

4-3 光ファイバ周波数伝送

4-3 Frequency Transfer Using Optical Fibers

藤枝美穂 熊谷基弘 長野重夫 井戸哲也

FUJIEDA Miho, KUMAGAI Motohiro, NAGANO Shigeo, and IDO Tetsuya

要旨

周波数標準の高い精度を損なわずに信号を送る、比較する手段として光ファイバによる伝送法が活発に研究されている。本稿では NICT で開発している RF 伝送システムと光キャリア伝送システムについて紹介する。

Frequency transfer using optical fibers is one of candidates which realizes precise frequency dissemination without degradation of stability of optical frequency standards. In this report, the RF transfer system and optical carrier transfer system developed in NICT are introduced.

[キーワード]

光周波数標準, 周波数伝送, 光ファイバ

Optical frequency standard, Frequency transfer, Optical fiber

1 はじめに

近年、光周波数標準が目覚ましい進歩をとげている [1]-[4]。周波数標準としての確かさを確認するためには、他機関の標準との間で値を比較し、その妥当性を証明しなくてはならない。しかしながら従来衛星経由の周波数比較方式では、比較そのものの精度が標準のそれに遥かに及ばないため [5]、新たな高精度周波数比較方式の開発が求められてきた。代わって有力な候補となったのが、光ファイバによる高精度周波数伝送である。光ファイバでは大気中を伝播させる従来方式と比較し誤差要因が少ないため高精度の伝送が可能であり、また信号のロスが少ないため同軸ケーブルによる伝送よりも伝送距離を伸ばすことができる。さらに信号そのものを伝送するため高価な周波数標準を持たないユーザーへの供給が可能となる。このことにより、周波数標準比較法としてだけでなく線形加速器や VLBI アレイアンテナ群などへの標準信号供給法として開発が進められている [6][7]。

光ファイバによる周波数伝送では、1. RF 伝送、2. 光キャリア伝送、3. 光コム伝送の 3つの方式が考えられる [8]-[18]。1 は光に変調を掛け RF 信号

を送る方式、2 は光そのものを送る方式で現在最も高精度を達成している。光コムとは光周波数領域に櫛の歯のようなスペクトルを持つもので、光の物差しとして広く活用されている [19]。3 はその光コムを伝送する方式である。櫛の歯の間隔がある RF 周波数となっているため、光そのものと RF 信号の双方をユーザーに供給することを可能にするが、光ファイバの物理長だけでなく波長分散を一定に制御しなくてはならないため困難であると考えられている。

NICT では、まず 1 の RF 伝送システムの開発から着手し、一定の成果を得た [20]-[22]。続いてさらなる高精度、光周波数標準の直接比較を目的として 2 の光キャリア伝送システムの開発を行っている。本稿では、それら方式の概要と得られている結果について紹介する。

2 周波数伝送

2.1 RF 伝送システム

RF 信号伝送では、一般的にレーザー電流に RF 信号で変調をかけた光信号をダークファイバを通して送り、伝送先で光信号を光検出器で検出し RF 信号を取り出す [9][17][18][20]-[22]。温度や圧

