように構成し測定した。

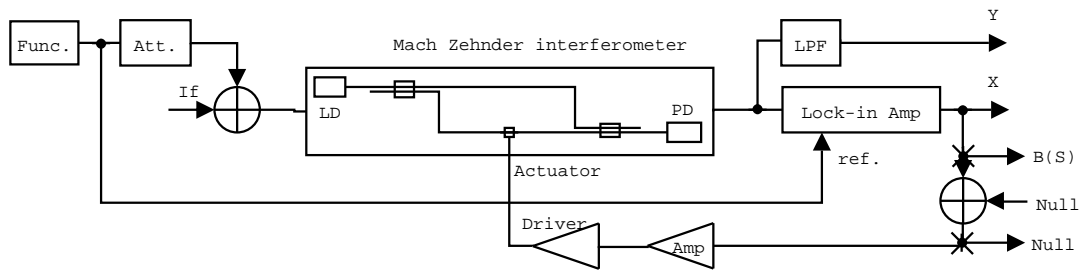


図 3.30: ペルチェ素子の制御系のスペクトル測定 S_P

2-loop 制御系のスペクトル S_{LP} を図 3.31 のように構成し測定した。

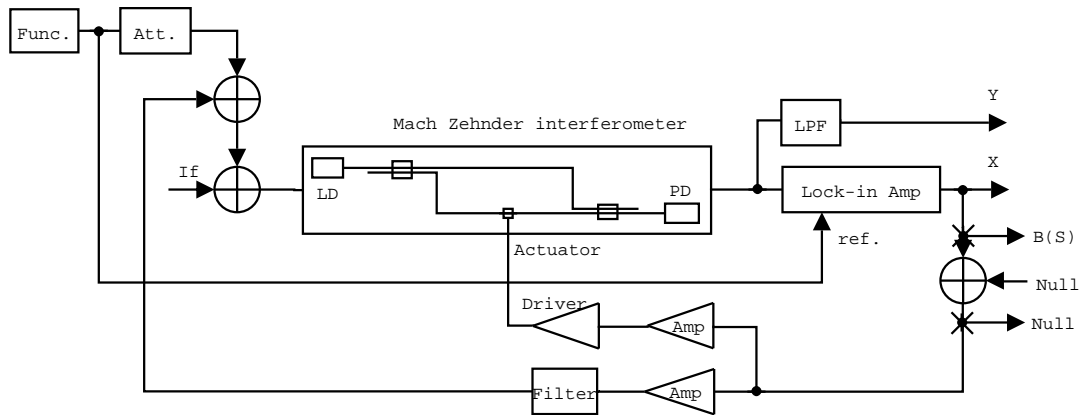


図 3.31: 2-loop 制御系のスペクトル測定 S_{LP}

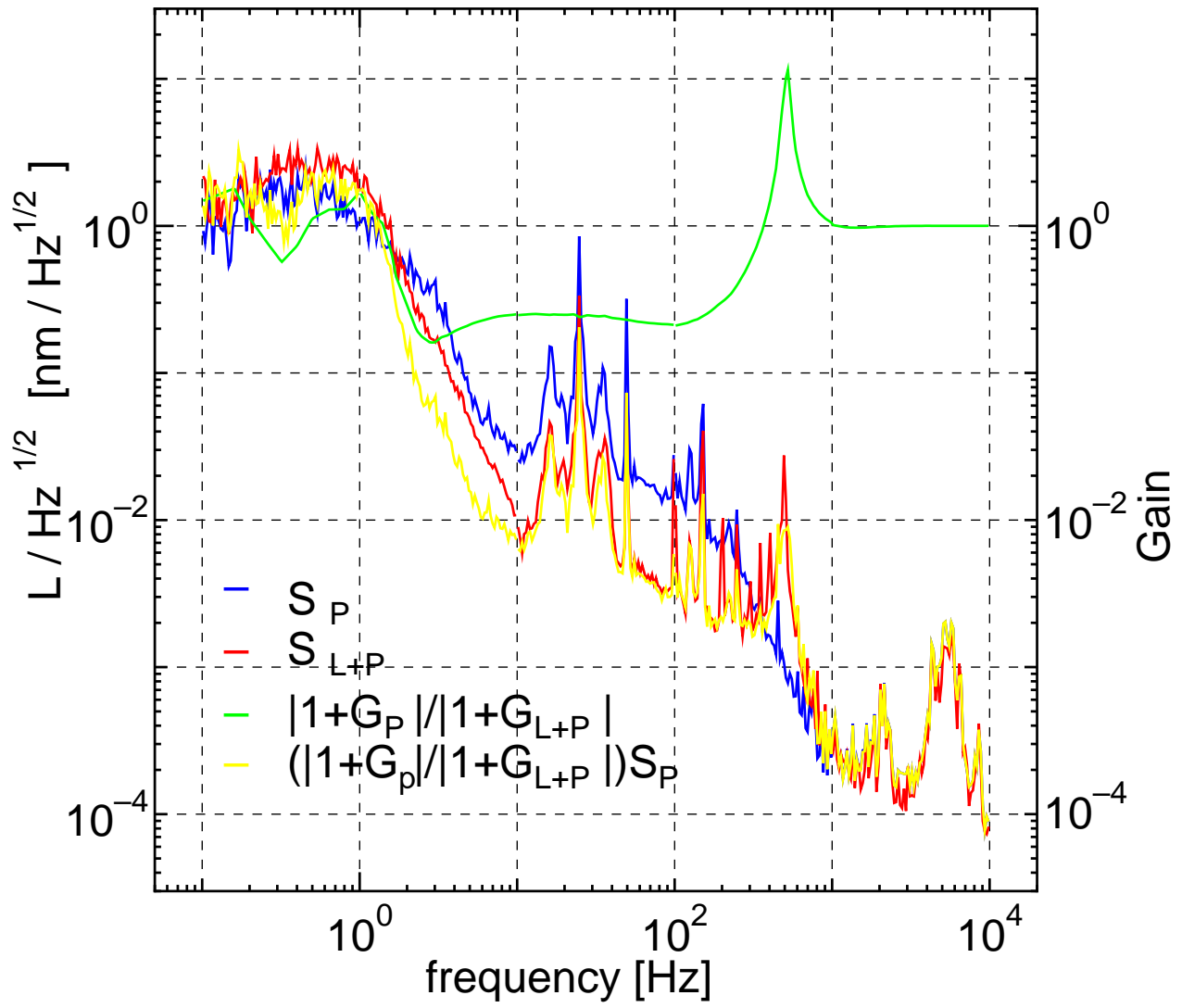


図 3.32: スペクトル S_P, S_{LP}

3.7 フィルターの改良を行った 2-loop 制御による位相差の安定化

