

2020年3月18日

(報道発表資料)

日本電信電話株式会社
国立大学法人東京大学
東日本電信電話株式会社
理化学研究所
科学技術振興機構 (JST)

超高精度光周波数の240 kmファイバ伝送に成功 ～平面光回路(PLC)を用いた光中継装置カスケード伝送～

日本電信電話株式会社(以下 NTT、代表取締役社長：澤田純、東京都千代田区)と国立大学法人東京大学(以下東大、総長：五神真、東京都文京区)大学院工学系研究科香取秀俊教授(理化学研究所光量子工学研究センター チームリーダー、同開拓研究本部 主任研究員)及び東日本電信電話株式会社(以下 NTT 東、代表取締役社長：井上福造、東京都新宿区)は、複数の遠隔地間で 240 km に及ぶ光周波数ファイバ伝送の実証実験を実施し、データ積算時間 2600 秒で、周波数精度 1×10^{-18} に達する超高精度光周波数遠隔地間伝送に成功しました。この結果は、現在、世界最高性能の光格子時計^{*1} の有する光周波数を、その性能を保ったまま、光ファイバで 200 km を超える伝送が可能であることを示しています。

光格子時計は、セシウム原子時計を桁違いに上回る超高精度な原子時計です。光格子時計の驚異的な精度の高さを利用する応用の一つが、複数の遠隔地に設置した光格子時計を光ファイバで接続し、その周波数差を遠隔比較する「相対論的な効果を使った標高差測定(相対論的測地^{*2})」です。それにより、重力ポテンシャル計測に基づく精度 1cm レベルの水準点や、地震や噴火の前兆現象につながるわずかな地殻変動の日常監視など、新たなインフラストラクチャへの展開が期待されています。

本研究において、NTT と NTT 東日本は、世界で初めて、平面光波回路(PLC)^{*3} 技術を用いた光周波数中継装置(リピーター)を開発し、このリピーターをカスケード接続^{*4} した超高精度光周波数ファイバ伝送網を構築しました。構築したファイバ網に超狭線幅レーザーを伝送させ、伝送精度を評価することにより、1 cm 精度の標高差比較が可能な 1×10^{-18} という周波数の精度を保ったまま、200 km 級の遠隔地間へと伝送距離を拡張することを実証しました。この周波数伝送精度は、東大・理研が開発した世界最高精度の光格子時計を用いた遠隔地間周波数比較による相対論的測地が可能レベルです。

本成果は 2020 年 3 月 17 日(米国時間)に米国科学誌「オプティクス・エクスプレス」にて公開されます。

本研究の一部は、日本学術振興会(JSPS) 科研費特別推進研究(JP16H06284) 及び科学技術振興機構(JST) 未来社会創造事業「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」(JPMJMI18A1) の支援を受けて行われました。

1. 実験の背景

光格子時計は、光の周波数(数百 THz)を基準とする超高精度な原子時計で、その周波数精度は現在の「秒」の定義となっているセシウム原子時計を桁違いに上回ることから、次世代の「秒」の定義の有力候補として世界中で研究されています。アインシュタインの一般相対性理論によれば、異なる高さに置かれた 2 台の時計を比較すると、低い方の時計は地球の重力ポテンシャルの影響を大きく受け、ゆっくりと時を刻むことが知られています。この原理を用いて、全国的に複数の遠隔地に設置した光格子時計を光ファイバで接続し、その周波数差を遠隔比較する「相対論的な効果を使った標高差測定(相対論的測地)」は、従来の原子時計ではできない新しい応用として注目されています(図 1)。これを実現することによって、現在の GNSS(Global Navigation Satellite System)による測地精度では困難な 1 cm 精度の標高差測定が可能になり、各地の標高差を 1 cm 精度で常時モニターすれば、重力ポテンシャル計測に基づく水準点や、地殻変動の監視など、新たなインフラストラクチャへの展開が期待できます。地殻変動をリアルタイムに観測するためには、 1×10^{-18} という精度で 2 台の光格子時計の周波数差を数時間で計測する必要があります。光格子時計は、この極限的高精度にわずか数時間のデータ積算(平均化)時間で到達するという他の原子時計には無い特徴を備えており、現在、世界最高性能を有する光格子時計では、10000 秒以上のデータ積算時間で、周波数精度 1×10^{-18} に到達します。従って、その光格子時計の特徴を最大限活かした相対論的測地の実現を想定した場合、まず第一歩として、光ファイバによる光伝送が、10000 秒よりも短いデータ積算時間で、周波数 18 桁まで安定であることが必要不可欠です。さらに、このような光格子時計の光伝送ファイバネットワークを全国規模に敷設することを想定すれば、そのファイバ距離の拡張性も重要な要素です。過去に、東大・理研では、その最も基本的な実験として、2017 年に本郷(東大)ー和光(理研)間において、30 km の無中継ファイバ伝送による 2 台の光格子時計の周波数比較を実現し、数 cm 精度の遠隔地間標高差測定の原理実証を行いました[Takano et al., Nature Photonics 10, 662 (2016)]。東大・理研で開発されたファイバ伝送の手法では、無中継で伝送できるのは 100 km までが限度であり、数百 km の県レベルや数千 km の全国レベルにまで拡大するには、高精度を保ったまま光を中継しながら伝送する技術が必要となります。

