

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15201

研究課題名（和文）自己参照方式超高感度レーザー光位相雑音測定技術の開発

研究課題名（英文）Ultra-high sensitivity laser phase noise measurement based on a self-referencing scheme

研究代表者

和田 雅人（Wada, Masato）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員

研究者番号：20635817

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、レーザーの位相／周波数雑音測定のための遅延干渉計及び位相雑音測定系を開発した。遅延干渉計を用いてモード同期レーザーの周波数雑音測定を実演し、その測定不確かさの推定を行った。また、基準レーザーを用いた従来の手法でもモード同期レーザーの周波数雑音測定及びその不確かさ評価を行い、両手法の測定結果が不確かさの範囲内で一致することを確認した。更に、低雑音フロアかつ測定条件の微調整が可能な位相雑音測定系を開発し、周波数逡倍器のような受動素子が付加する位相雑音を高感度に測定できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、遅延干渉計によるレーザーの位相／周波数雑音測定の結果が基準レーザーを用いる従来手法のそれと同等であることを実証した。前者の手法は、自己参照方式であるため基準レーザーが不要という利点があり、レーザーの雑音特性評価における標準的手法となる可能性がある。これは、産業分野で求められている低雑音かつ安価なレーザーの開発を後押しするものである。また、本研究で達成した位相雑音測定系の高精度化は、光ファイバセンシングにおける変位測定の測定限界を改善することに応用可能であり、構造工学、航空宇宙、地球物理学、ナノテクノロジー等の分野で望まれている歪みや相対変位の検出感度向上にも貢献できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, I developed a delay line interferometer and a phase noise measurement system for the phase/frequency noise measurement of lasers. I demonstrated the frequency noise measurement of a mode-locked laser using the delay line interferometer and estimated the uncertainties associated with the measurements. Additionally, I employed a conventional method using an ultra-stable reference laser to measure the frequency noise of the mode-locked laser. The measurement results that I obtained with the two methods were consistent within their respective uncertainties. Furthermore, I confirmed that the developed phase noise measurement system exhibits a low noise floor, provides flexibility in measurement conditions, and enables us to measure the phase noise induced in passive devices such as frequency multipliers with high sensitivity.

研究分野：光工学

キーワード：レーザー 周波数雑音 位相雑音 遅延自己ヘテロダイン法 光ファイバ 遅延線干渉計 計測システム 相互相関法

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

レーザーのスペクトル純度の指標である線幅は、レーザー共振器の Q 値に依存しており、通常は kHz から MHz 程度である。近年、光時計の研究をはじめとして、原子の狭線幅遷移を励起することが必要となっており、線幅が 1 Hz を下回る超狭線幅レーザーの開発が活発化している。その線幅の決め手である位相雑音を評価するためには、同レベルの低雑音レーザーを二台用意してそれらのビート信号を解析するという手法(ビート法)が一般的に用いられるが、これは非常に労力を要する方法である。これに対し、一台のレーザーのみを用いて自己参照方式でその位相/周波数雑音を測定する手法として、マイケルソン干渉計やマッハ・ツェンダ干渉計を用いた遅延自己干渉法がある。遅延自己干渉法では、片腕を長尺光ファイバで構成した干渉計(遅延干渉計)を用いることでレーザー光に大きな遅延を付与し、その位相/周波数雑音を増幅して高感度に検出する。しかしながら、長尺光ファイバで生じる光路長変動(ファイバノイズ)が外乱となり、レーザーの位相/周波数雑音の検出感度を制限するという課題があった。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、自己参照方式である遅延自己干渉法を用いて、レーザー一台のみでその位相雑音を高感度に測定することを目的とする。レーザーの位相雑音の検出感度を向上させるため、二台の遅延干渉計を用いてファイバノイズの相互相関を取るシステムを開発する。それぞれのファイバノイズが無相関であれば、長時間平均によりファイバノイズは相殺し、共通項であるレーザーの位相/周波数雑音を高感度に検出することが可能となる。

### 3. 研究の方法

#### (1) 遅延干渉計の開発

図 1(a)に本研究で開発した遅延干渉計を示す。その主要部分は被測定レーザーを光源とするマイケルソン干渉計であり、自己ヘテロダインビート信号の位相雑音と干渉計の伝達関数からレーザーの位相/周波数雑音を導出することができる。ここで、長尺光ファイバで生じる光路長変動を低減するため、別途基準レーザーを用意し、ファイバノイズの検出及び除去を行うシステム(赤色部分)を構築した。被測定レーザーとしては、当初波長  $1.5 \mu\text{m}$  の連続波レーザーを用いる予定であったが、本測定技術の対象となるレーザーの種類をより拡張するため波長  $1550 \text{ nm}$  帯のモード同期ファイバレーザーを採用した。そして、モード同期レーザーに遅延自己干渉法を適用するため、パルス光のチャープ補償が可能な光ファイバ遅延線干渉計を作製した。