フィルターの改良を行った 2-loop 制御による位相差の安定化について述べる。制御系の安定を保ちながら、制御ゲインを大きくするためにフィルターの改良を試みた。構成を図 3.33 に示す。

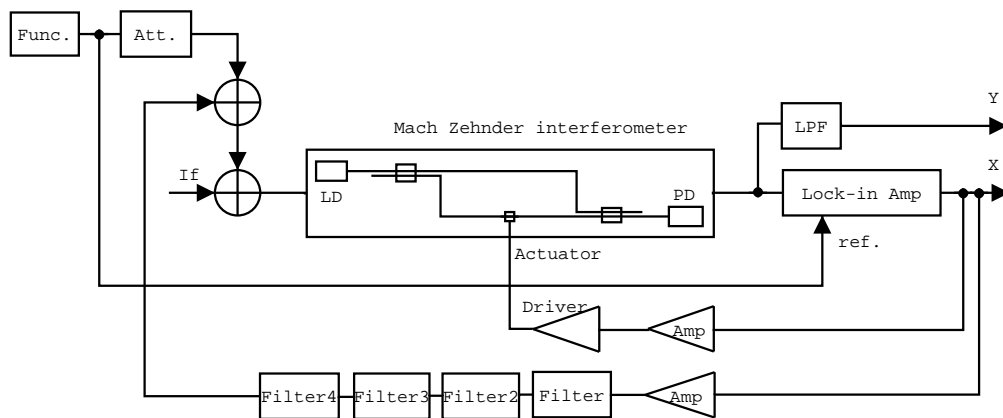


図 3.33: フィルターの改良による 2-loop 制御

フィルターを改良し、及びフィルター 2、フィルター 3、フィルター 4 を追加し、制御領域でのゲインを上げている。図 3.34 に各フィルターの特性を示す。

改良したフィルターを用いたオープンループ伝達関数を図 3.35 に示す。それぞれ点線は改良前、実線は改良後のオープンループ伝達関数を示す。2-loop オープンループ伝達関数 G_{LP} は図中の矢印のように上昇し、制御ゲインの改善を示している。