本実験では、県レベルの域内における光周波数伝送ファイバネットワークを想定し、1 cm 精度の標高差測定を実証するために、200 km 級の超高精度光周波数ファイバ伝送技術の実現を目指しました。

2. 実験の成果

今回の実験は、1 cm 精度の標高差比較が可能な 1×10^{-18} という周波数の精度を保ったまま、200 km 級の遠隔地間へと伝送距離を拡張するために、複数の区間に分けて、リピーターを介して中継するカスケード方式を用いたことを特徴としています。そのために、NTT と NTT 東は、2015 年 10 月より、東大本郷キャンパスを基点に NTT 厚木研究開発センタまで、複数の中継局(電話局)を中継した実証実験用の超高精度光周波数伝送ファイバリンクを構築しました。リピーターによる中継では、光の位相を検出するために光干渉計が用いられますが、従来の空間光学系やファイバカプラを用いた光干渉計では、干渉計自体が発する雑音を除去できないという問題がありました。そこで、NTT が独自に開発した平面光波回路(PLC)による差動検波型マッハツェンダー干渉計を用いることで、安定に動作するリピーターシステムを開発し、温度・湿度・振動等の細心の対策が施された実験室環境とは異なる電話局内の商用環境に設置しました。この実証実験用ファイバリンクを用いて、1 秒間のデータ積算時間で 3×10^{-16} 、2600

秒で 1×10^{-18} の周波数安定度^{※5} および精度での伝送を実証しました。この周波数伝送安定度は、香取研究室が開発した世界最高精度の光格子時計を用いた遠隔地間周波数比較が実現可能なレベルであり、相対論的測地応用につながる成果です。

【実験の説明】

- ① 本実験では、東大・理研が本郷ー和光間光格子時計周波数比較実験に用いた光ファイバと、NTT 東大が今回新たに構築した本郷ー厚木間商用ファイバリンクを本郷で接続し、和光(理研)ー本郷(東大)ー厚木(NTT)間 150 km 級光周波数伝送ファイバリンクを構築しました(図 2)。本郷ー厚木間には 3 つの中継局舎(電話局)を用意し、19 インチラック 1 基にリピーターシステムを設置しました(図 2 写真)。各局舎のリピーターは、別の通信ネットワークを介して、遠隔操作することが可能です。
- ② 本ファイバリンクの光周波数伝送精度を評価する実験では、理研に設置している超低膨張ガラス共振器に安定化した波長 698 nm(周波数 429 THz)の超狭線幅レーザー(時計レーザー^{※6})を基準とし、その 2 倍の波長である 1397 nm(215 THz)をファイバ伝送する光周波数として用いました。理研から東大へファイバ伝送した 215 THz 光周波数基準を東大及び局舎 A のリピーターにより中継して NTT 厚木に送り、NTT 厚木からはもう 1 本のファイバを使って、局舎 B のリピーターで中継して、東大まで戻す本郷ー厚木ー本郷の 240 km ループ網を構築します。東大から送った光周波数と、ループ網により戻ってきた光周波数の差を検出することで、ファイバリンク伝送の周波数安定度を評価することに成功しました(図 3)。その結果、周波数安定度は、1 秒間のデータ積算時間で 3×10^{-16} 、2600 秒で 1×10^{-18} と評価されました(図 3 右グラフ緑実線)。この評価結果は、東大・理研が開発した光格子時計の周波数安定度を 1 桁程度上回っており(図 3 右グラフ灰網線)、ファイバリンクを介して光格子時計の 10^{-18} 精度周波数比較が数時間の測定で可能なことを意味しています。

