

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 2 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560519

研究課題名(和文) 双方向波長多重信号による長距離光ファイバの位相安定化技術の研究

研究課題名(英文) Study on Phase Stabilization of Long Optical Fiber by Bidirectional WDM

研究代表者

雨宮 正樹 (Amemiya, Masaki)

独立行政法人産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究室長

研究者番号：20392582

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：高精度タイミング信号は計測、通信、科学等の多岐の分野において同期のために必要であり、光ファイバによる高安定な伝送が期待されている。課題は光ファイバ周囲の温度変動、機械的振動等による位相変動をいかに抑えるかにある。そこで本研究では、一心の光ファイバに双方向に異なる波長の制御用信号を送送させ、光ファイバの位相変動量を送信側で検出し、高精度に位相制御するシステムを検討した。このシステムはファイバ長を固定化したシステムであり(=プラットフォーム)、このプラットフォーム上に各種の信号を波長多重により伝送することが可能である。

研究成果の概要(英文)：Accurate timing signal is important in a wide variety of fields, such as measurement, communications, and science. In particular, ultra stable reference signal distribution by optical fiber is a key for synchronization systems. In those systems, fiber length should be stabilized against ambient temperature change or mechanical fluctuation. In our system, one pair of wavelengths in the WDM-based link is used as round trip signals to detect phase deviation. The phase error is minimized by a fiber stretcher driven by a feedback loop. This fiber length stabilization system yields a stable platform to which arbitrary signals can be added by dense-WDM.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測工学 情報通信工学 クロック伝送 タイミング信号 同期技術 光ファイバ

1. 研究開始当初の背景

時間・周波数標準の分野では、光格子時計に代表される次世代の高精度な信号源が開発されつつある。これに伴い、信号の劣化を抑えた遠隔地への分配供給技術、周波数比較技術が重要になっている。また、電波天文学、加速器、超高速光通信などの分野においても、同期用のタイミング信号の遠隔地への安定な供給技術が必要となりつつある。しかしながら、従来の全地球測位システム (GPS) を仲介した方法や静止衛星利用による方法では、電離層や大気中の伝播があるため、上記の分野において、高安定な標準信号やタイミング信号の伝送は難しい。これに対し、光ファイバを利用した方法では、電離層や大気中の伝播がなく誤差要因が少ないため、高精度な伝送が行える可能性がある。

2. 研究の目的

光ファイバによる標準信号やタイミング信号の伝送では温度変動や機械的な振動などにより物理長や屈折率が変化するため、信号の位相は変動し精度は劣化する。そのため、本研究では高周波 (RF) 領域の標準信号やタイミング信号などを 100 km 超の遠隔地へ高安定に伝送するために必要な光ファイバの位相安定化技術について研究を行う。更に、時間・周波数、長さ、電圧などの標準信号、電波天文、加速器、超高速通信などの分野におけるタイミング信号、及び地震情報、精密時刻など、多種用途の信号を波長多重 (WDM) して送受信することを可能にする研究を行う。

3. 研究の方法

(1) 光ファイバの位相安定化を行う方法には、誤差信号を RF 発振器に戻す電氣的補償法と光ファイバ長を直接制御する光学的補償法が用いられる。本研究では標準信号やタイミング信号など、多種用途の信号を WDM 波長多重して送受信することを可能にするため、光学的補償法を採用し位相補償システムの研究を行う。本システムは図 1 に示すように、高密度波長多重 (D-WDM) フィルターと一心の光ファイバを用いて双方向に異なる波長で RF 信号を伝送させ、位相変動量を送信側で検出し、応答速度の速いピエゾ素子駆動の微調用ファイバストレッチャーと長距離ファイバの位相変動に対応可能な粗調用ファイバスポールの 2 重の制御ループで高精度に位相制御を行う。

(2) 微調用ファイバストレッチャーによる位相補償では、図 2 の破線部分に示すように発振器からの 10 GHz 信号  $f_{cont}$  で電気 - 光変換器 (E/O 変換器) の分布帰還型レーザダイオード (DFB-LD) を変調する。DFB-LD の波長は  $\lambda_{c1} = 1550.918 \text{ nm}$ 、出力は 6.4 dBm である。RF 変調された光信号は D-WDM フィルター、2 台のファイバストレッチャー、400 m のシ