#### (2) 位相雑音測定系の開発

位相雑音測定において相関法を適用するためには、2チャンネルでの位相差の同時測定が可能であること、信号検出の利得や帯域幅が可変であること、及び信号処理部の設定を調整できることが必要であるが、市販の位相雑音測定器でこれらの条件を全て満たすものはない。そのため、本研究ではハードウェア部、ソフトウェア部共に細部の調整が可能な位相雑音測定系を自作する。図 1(b)に試作機として開発した 1チャンネルの位相雑音測定系を示す。被測定器物を二つ用意し、それ以外の部分を極力共通にすることにより被測定器物が付加する位相雑音を測定することができる。

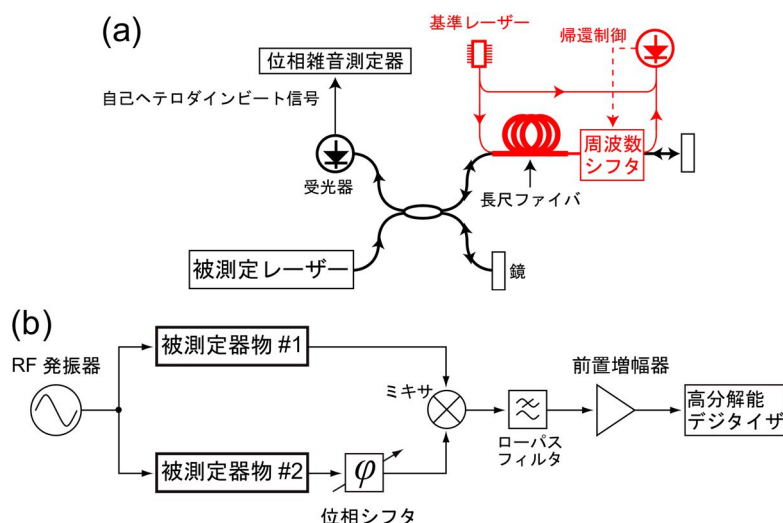


図 1 本研究課題で開発した実験系。(a) 遅延干渉計、(b) 位相雑音測定系

#### 4. 研究成果

##### (1) 遅延干渉計によるモード同期レーザーの周波数雑音測定

図 1(a)に示した遅延干渉計を用いてコムモードの自己ヘテロダインビート信号を検出した。100 kHz の分解能帯域幅で 45 dB という高い信号対雑音比のビート信号が得られた。このビート信号の位相雑音パワースペクトル密度を市販の位相雑音測定器で測定し、遅延長に対応した伝達関数を考慮に入れることでコムモードの周波数雑音パワースペクトル密度を得た。

遅延自己干渉法により測定されたコムモードの周波数雑音パワースペクトル密度の信頼性を確認するため、測定不確かさを推定した。更に、この結果の妥当性を検証するために、基準レーザーを用いる従来のビート法でもコムモードの周波数雑音パワースペクトル密度を測定すると共にその測定不確かさを推定した。これらの結果を図 2(a)に示す。遅延自己干渉法及びビート法で得られた結果は、それぞれ不確かさの範囲内で一致した。これは、遅延自己干渉法で得られるレーザーの周波数雑音が高い信頼性を持つことを意味する。また、レーザーの周波数安定度を評価できるようにするため、位相 / 周波数雑音からアラン偏差を計算するプログラムを開発した。図 2(b)は、図 2(a)の周波数雑音から計算したアラン偏差である。これらにより、開発した遅延干渉計と解析プログラムがレーザーの位相 / 周波数雑音測定に効性であることを示した。