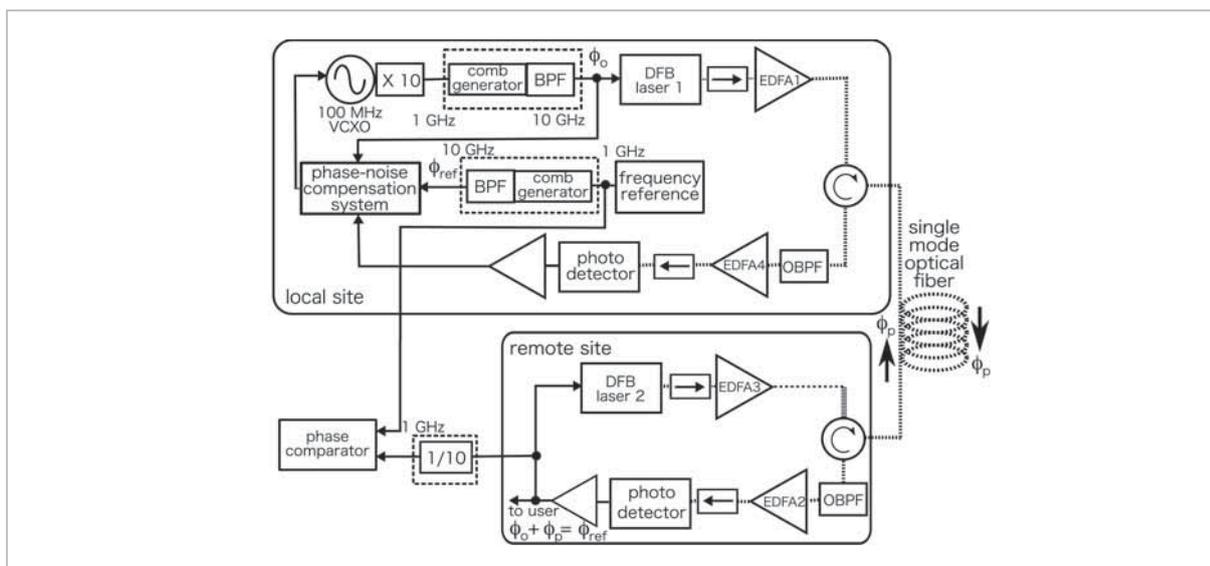


図 1 1 GHz、10 GHz 信号伝送システム概略図

BPF: band-pass filter, OBPF: optical band-pass filter, DFB laser: distributed feedback laser, EDFA: erbium-doped fiber amplifier。“×10”、“1/10”は10通倍器、1/10分周器を表す。EDFA1、EDFA3はブースターアンプとして、EDFA2、EDFA4はプリアンプとして用いられている。1 GHz 信号伝送の場合には点線で囲んだ機器は使用しない。

力の変化による光ファイバ長の変化と伝送中に受ける位相雑音のため、伝送先で取り出した RF 信号は元の RF 信号の精度より劣化する。従ってより高精度に信号を伝送したい場合、光ファイバ長を一定に保ち、受けた位相雑音をキャンセルする機構が必要となる。位相雑音をキャンセルするためには伝送先まで送った光を同じ光ファイバを通して送り返し、戻ってきた光を用いる。その方法としては、エラー信号を VCXO (voltage controlled crystal oscillator) に返す電気的キャンセル法と制御可能なディレイラインを入れる光学的法が考えられる。後者は可変長範囲に制限があるため、あらかじめ光ファイバリンクのリンク長の変化を見積もっておく必要があるが、前者にはそのような制限はない。前者の電気的キャンセル法では送信した RF 信号をどのようにリファレンス信号に同期させるかについて様々に工夫がされている。フランス LNE-SYRTE 研究所では行きと帰りに伝送する RF 周波数を変えることでキャンセルを成立させている[9]。図 1 に NICT で開発された RF 伝送システムを示す。このシステムでは 1 GHz または 10 GHz 信号の伝送が可能であり、行きと帰りに伝送される RF 信号の周波数は共通である。レーザー波長は $1.5 \mu\text{m}$ の通信帯のもの

を使用し、光ファイバはシングルモード光ファイバを用いており、位相雑音を電氣的にキャンセルする方式を採用している。次にシステムの詳細について述べる。

VCXO からの 100 MHz 信号を 10 倍し、1 GHz に変換する。NICT では伝送後の RF 信号の純度を保つために 1 kHz オフセットで約 -150 dBc/Hz という低位相雑音の VCXO を採用している。10 GHz 信号伝送の場合はさらに、コムジェネレータに入力、バンドパスフィルタで 10 GHz 信号を切り出したものを RF 信号源として使用する。第 1 の DFB (distributed feedback laser) レーザーの電流をその RF 信号で変調する。結果として主に AM 変調のかかった CW 光信号が得られる。光はまず EDFA (Erbium doped fiber amplifier) で増幅された後、往復の光を区別するため光サーキュレータを通して送信される。本稿では光の送信元をローカルサイト、送信先をリモートサイトと表す。リモートサイトに送信された光はまず光サーキュレータを通り、EDFA で増幅され、光検出器に入力される。検出された RF 信号はアンプを通り、ユーザーへ供給される。検出された RF 信号の一部で第 2 の DFB レーザーの電流を変調する。その光信号はリモートサイトからローカルサイト