3. 技術のポイント

(1) 1397 nm 波長帯を用いたカスケード型ファイバ雑音補償技術^{※7} (東大・理研・NTT)

今回の実験で構築した超高精度光周波数ファイバ伝送網は、ストロンチウム原子による光格子時計の周波数比較実験に用いることを想定しています。ストロンチウム光格子時計が提供する光周波数基準(時計周波数)は、698 nm 波長帯であり、今回の伝送実験で用いた 1397 nm 波長帯は、ちょうどその 2 倍の関係があります。この関係により、波長変換デバイスを 1 つ用いるという簡素な構成で、光格子時計の光周波数基準をファイバ伝送可能な波長帯に変換することが可能です(図 4) [Akatsuka et al., Japanese Journal of Applied Physics 53, 032801 (2014)]。

一方、伝送に用いる光ファイバには、日々の温度変化によるファイバの伸縮や、敷設環境に由来する振動などさまざまな雑音があり、ファイバ伝送される光周波数の精度の劣化を引き起こします。このファイバ雑音を補償する技術がファイバ雑音補償技術であり(図 4)、リピーターは、ファイバ雑音補償機能と再生中継機能を 1 つの装置にまとめたものです。ファイバ雑音補償された光周波数を次の区間へ中継し、またファイバ雑音補償するという繰り返し(カスケード)接続により、精度劣化を可能な限り抑えて遠隔地へ伝送することが可能です。

(2) 石英光導波路による集積型光干渉計技術 (NTT)

本リピーターに、複雑な光の干渉計を高精度かつ集積化可能とする石英系平面光波回路(PLC)技術を適用しました。これにより、リピーターが小型化されるとともに、安定性や検出感度の向上が実現されています。具体的には、リピーターレーザーの位相を同期するための光干渉計と、フ

ファイバ雑音を検出するための光干渉計をワンチップに集積実装しました。光路長が精密に設計された干渉回路を光チップ内に作り込むことで、温度等の環境変動にも強く、光干渉計自体に由来する雑音を極限まで低減することに成功しています(図5)。また、光干渉計の光の差動出力を利用することにより光干渉信号の差動検波を可能とし、検出感度の向上を図っています。

4. 今後の展開

本実験チームは、今後、今回構築した超高精度周波数伝送ファイバネットワーク環境を用いて、和光及び厚木に設置する光格子時計の周波数比較実験を実施する予定です。これにより、200 km 級の遠隔地間で、数 cm 精度の標高差を検知する相対論的測地の実証に挑戦します。さらに、JST 未来社会創造事業「クラウド光格子時計による時空間情報基盤の構築」で目的とする光格子時計の全国規模のファイバネットワーク化を想定し、より多中継で安定な運用が可能なリピーターの開発を進め、この超高精度光周波数基準のファイバ伝送技術を 1000 km 級まで拡張した実証実験環境を構築する予定です。

図1: 光格子時計のファイバネットワーク化による相対論的測地



重力ポテンシャルが大きい(標高が高い)場所の時計は早く進む。
(アインシュタインの一般相対論)

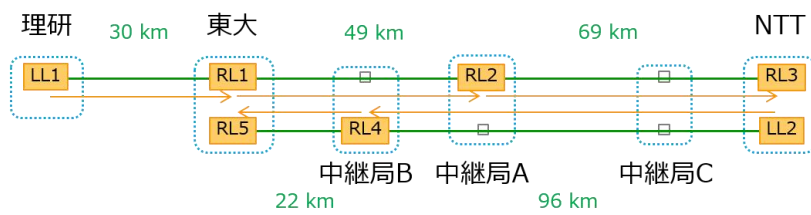
1 × 10⁻¹⁸ の精度で時計の周波数比較ができると
1 cm の精度で標高差を検知できる。