スペクトルを図 3.36 に示す。フィルター改良前の比較から、改善された 2-loop 制御が動作していることを示している。

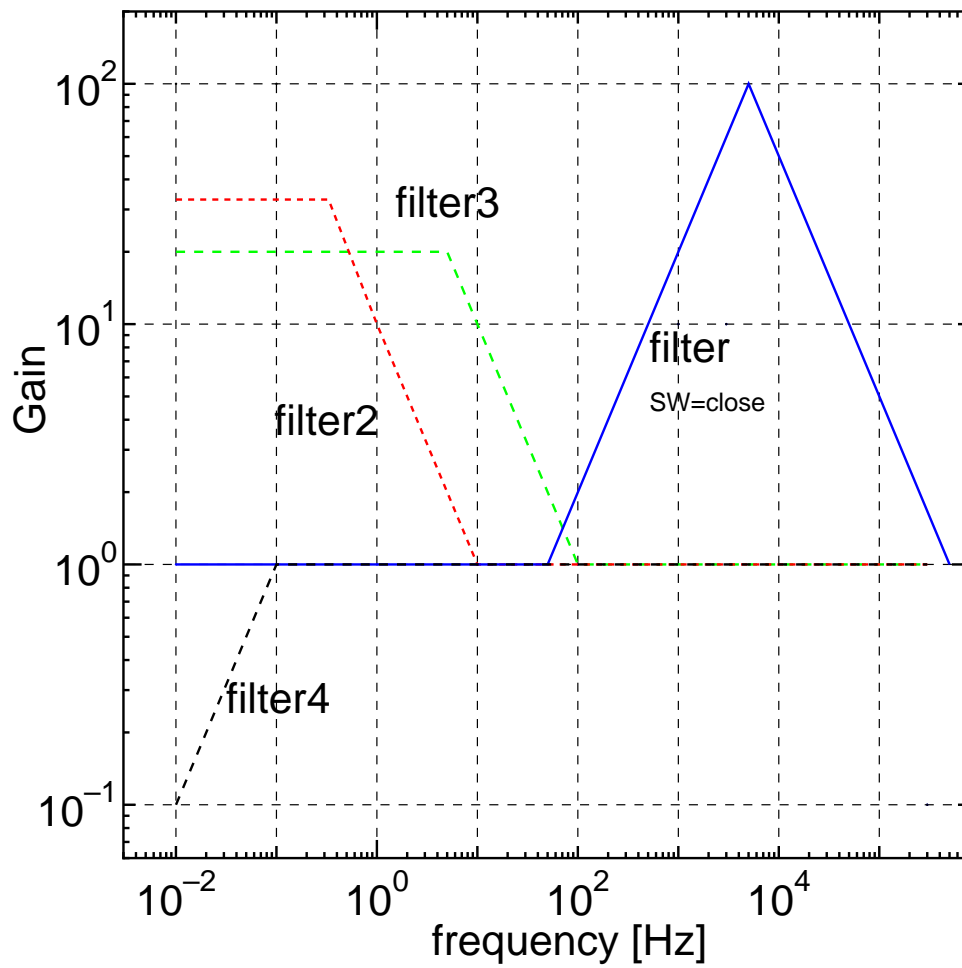


図 3.34: 改良フィルターの特性

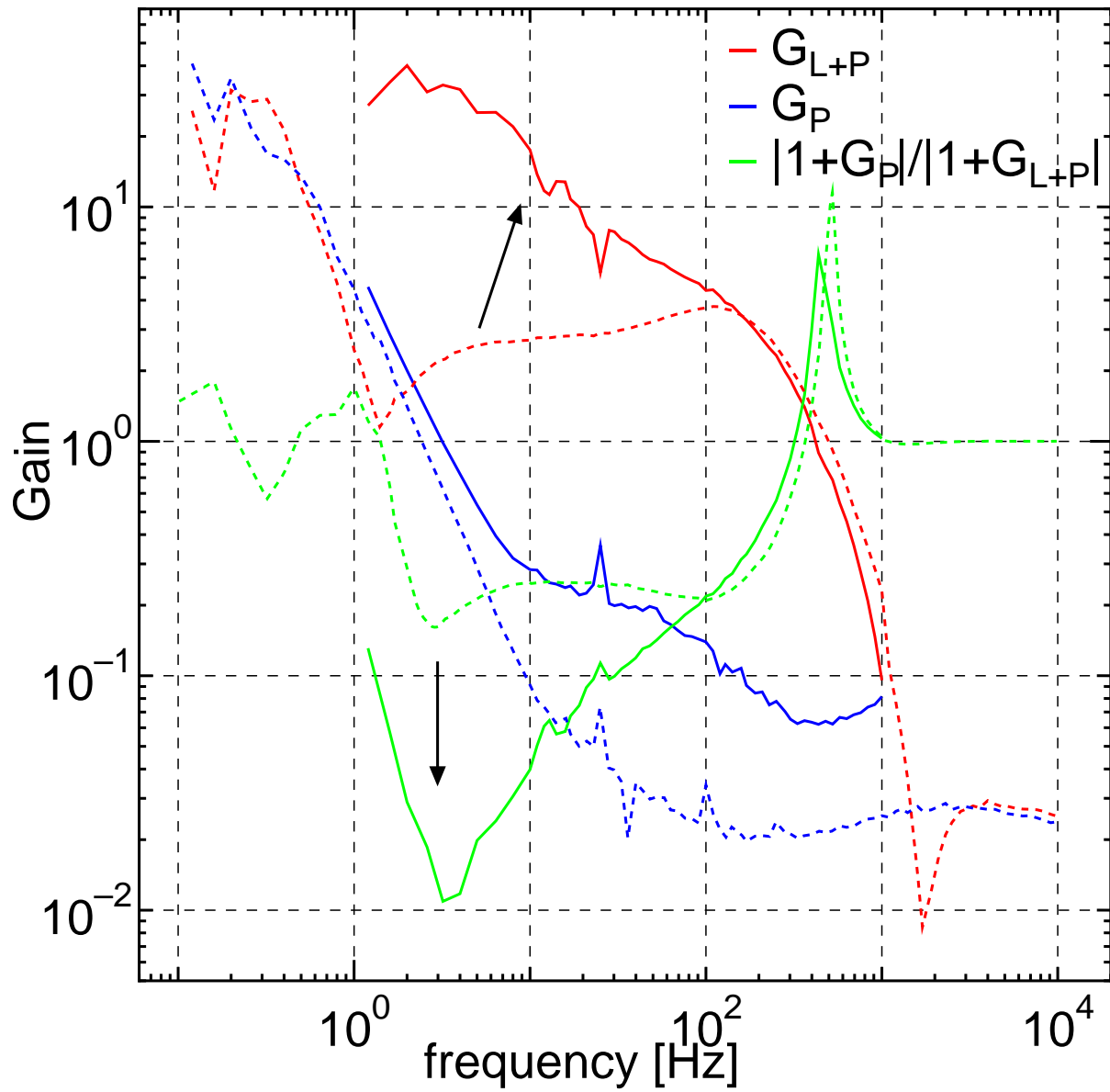


図 3.35: フィルターの改良後のオープンループ伝達関数 G_P, G_{LP}