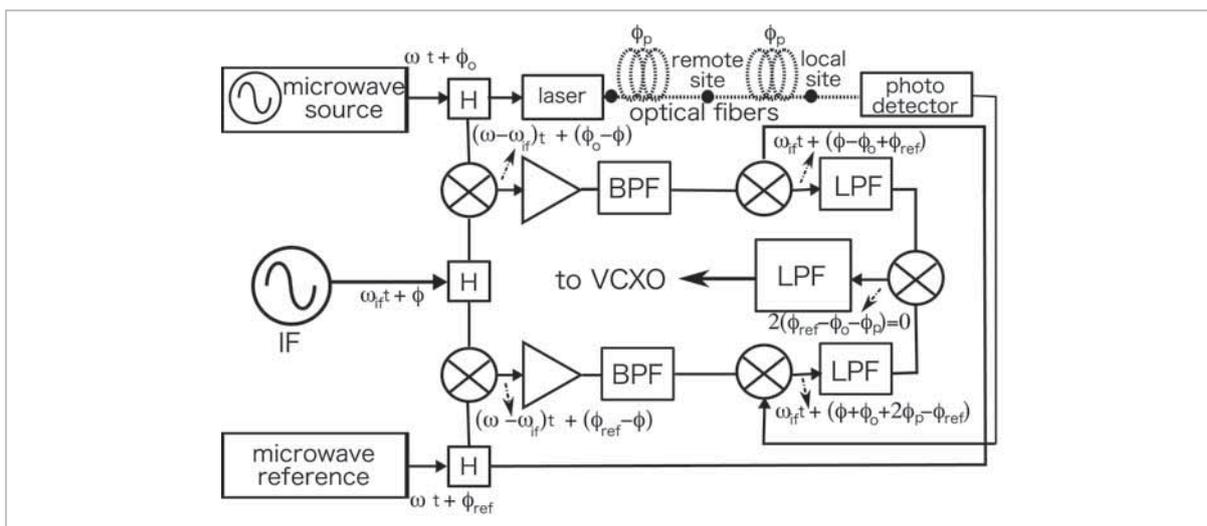


図2 電氣的位相雑音キャンセルシステム概略図

H: power divider, LPF: low-pass filter

へ同じ光ファイバを通り返送される。ここで、光の干渉を防ぐため、第1と第2のレーザーの周波数を 50 GHz 変えている。ローカルサイトでは、光サーキュレータを通り EDFA で増幅された光信号を光検出器で検出し、RF 信号を取り出す。その信号は位相雑音キャンセルシステムへ送られ、リファレンス信号と比較しエラー信号を VCXO へ返す。これにより伝送中にのった位相雑音がキャンセルされ、リモートサイトへ送信された RF 信号はローカルサイトのリファレンス信号と同じ精度を保つことが可能となる。図2に我々の開発した位相雑音キャンセルシステムの構成を示す。ここでは DMTD (dual mixer time difference) と同様に共通の IF 信号を利用して位相雑音のキャンセルを行っている。VCXO から生成された RF 信号源とリファレンス信号の位相、 $\omega t + \phi_0$ 、 $\omega t + \phi_{ref}$ 、は IF 信号 $\omega_{if} t + \phi$ によってダウンコンバートされ、それぞれ RF 信号源、光ファイバを通りローカルサイトに返送された RF 信号とミックスされて、 $\omega_{if} t + \phi - \phi_0 + \phi_{ref}$ 、 $\omega_{if} t + \phi + \phi_0 + 2\phi_p - \phi_{ref}$ 信号に変換される。ここで、伝送経路上の行きと帰りの光ファイバで受ける位相雑音は等しいと仮定し、 ϕ_p と表している。さらにそれら2つの信号をミックスすることで、位相信号 $2(\phi_{ref} - \phi_0 - \phi_p)$ を得る。この信号を VCXO にフィードバックすることにより次式が成立する。