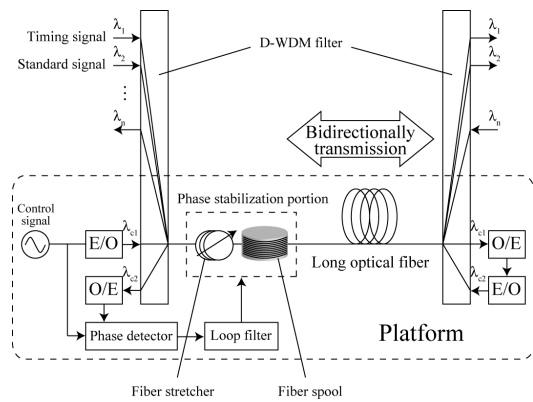


図1 光ファイバ位相安定化システムの概要

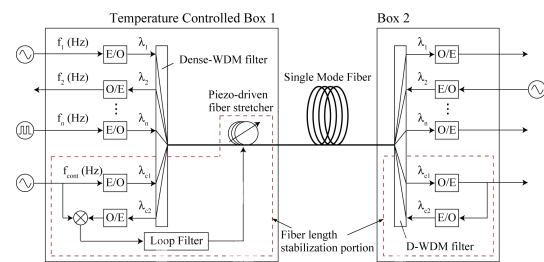


図2 ファイバストレッチャーによる位相補償システム

ングルモードファイバ (SMF) を通して伝送される。受信側の D-WDM フィルターを通った光信号のパワーは 2.5 dBm であり、光 - 電気変換器 (O/E 変換器) により 10 GHz 信号が検出される。その一部は E/O 変換器により波長  $\lambda_{c2} = 1551.721 \text{ nm}$  で同一のファイバを用いて送信側に伝送される。 $\lambda_{c1}$  と  $\lambda_{c2}$  が異なるのは、伝送における散乱や反射を区別するためであり、アイソレーションはそれぞれ 55 dB、50 dB である。O/E 変換器で検出した 10 GHz 信号は、送信側の 10 GHz 信号と位相比較され、ループフィルターを通した制御信号はファイバ長を一定にするように、ファイバストレッチャーへフィードバックされる。この場合、2 台のストレッチャーの位相はダイナミックレンジで 26 ps 以上であり、実験室の温度変動  $\pm 1$  に対して、ファイバ長 400 m での位相変動は、十分、補償可能である。

(3) 粗調用ファイバスポールによる位相補償では、図 3 に示すように RF 信号は 10 MHz であり、E/O 変換器と O/E 変換器の間には、位相制御のための 40 km ファイバスポール及び伝送路としての 50 km ファイバスポールが接続されている。それぞれのファイバスポールは、ベルチエ素子による温度制御可能な恒温槽 (Chamber 1 及び Chamber 2) に収納されている。E/O 変換器の出力パワーは -2.8 dBm、O/E 変換器への入力パワーは -18.1 dBm であった。O/E 変換器で検出した 10 MHz 信号は、

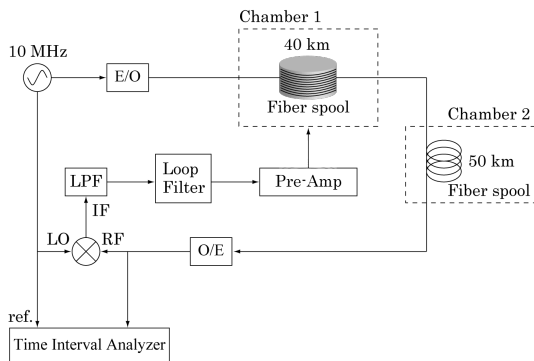


図3 ファイバプールによる位相補償システム

送信側の 10 MHz 信号と位相比較され、ループフィルタを通した制御信号はファイバ長を一定にするように、Chamber 1 の温度コントローラへフィードバックされる。また、受信側で検出した 10 MHz 信号は、送信側の 10 MHz 信号と DMTD 装置により位相差を測定する。

#### 4. 研究成果

(1) ファイバストレッチャーによる位相補償の結果を図 4、図 5 に示す。10 GHz 信号により光ファイバを位相安定化した状態で、1 GHz 信号を 1550.116 nm で波長多重して伝送を行った。ここでは DMTD 装置を用いて、送信側と受信側の 10 GHz 信号と 1 GHz 信号の位相差をそれぞれ同時に測定した。図 4 に示すように、10 GHz 信号は peak-to-peak 値で 21 fs (2.8 fs rms)、1 GHz 信号では 78 fs (10.4 fs rms) であった。図 5 は、周波数安定度を示しており、平均時間 1 s で  $3.4 \times 10^{-15}$  (1 GHz)、 $2.0 \times 10^{-15}$  (10 GHz) であった。位相変動を補償した信号の安定度は  $1/\tau$  に比例し、平均時間  $10^5$  s での安定度は  $2.7 \times 10^{-19}$  (1 GHz)、 $6.0 \times 10^{-20}$  (10 GHz) となった。これに対し、ファイバを位相安定化しない場合、安定度は約  $10^{-16}$  であった。

