

平成 30 年 6 月 13 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K18082

研究課題名(和文)長距離光ファイバ伝送路安定化による高精度キャリア分配システムの開発

研究課題名(英文)Development of precise carrier dissemination system by long optical fiber stabilization

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・研究員

研究者番号：20635817

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：長距離光ファイバを用いた精密周波数分配システムの開発を目指した。光ファイバ型干渉計に誘起される位相雑音は、周波数分配精度を制限した。この干渉計の雑音は、超安定環境によって極限まで低減された。密閉、真空、温度安定化、音響遮蔽、および除振は干渉計の雑音を低減するのに有効であることがわかった。達成された精度はこれまで報告されている中で最高のものである。このシステムにより、遠く離れた多くの利用者との間で、ほぼ劣化のない正確な周波数を共有することが可能となる。

研究成果の概要(英文)：We developed a precise frequency dissemination system using a long optical fiber. The phase noise induced in the optical fiber type interferometer limited the frequency dissemination accuracy. This interferometric noise was extremely reduced by an ultra-stable environment. It was found that sealing, vacuum, temperature stabilization, acoustic shielding, and vibration isolation are effective to reduce the interferometric noise. The achieved accuracy is the best that has been reported so far. This system enables us to share precise frequencies with little deterioration with many distant users.

研究分野：光工学

キーワード：計測システム 光伝送技術 超精密計測 時間周波数 光ファイバ 干渉計

## 1. 研究開始当初の背景

光技術の発展により、精密な光周波数の測定が可能となり、原子の光領域の遷移を基準として利用する光時計の研究が進展した。光時計の精度は、現行の「秒」の定義であるセシウム原子時計を凌ぐため、国際度量衡委員会は秒の再定義を検討開始した。定義の改定にあたっては以下2つの条件、1)光時計の性能の向上が飽和していること、2)各地に点在する光時計の精度を損なうことなく比較する手法が確立していること、が求められる。特に2)に関しては、標準の同等性の確認、信頼性の確保などの観点から、実験的に複数機関での一致性を実証しなければならないことを意味し、比較技術の高度化が求められるようになった。

衛星を使った時間周波数比較技術は古くから「秒」の共有に用いられているが、光時計の比較に対しては精度が不十分である。これを解決する手段として、欧米各国では敷設された長距離光ファイバを用いて基準信号を遠隔地へと伝送する研究が急速に進展した。安定化技術により高精度な伝送が可能となり、遠く離れた研究機関同士で光時計の周波数を比較する実験が試験的に始まりつつある。

光ファイバを用いた周波数伝送では、周囲の温度変動によるファイバの伸縮及び屈折率変動、音響振動により生じる位相雑音(ファイバノイズ)が信号精度の劣化に起因する。伝送路由来の雑音を検出し、送信信号自身の位相をフィードバック制御することにより、高精度な信号を遠隔地へと伝送可能となる。現行の光キャリア伝送では、局Aから他局へと一方的に信号を送信する方式が主流となっている。局Aの信号を分配伝送する技術は開発されているが、伝送可能な信号は局Aのものただ一つだけなので、ネットワーク化に対して不都合である。

一方、光時計の比較においては、遠く隔てられた多地点間でそれぞれの時計レーザー(時計遷移分光用の狭線幅光源)を共有することが研究の幅を広げる。これは、高精度な光時計同士を比較するとき、レーザーノイズの同相除去を行うことが必須となるためである。また、現在の秒の定義であるマイクロ波周波数標準では光時計の詳細な評価ができないため、同レベルの信号同士の安定度を分離して評価することが重要となる。安定度の分離には、3つの信号を用意してそれぞれの比較測定を行う必要がある。これらの理由から、光キャリア伝送を一方的な伝送方式から、双方向多地点分配方式へ拡張することが課題となっていた。