$$\phi_{remote} = \phi_0 + \phi_p = \phi_{ref} \quad (1)$$

すなわち、リモートサイトへ送られた信号の精度はリファレンス信号のそれと等しくなる。伝送システムの評価の際には、伝送前後の信号を比較する必要があるためローカルサイトとリモートサイトは同じ場所に設置し、リファレンス信号と伝送された RF 信号の位相比較を行い、伝送精度を評価する。

以上に NICT で開発した RF 伝送システムを紹介した。我々はレーザーに変調をかける周波数として、1 GHz もしくは 10 GHz を採用しており、10 MHz 信号を必要とするユーザーへは伝送後の 1 GHz 信号を 1/100 分周することで提供している[24]。これは、変調周波数が 100 MHz 以下の場合、位相分解能が十分に精密にとれず 10^{-14} 台の伝送精度が得られなかったためである。しかしながら、リモートサイトで必要とする信号の周波数と精度を考慮し柔軟に周波数を選択できる。また RF 伝送では光信号のサイドバンドに RF 信号をのせて伝送を行うため、狭線幅のレーザーを必要とせず数 MHz 幅の安価なものを利用することができる。

2.2 光キャリア伝送システム

光キャリア伝送では、CW レーザー光そのものを伝送する[10]-[16]。短時間で高精度に信号伝送で

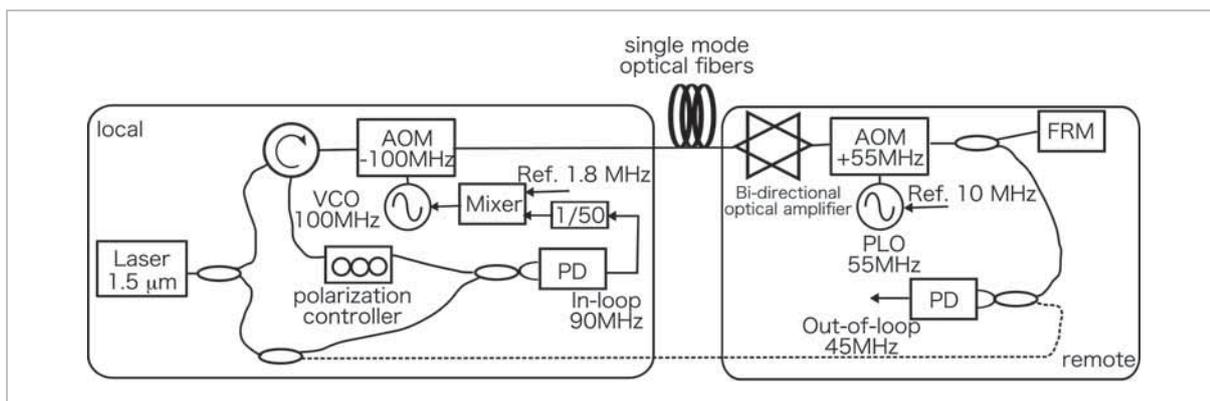


図3 光キャリア伝送システム概略図

AOM: Acousto optic modulator、FRM: Faraday rotator mirror、PD: Phase detector、PLO: Phase locked oscillator、VCO: Voltage controlled oscillator