(2) ファイバストレッチャーによる位相補償における長期安定度の向上には 2 つの要因が挙げられる。1 つ目は、10 GHz の高周波信号を用いて、ミキサにより高感度に位相差検出したことによる。また、フィードバックループのゲインは 10 Hz 以下で 68 dB 以上にセットした。2 つ目は、E/O 変換器、O/E 変換器、リードファイバ、同軸ケーブルの温度制御である。これらは、ベルチェ素子により温度制御した恒温槽に収納した。図 4 に示すように、室温の変化  $\pm 1$  に対して送信側の恒温槽 (box 1) 内及び受信側の恒温槽 (box 2) 内の温度は 0.05 以内に抑えられた。温度変動が 0.05 の場合、1 m のリードファイバでは位相変動 1.8 fs に相当する。

(3) ファイバプールによる位相補償にお

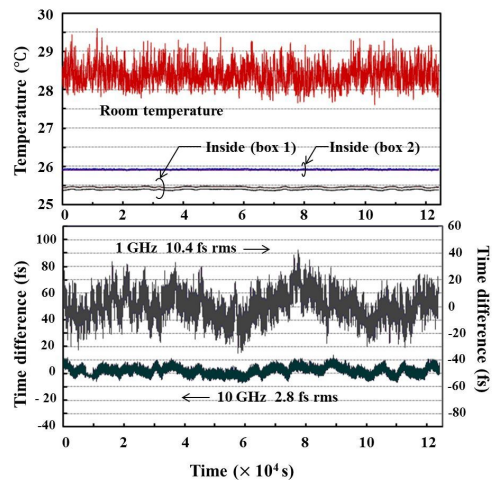


図4 伝送時間の変動と温度

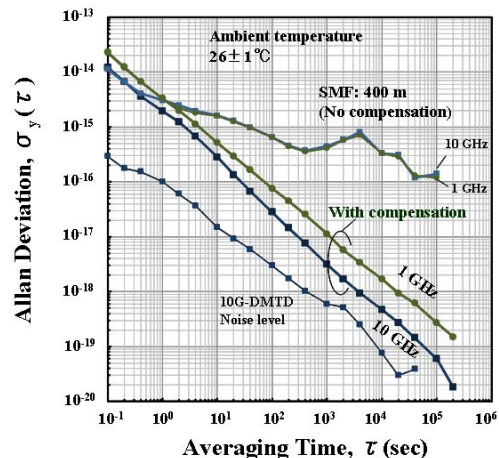


図5 分配システムの長期周波数安定度

いて、位相制御用 40 km ファイバプールの位相 - 温度特性を調べた。ファイバ長が 100 km で周囲の温度が 15 変化した場合、石英ガラスの位相変動係数は屈折率温度係数と熱膨張係数より約 36 ps/km/ であることから、最大変動量は 54 ns となる。実際に敷設された伝送路での測定では、気温の日周変動に伴い、約 50 ns の変動が観測されている。本システムの位相制御用 40 km ファイバプールにおいては、温度を  $-4 \sim 46$  の範囲で変化させたところ、位相は 75 ns 変化することを確認した。

(4) ファイバプールによる位相補償の結果を図 6 ~ 図 9 に示す。図 6 は位相制御を行わない状態で、Chamber 2 の温度 "Temperature in chamber 2" を変化させたときの位相差 "Phase variations" を測定したものであり、14 の変化に対して 3.5 ns の変動であった。図 7 は位相制御を行った状態で、Chamber 2 の温度 "Temperature in chamber 2" を変化させたときの位相差を測