相対論的測地

光ファイバ網で各地の光格子時計をつなぎネットワーク化することで、重力ポテンシャル計測に基づく水準点や、地殻変動の監視など新たな時空間情報インフラが期待。

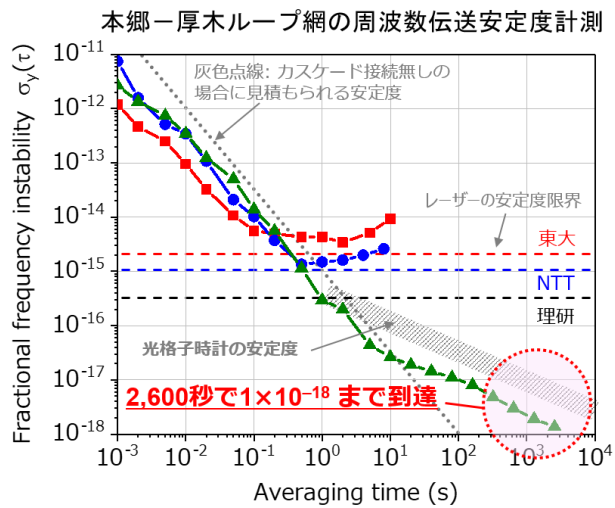
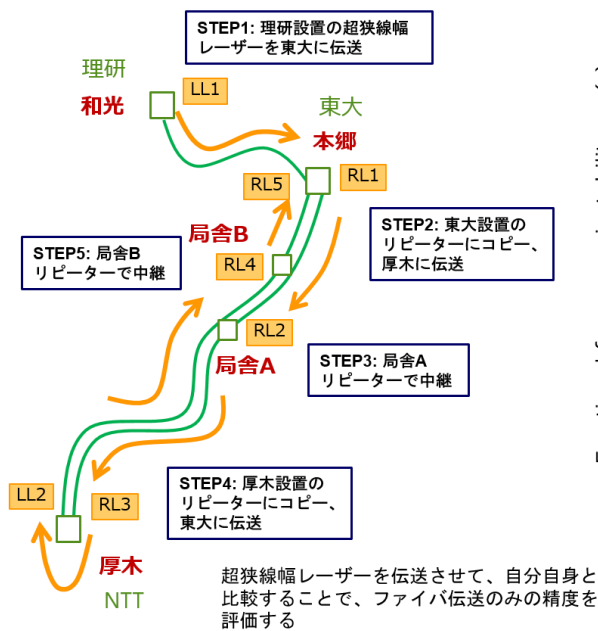
図2: 和光一本郷一厚木超高精度光周波数配信ファイバリンク



- リピーターシステム一式 (19インチラック1つサイズ)
- 別ネットで遠隔操作可能

NTT東の厚木一本郷間ファイバ網と、既存の和光-本郷ファイバ網を接続し、遠隔運用可能な150 km級ファイバリンクを構築

図3: 本郷一厚木一本郷ループ測定による周波数伝送安定度の評価



- 赤(実験1): 理研(40cm共振器)と東大(7.5cm共振器)に設置の超狭線幅レーザー同士の比較
- 青(実験2): 理研(40cm共振器)とNTT(12cm共振器)に設置の超狭線幅レーザー同士の比較
- 緑(実験3): 本郷一厚木一本郷ループ網による自己参照比較

$\sigma_y(1s) = 3 \times 10^{-16}$ 、 $\sigma_y(2600s) = 1 \times 10^{-18}$ を達成。東大・理研が開発した世界最高精度のストロンチウム光格子時計の周波数比較も可能な配信精度であることを確認