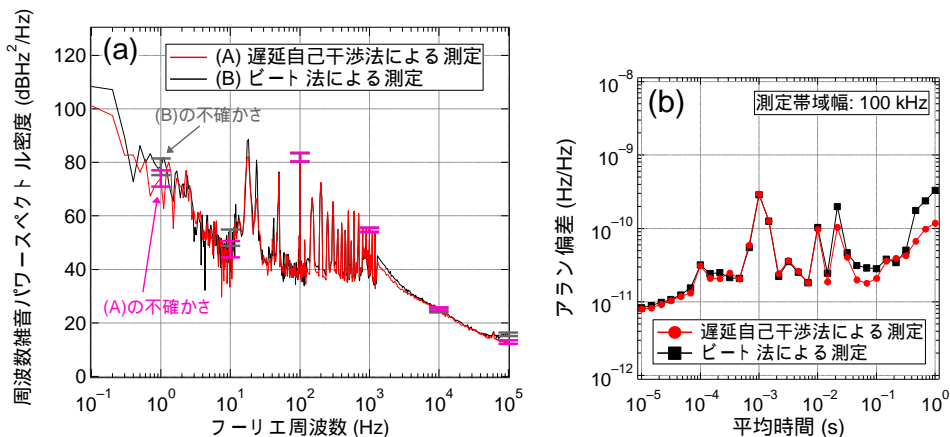


図 2 遅延自己干渉法及びビート法により測定したモード同期レーザーの雑音特性。

(a) 周波数雑音とその測定不確かさ、(b) アラン偏差

##### (2) 自作の位相雑音測定系による受動素子が付加する位相雑音の測定

ファイバノイズのような受動的な雑音を高感度に検出するためには、低雑音フロアの位相雑音測定系が必要である。そこで、光領域の位相雑音を測定する前に、受動素子であるマイクロ波周波数逡倍器が付加する位相雑音を正確に測定することを目指した。この際、周波数信号の位相検出に用いるミキサ出力の位相感度 (V/rad) の決定精度が不十分であることが従来からの課題であったため、基準周波数に位相同期されたマイクロ波を用いてミキサ出力の位相感度を校正する手法を開発した。図 1(b)に示した位相雑音測定系において逡倍器を被測定器物として位相雑音測定を行った。図 3 にその結果を示す。

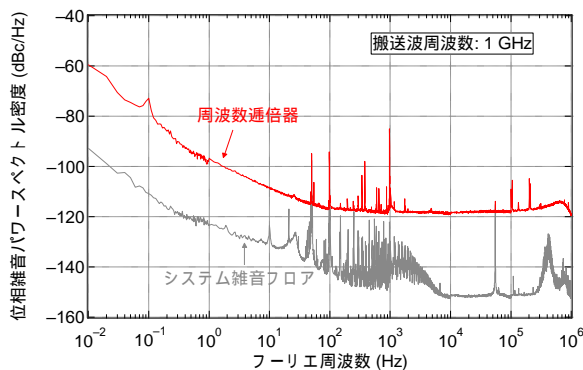


図 3 自作の位相雑音測定系により測定した周波数逡倍器の位相雑音とシステム雑音フロア。

以上の研究により、遅延自己干渉法によるレーザーの位相 / 周波数雑音測定、及び高精度な位相雑音測定による周波数リンクの性能評価を達成しており、それぞれに関連する論文を出版した。当初の目標であった相関法を適用可能な位相雑音測定系がほぼ完成しており、ファイバノイズ低減へ道筋を付けることができた。二台目の遅延干渉計の開発、及び被測定レーザーの低雑音化も進んでおり、これらを用いて自己参照方式で線幅 1 Hz 程度の超狭線幅レーザーの位相 / 周波数雑音測定を実現できると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Wada Masato, Inaba Hajime	4. 巻 59
2. 論文標題 Femtosecond-comb based 10 MHz-to-optical frequency link with uncertainty at the $10^{-18}$ level	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 065005 ~ 065005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1681-7575/ac938d	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Wada Masato, Hong Feng-Lei, Inaba Hajime	4. 巻 31
2. 論文標題 Frequency noise measurement and its uncertainty estimation of an optical frequency comb using a delay line interferometer	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 125012 ~ 125012
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ab9f1e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 和田 雅人、小林 拓実、赤松 大輔、安田 正美、稲場 肇
2. 発表標題 光時計 - UTCリンクのための18桁級光周波数計測
3. 学会等名 一般社団法人レーザー学会学術講演会第42回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田 雅人、稲場 肇
2. 発表標題 光格子時計とUTCの周波数比較のための不確かさ $10^{-18}$ 台の光周波数計測
3. 学会等名 東北大学電気通信研究所 共同プロジェクト研究会「コヒーレント光・マイクロ波融合通信・計測システムに関する研究」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田 雅人、小林 拓実、赤松 大輔、安田 正美、保坂 一元、稲場 肇
2. 発表標題 光時計の周波数計測の不確かさを低減
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

レーザー学会第42回年次大会論文発表奨励賞，一般社団法人レーザー学会，和田 雅人，2022/05/31
---

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------