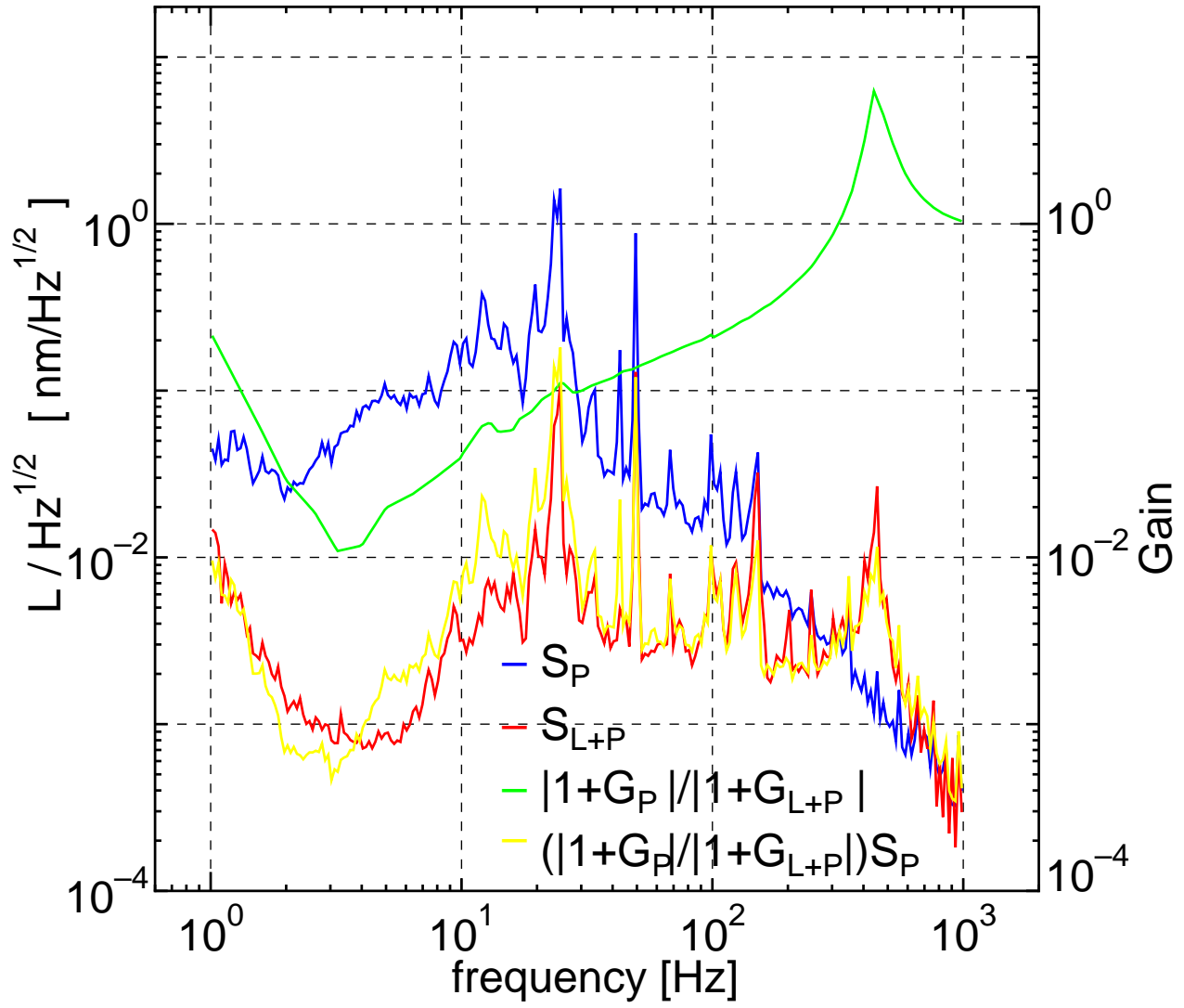


図 3.36: フィルターの改良後のスペクトル S_P, S_{LP}

3.8 雑音源の評価

雑音源の評価について述べる。図 3.37 のように構成する。

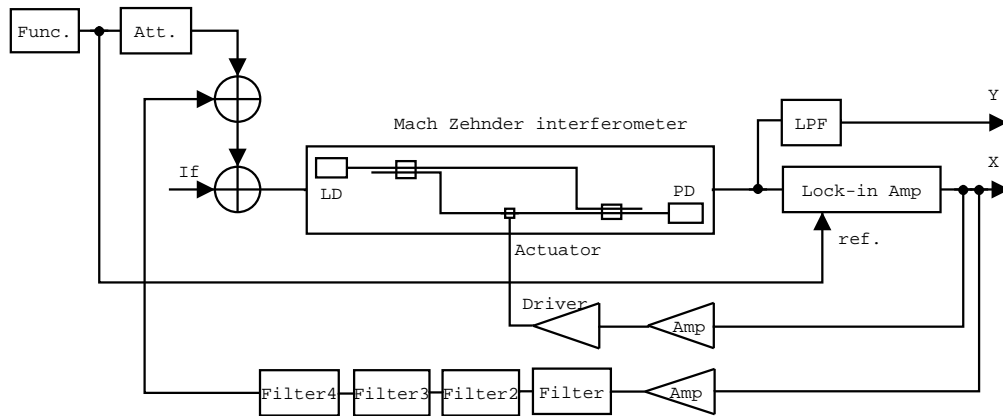


図 3.37: 雑音源の評価

回路系の雑音の S_{LP} への寄与を調べた。アンプ、フィルター、フィルター 2、3、4 を単独にスペクトル S を測定した。図 3.38 に示す。

アンプやフィルターはそれぞれ異なったゲイン特性をもっている。それぞれのゲインを F として、 $F^{-1}\omega$ より、それぞれの入口換算でのスペクトルを図 3.39 に示す。

アンプ、フィルター、フィルター 2、3、4 を一つの素子としての寄与を $S_{F(1)}$ として、各々別としての寄与を $S_{F(2)}$ として、図 3.40 に示す。