図4: 1397 nm配信方式によるカスケード型ファイバ雑音補償技術

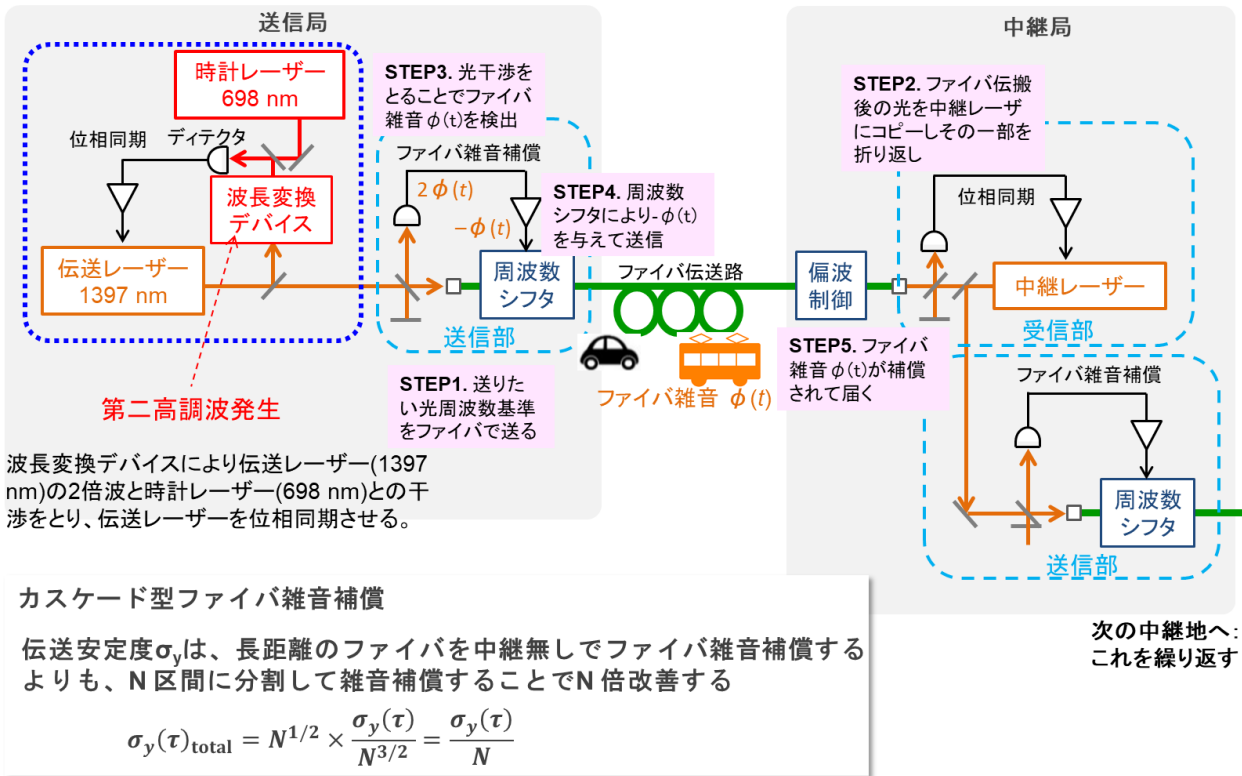
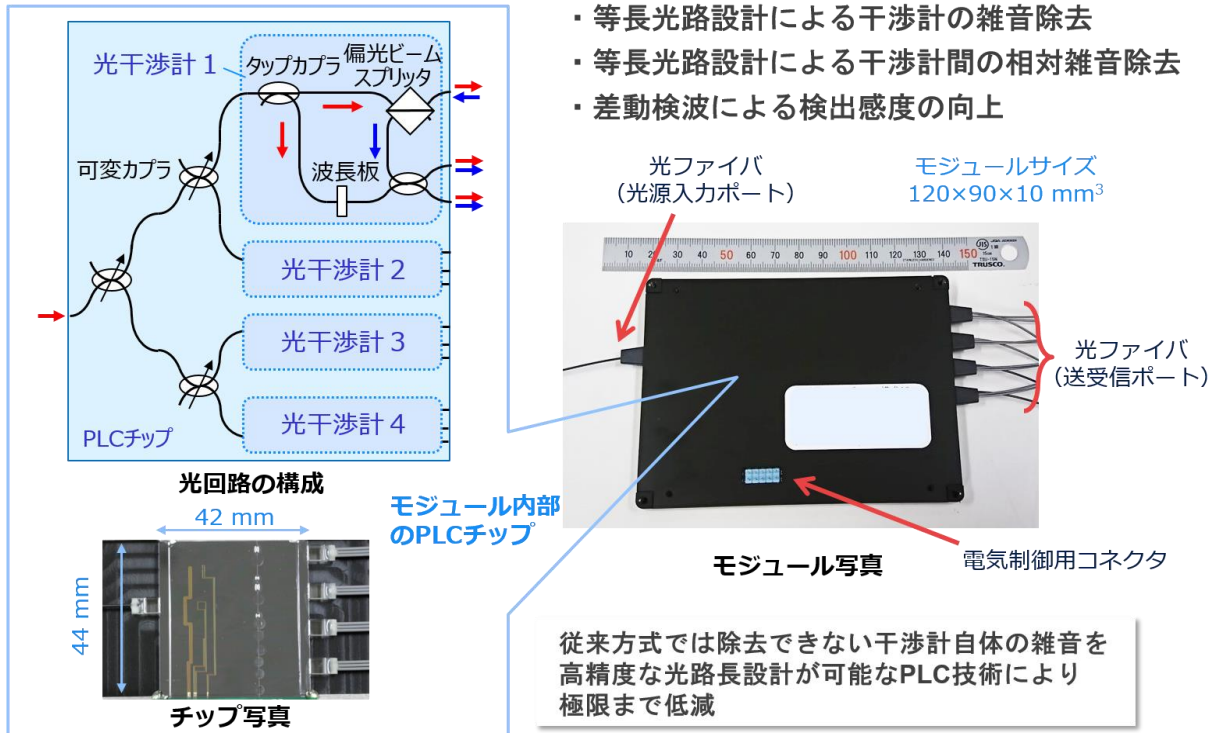