## 2. 研究の目的

光ファイバを用いた3局間の同時比較を実証する。本研究ではこれら周波数信号の安定性を評価するための尺度として2標本標準偏差であるアラン標準偏差(周波数安定度)を

用いる。また、本研究を通して、伝送信号の信号対雑音比(SNR)を最適化する光増幅器の設置条件(利得、配置間隔)や、SNRと位相同期の持続時間との関連性という光キャリア伝送に有益な特性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

実験室内に敷設したファイバ(数百km)を隔てて離れた3局間の信号をそれぞれ比較し、個々の安定度を導出する。また、研究フェーズを光源の作製、長距離伝送システムの検討、中間局の開発の3段階に分け、個々のフェーズで生じた課題を検討する。

## 4. 研究成果

### 光源の作製

まずは、光キャリア伝送に用いる光源の安定化に取り組んだ。伝送路の雑音を補償するためには、往復伝送光の自己ヘテロダインビートを取る必要がある。コヒーレンス確保の観点から、100kmを超える長距離伝送においては、主光源のスペクトル線幅を1kHzよりも十分小さくすることが求められる。そのため、ULE(Ultra-Low Expansion)光共振器にPDH(Pound-Drever-Hall)法を用いて直接ロックされた1.5 $\mu$ m半導体レーザーを利用する方式を採用した。本光源のシステムを構築したが、出力部分の光ファイバがレーザー光に強度雑音を付与することが判明し、その改善に取り組んだ。出力部分をよりシンプルな構成とすることで強度雑音の低減に成功し、光源を完成させた。

### 長距離伝送システムの検討

並行して、長距離伝送における光増幅方式を検討した。ファイバ長が100km以上になると伝播損失を補うため、光増幅を行うことが必須となる。光増幅器としては、利得20dBが得られる双方向EDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)を採用した。線幅1kHzの光源を用いて、120kmの距離でEDFAによる光増幅が光キャリア伝送の不安定性の主因とならないことを確認した。

### 中間局の開発

そして、本研究の要である中間局の開発に着手した。中間局は、局Aおよび局Bから伝送された信号をそれぞれ抜き出し、伝送路で受けたファイバノイズを補償する役割を持つ。ここで、光ビート干渉計の出力信号に周囲の環境変動が影響することがわかった。長距離光ファイバ伝送路において受けるファイバノイズは雑音補償システムによって除去される。しかし、光ビート干渉計において生じるファイバノイズはシステムノイズフロアとなり、除去不可能である。これは、信号光と参照光が異なる経路を通過することに起因する。光時計の研究が急速に進展し、さらに精度が向上したこともあり、この干渉計のノイズフロアが解決すべき課題となっ

た。

干渉計の雑音を低減するために、超安定環境を用意した。超安定環境は、密閉、真空、温度安定化、音響遮蔽、除振によって実現した。超安定環境は、10 mファイバに誘起される位相雑音パワースペクトル密度および周波数不安定性を大幅に低減した。10 mという長さは、光ビート干渉計を構築するファイバの長さと同程度である。また、超安定環境を起点とし、そこから特定の条件を取り去ることで、それぞれの環境がどの程度の位相雑音および周波数不安定性(アラン偏差)を与えているかについて調べた。実験結果を図1,2に示す。(我々の)実験室環境とは、環境対策なしの条件を意味する。密閉・真空・温度安定化・音響遮蔽・除振、いずれの環境も位相雑音および周波数不安定性の低減に有効であることがわかった。そして、究極的な周波数安定度を目指すのであれば、超安定環境が必要であることがわかった。

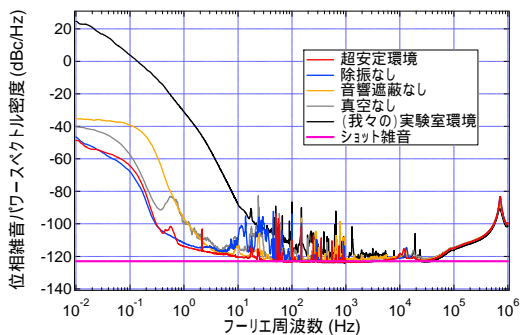


図1 10 mの光ファイバに誘起される位相雑音(光キャリア波長: 1.5 μm)