それぞれの概形はスペクトル S_{LP} と一致し、スペクトル S_{LP} は回路系の雑音が付与していることを示している。

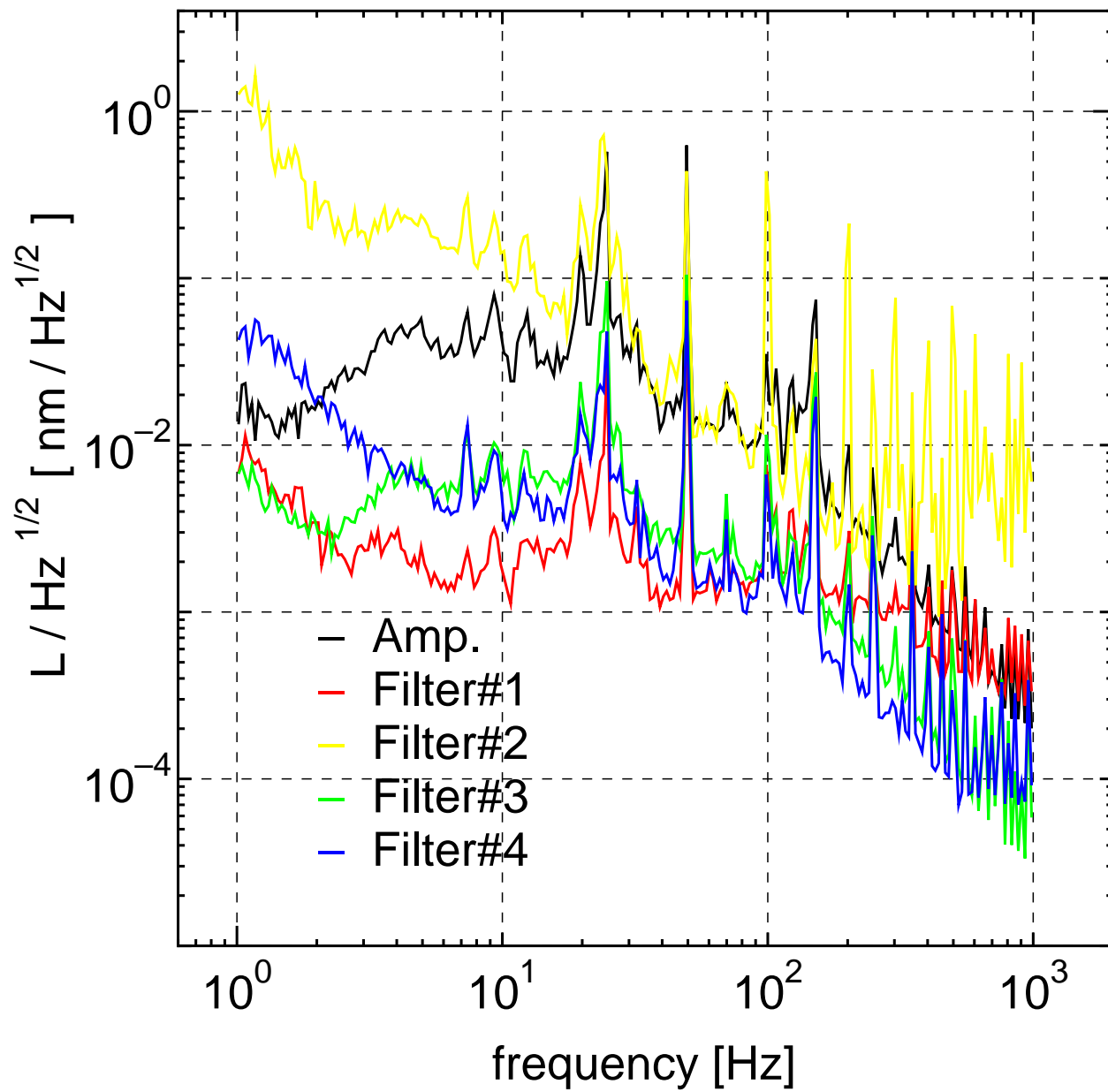


図 3.38: 回路要素の雑音 (出口)