図5: 平面光波回路(PLC)技術によりワンチップ化した光中継装置用の集積型干渉計



【論文掲載情報】

Tomoya Akatsuka*, Takashi Goh, Hiromitsu Imai, Katsuya Oguri, Atsushi Ishizawa, Ichiro Ushijima, Noriaki Ohame, Masao Takamoto, Hidetoshi Katori, Toshikazu Hashimoto, Hideki Gotoh, and Tetsuomi Sogawa, “Optical frequency distribution using laser repeater stations with planar lightwave circuits,” *Optics Express*, Volume 28, Issue 7, pp. 9186–9197 (2020).

【用語解説】

※1 光格子時計

2001年に東京大学大学院工学系研究科の香取秀俊助教授(研究当時)が考案した原子時計の手法。「魔法波長(魔法周波数)」と呼ばれる特別な波長(周波数)のレーザー光を対向させてできる、数十 nm(1 nmは10億分の1 m)の微小空間に原子を閉じ込めて、その原子が吸収する光の周波数(共鳴周波数)を測定する。この光の周波数により、1秒の長さを決めます。光格子全体には多数の原子を捕獲できるので、それらの原子の共鳴周波数を一度に測定して平均をとることで、短時間で時間を決めることができます。

※2 相対論的測地

アルベルト・アインシュタインによって築かれた現代物理の基本理論の1つである一般相対性理論では、「重いものの周りでは時間は遅く流れる」という現象を論じており、超高精度な時計ではこの現象を観測することができるようになります。複数の超高精度な時計の時間の進み方(周波数)の差を読み取り、重力の変化を検出することで、時計の設置場所間の高低差を測定することが可能です。この原理を測量に応用することは、相対論的測地と呼ばれています。

※3 平面光波回路(Planar Lightwave Circuit: PLC)

NTTが実用化してきた光導波路技術で、光導波路をLSIと同様のプロセスで製造でき、さまざまな干渉計を集積することができます。PLCは製造の自動化が可能であるため量産性に優れ量産時のコスト低減効果が大きという特徴と、光ファイバと同じガラス素材で導波路を形成できるため低損失で信頼性が高いという特徴があります。本技術は、大容量光ファイバ通信で用いられる波長多重器/分離器や光スイッチなどのデバイスで実用化されています。

※4 カスケード接続

長距離のファイバ伝送を行う際に、中継局を設置することで短距離のファイバ伝送を次々と繋いでいく方法。より高い周波数の雑音まで補償できるようになるため、全体の伝送安定度を改善することができます。

※5 周波数安定度

周波数がどれだけ正確かを表す精度の指標の1つです。周波数安定度は、ある中心周波数 f に対して、測定した周波数のばらつきを Δf とすると、 $\Delta f/f$ と表します。

※6 時計レーザー

光格子時計において、原子の共鳴周波数を測定するためのレーザーのことを指します。共鳴周波数を測

定することにより、原子の共鳴周波数をレーザーの周波数にコピーすることになり、光格子時計の時間基準を読み出すことに対応します。一般的に、スペクトル線幅数 Hz 程度の超狭線幅レーザーを、時計レーザーとして用います。

※7 ファイバ雑音補償技術

精度の高い光周波数を光ファイバで遠方に送る際、ファイバの敷設環境に由来する周波数雑音を補償し、精度の劣化を抑えて伝送する技術。ファイバ伝搬後の光を一部折り返し、送信元で光干渉をとることでファイバ雑音 $\phi(t)$ を検出し、周波数シフトにより $-\phi(t)$ を与え、ファイバ雑音を補償します(図 4)。ファイバ雑音補償技術では、ファイバの往復伝搬時間よりも速く変動する雑音は補償できないため、補償区間を短くすることによって、できるだけ忠実にファイバ雑音を補償することが可能です。