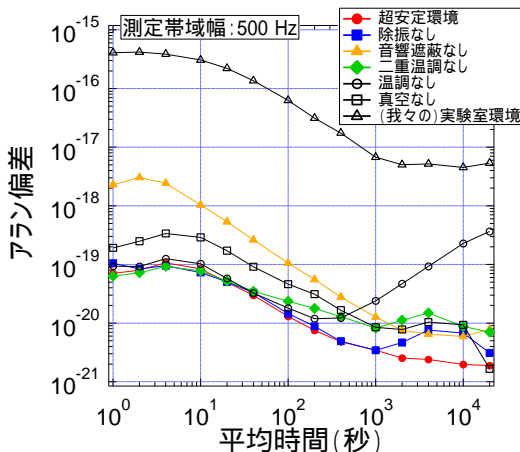


図2 10 mの光ファイバが付与する周波数不安定性(光キャリア波長: 1.5 μm)

ここまでの実験結果により、中間局において生じる周波数伝送の不安定性は十分低減可能であるとの知見が得られた。具体的には、干渉計に真空環境と温度制御を施すことで、現在の光時計の研究に実用化できる周波数伝送精度を確保できることがわかった。この情報を活用し、小型の低雑音光ファイバ型干渉計を作製している。当初目標に掲げた光キャリア分配システムの評価には至っていな

いが、そのための道筋を示すことができた。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計4件)

稲場 肇、大久保 章、中嶋 善晶、和田 雅人、光コムの周波数安定度の追求、オプトロニクス、査読無、36巻、10号、2017、87-93、

<http://www.optronics.co.jp/magazine/opt.php?year=2017&month=10>

稲場 肇、大久保 章、和田 雅人、光周波数コムの安定度向上と評価法、レーザー研究、査読有、46巻、2号、2018、61-66、

[http://www.lsj.or.jp/LSJHP/LSJhtml/LSJ\\_Components/Download\\_files/RLE\\_contents/46/4602.pdf](http://www.lsj.or.jp/LSJHP/LSJhtml/LSJ_Components/Download_files/RLE_contents/46/4602.pdf)

K. Kashiwagi, Y. Nakajima, M. Wada, S. Okubo, H. Inaba, Multi-branch fiber comb with relative frequency uncertainty at  $10^{-20}$  using fiber noise difference cancellation, Optics Express, 査読有, Vol.26, No.7, 2018, pp.8831-8840, DOI:10.1364/OE.26.008831

M. Wada, S. Okubo, F.-L. Hong, H. Inaba, Detection and evaluation of fiber noise induced in ultra-stable environments, 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), 査読有, in press, 2018

〔学会発表〕(計3件)

和田 雅人、大久保 章、稲場 肇、光周波数比較において環境が光ファイバ伝送系に与える影響、第77回応用物理学会秋季学術講演会、2016年9月15日、朱鷺メッセ(新潟県)

和田 雅人、大久保 章、洪 鋒雷、稲場 肇、環境安定化によるファイバノイズの低減、第78回応用物理学会秋季学術講演会、2017年9月5日、福岡国際会議場(福岡県)

M. Wada, S. Okubo, F.-L. Hong, H. Inaba, Detection and evaluation of fiber noise induced in ultra-stable environments, 2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018), July, 2018, Paris, France

〔図書〕(計0件)

なし

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

なし

取得状況(計0件)

なし

〔その他〕

周波数計測研究グループ 光周波数コム（光コム）の発生、制御、応用  
<https://unit.aist.go.jp/ripm/freqmeas/>

6．研究組織

(1)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・研究員

研究者番号：20635817