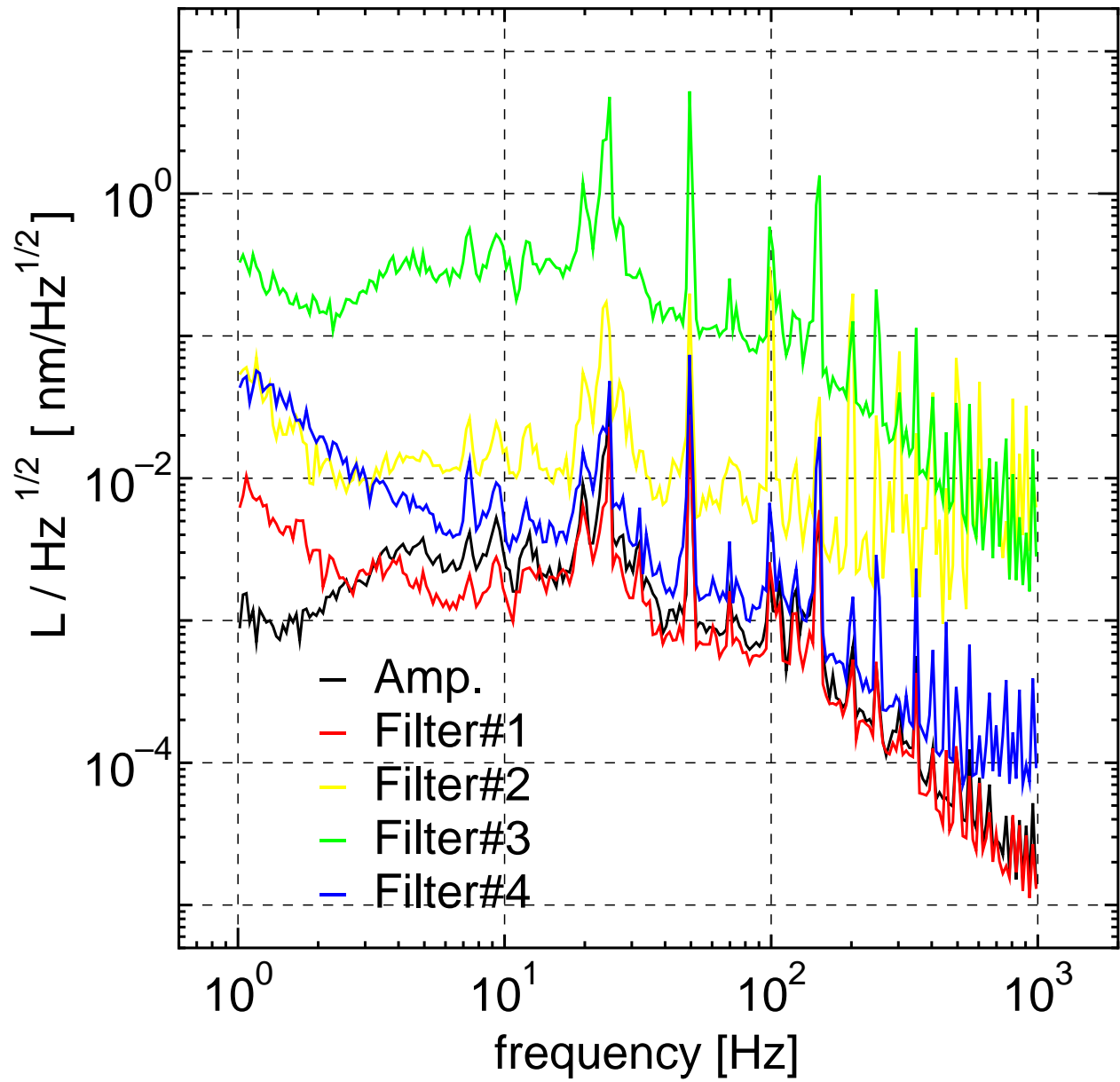


図 3.39: 回路要素の雑音 (入口換算)