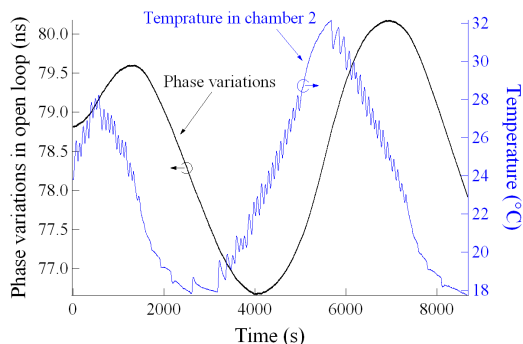


図6 温度変動による位相変化

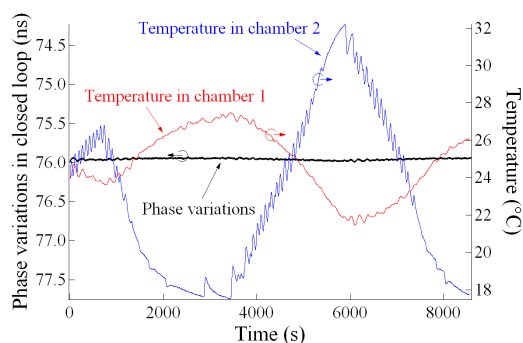


図7 位相粗調の結果

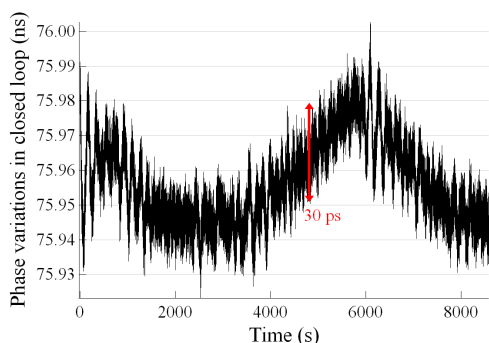


図8 位相差の拡大図

定したものである。“Temperature in chamber 1”はChamber 1の温度変化であり、“Phase variations”は位相差である。図8は位相差を拡大したものであり、peak-to-peak値は約80 psであった。図9は周波数安定度を示しており、平均時間 $10^4$  sでは位相制御を行ったときは $1 \times 10^{-15}$ 、行わなかったときは $2 \times 10^{-14}$ であった。80 psの位相差は、ストレッチャーで補償可能な26 psの範囲を超えているが、より高周波の信号を使用することで短期及び長期の安定度は向上すると考えられる。

(5)以上より、10 GHz信号により光ファイバを位相安定化した状態で、1 GHz信号を波

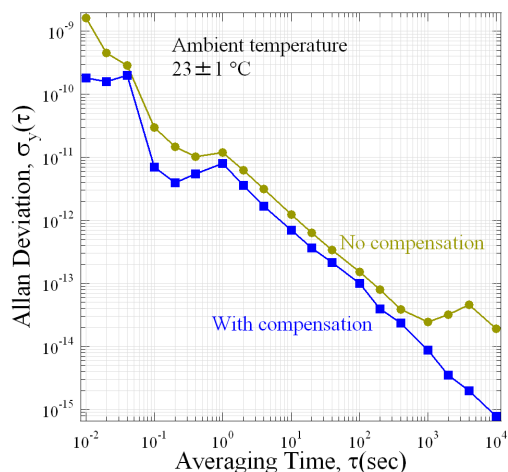


図9 粗調システムの長期安定度

長多重して伝送を行い良好な結果が得られたことから、多種用途の信号を位相制御することなく、波長多重して100 km超の遠隔地へ高安定に送受信が可能であることを示した。

#### 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 1件)

M. Amemiya, K. Watabe, T. Suzuyama, T. Naito, and H. Tsuchida, “Optical Timing Distribution System with Femtosecond Stability,” IEEJ TRANSACTIONS ON ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING IEEJ Trans 2012; 7(S1): S187-S189, Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com). DOI:10.1002/tee.21824 (査読有)

〔学会発表〕(計 1件)

M. Amemiya, K. Watabe, T. Suzuyama, M. Wada, and F.-L. Hong, “A Stable Timing Distribution System based on Dense-WDM,” Asia-Pacific Radio Science Conference, AP-RASC '13, joint with Asia-Pacific Time and Frequency workshop, ATF '13, 2013年09月03日~2013年09月07日, Howard International House, Taipei, Taiwan.

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

雨宮 正樹 (AMEMIYA, Masaki)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門・研究室長  
研究者番号：20392582

(2)研究分担者

鈴山 智也 (SUZUYAMA, Tomonari)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門・  
主任研究員  
研究者番号：3 0 3 5 9 1 1 1

渡部 謙一 (WATABE, Ken-ichi)  
産業技術総合研究所・計測標準研究部門・  
主任研究員  
研究者番号：5 0 3 5 8 3 8 9