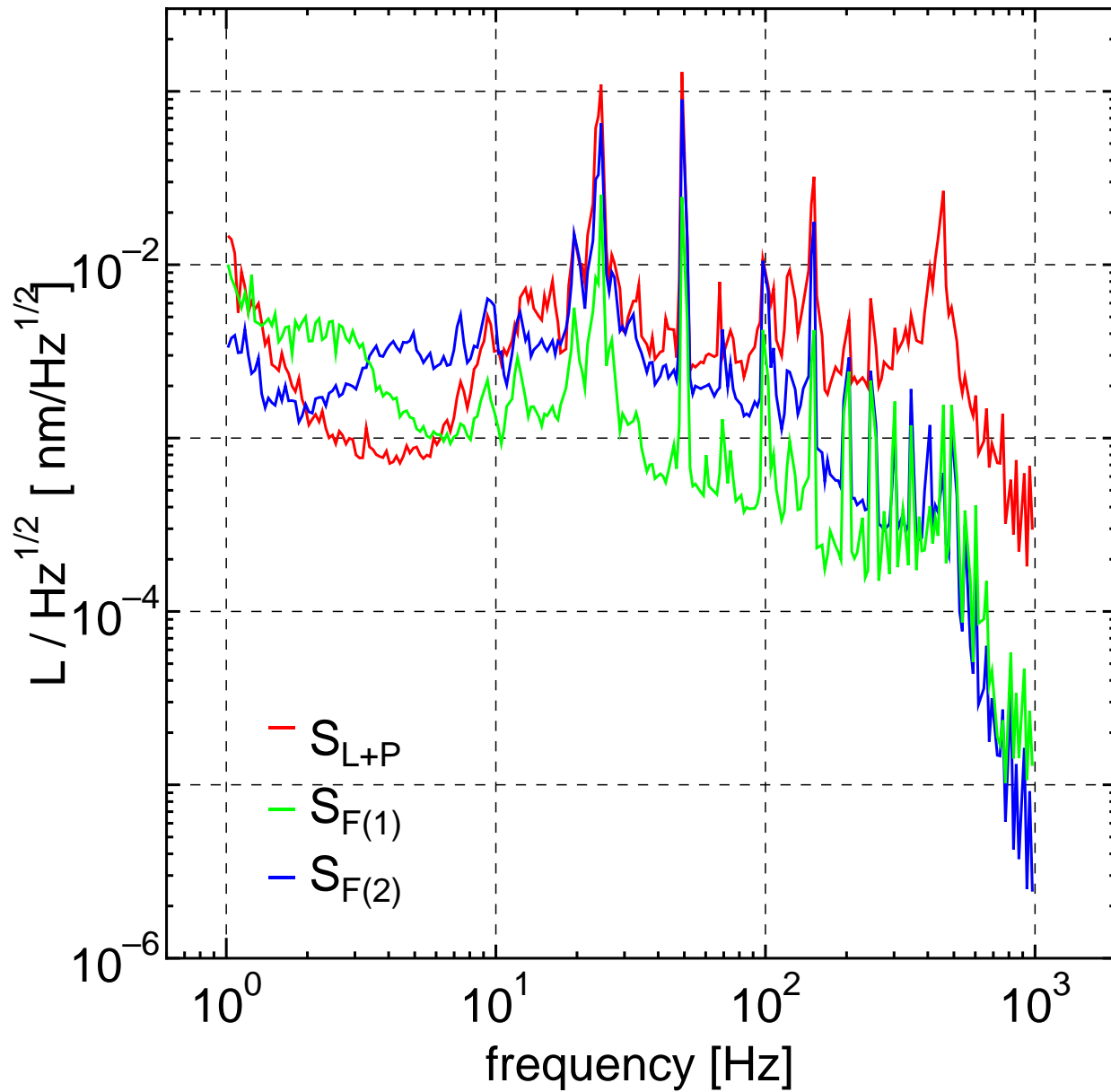


図 3.40: 回路雑音の寄与

第4章 まとめ

マッハツェンダー干渉計によるレーザー光源の周波数安定化を試みた。マッハツェンダー干渉計の出力は光路長差、光源の周波数からなる位相差による。位相差量のレーザーダイオードへのフィードバック、ペルチェ素子を用いた温度制御による光路長制御のフィードバックの2-loop制御により構成し、位相差量をPID制御により安定化させた。スペクトルの測定から制御による効果と一致し、安定化の制御が動作している。フィルターの改良により、制御量を大きくとれる。回路系の雑音はスペクトルに寄与している。

参考文献

- [1] 安東正樹 'Fabry-Perot 型レーザー干渉計重力波検出器の制御', 東京大学修士論文 (1996)
- [2] 三尾典克・大橋正健 '重力波アンテナ技術検討書' (1992)
- [3] 杉保昌彦 'レーザーダイオードの出力光の強度安定化' 特別実験レポート (1998)
- [4] 小林義徳 'Dual Fabry-Perot 共振器の安定化' 特別実験レポート (1999)
- [5] 西雄彦 'Dual Fabry-Perot 光共振器の改良' 特別実験レポート (2000)
- [6] 麻生洋一 '補助共振器を用いた Fabry-Perot 型共振器の安定化' 特別実験レポート (1999)
- [7] 関谷淳 '空間の等方性検証実験' 特別実験レポート (2000)
- [8] 小林俊一・櫛田孝司編 '測定技術' 丸善 (1999)

謝辞

本実験を行うにあたって、ほんとうに多くの方々にお世話をして頂きました。坪野研究室では興味深い研究がおこなわれています。坪野公夫教官には、ほんとうにいつも暖かい励ましを頂きました。坪野研究室助手である安東正樹氏には本実験という意欲あふれる実験テーマを与えていただきました。そして、この実験の最初から最後まで御指導、支援していただきました。そして、たくさんの助言や知識を与えていただきました。坪野研究室の沼田氏には、回路のことや、穴あけのこと、細部にわたって教示していただきました。共同実験者である坂口氏には、氏の理解の深い解析や考察により、理解を深めることができました。多くの方々の支えがあったからこそできたことであり、ここに深くお礼を申し上げます。ほんとうにありがとうございました。