きるため、欧米の研究所で活発にシステム開発されている。音響光学変調器 (AOM: Acousto optic modulator) のダブルパス機能により、ラウンドトリップ光のもつ位相雑音の半分がリモートサイトへ伝送した光の位相雑音となるため、RF伝送システムよりはシンプルな構造が可能となる。開発されているシステムのほとんどが AOM を利用したものであり構成に大きな違いはなく、光増幅器をどこに設置するか、周波数シフトをいくつにするかなどの細かい点が異なるのみである。図3に NICT で開発されている光キャリア伝送システムを表す。光源は伝送前後にてコヒーレンスを保たなくてはならない。このため、100 km の伝送を考える場合は 2 kHz 程度の狭線幅の光源が必要となる。本システムでは 1.5 μm 帯狭線幅ファイバレーザをリファレンス光源として使用している。レーザからの光は光サーキュレータを通り、第1の AOM に入力される。この AOM は 100 MHz の VCO (Voltage controlled oscillator) で駆動されており、光の周波数は -100 MHz シフトする。その後、シングルモード光ファイバを通りローカルサイトから、リモートサイトへ送られる。リモートサイトでは光ロス補償する為に双方向光アンプが設置されている。その後、第2の AOM に入力する。この AOM は 55 MHz の PLO (Phase locked oscillator) で駆動されており、PLO はリモートサイトで利用できる原子時計の 10 MHz 信号に同期する。その後、光はダイバイダによって2つに分けられ、一方がユーザーに供され、一方は FRM (Faraday rotator mirror) に

よって反射され、同じシングルモードファイバを通り、ローカルサイトへ送り返される。帰ってきた光は光サーキュレータによって行きの光と弁別されて取り出され、リファレンス光と結合しそのヘテロダイン信号が光検出器によって検出される。この系は片腕が長距離シングルモードファイバを含む干渉計を構成しており、検出された信号は In-loop ビート信号とよばれる。本システムでは送り返されてきた光は $-100 + 55 + 55 - 100 = -90$ MHz のシフトをうけるため、ビート信号は 90 MHz の信号となる。この信号は 1/50 分周され、1.8 MHz のローカル信号とミキシングされる。得られたエラー信号を VCO にフィードバックすることにより、往復の光ファイバ上で受ける位相雑音がキャンセルされ、リモートサイトへ送信された光が受けた位相雑音はゼロとなる。以下に位相雑音キャンセル法の詳細を述べる。

レーザ光を $\omega_0 t + \phi_0$ 、第1、第2の AOM によって受ける周波数シフトを $\omega_1 t + \phi_1$ 、 $\omega_2 t + \phi_2$ 、伝送経路で受ける位相雑音を ϕ_p と表す。ここで行きと帰りの光ファイバ上で受ける位相雑音は等しいと仮定する。ローカルサイトから送られる光は $(\omega_0 + \omega_1)t + \phi_0 + \phi_1$ となり、リモートサイトの FRM 前では $(\omega_0 + \omega_1 + \omega_2)t + \phi_0 + \phi_1 + \phi_p + \phi_2$ と表すことができる。この光が再度、第2の AOM、シングルモード光ファイバ、第1の AOM を通り、ローカルサイトに戻ってくる。ローカルサイトの PD 前で混合される光はリファレンス光 $\omega_0 t + \phi_0$ と戻り光 $(\omega_0 + 2\omega_1 + 2\omega_2)t + \phi_0 + 2(\phi_1 + \phi_p + \phi_2)$ であるので、検出されるヘテロダイン信号は

$2(\omega_1 + \omega_2)t + 2(\phi_1 + \phi_p + \phi_2)$ となる。この信号がローカル信号 $2(\omega_1 + \omega_2)t + \phi_{lo}$ とミキシングされる。そのエラー信号を VCO にフィードバックすることにより次式が成立する。

$$\phi_1 + \phi_p + \phi_2 - 1/2 \phi_{lo} = 0 \quad (2)$$

ここで、 ϕ_{lo} は実験室で利用できる水素メーザなどのリファレンス信号に同期しているので、 ϕ_p と比較してその揺らぎはほぼ 0 と見なすことができる。すなわちリモートサイトに送信された光は、

$$\begin{aligned} & (\omega_0 + \omega_1 + \omega_2)t + \phi_0 + \phi_1 + \phi_p + \phi_2 \\ & = (\omega_0 + \omega_1 + \omega_2)t + \phi_0 + 1/2 \phi_{lo} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\doteq (\omega_0 + \omega_1 + \omega_2)t + \phi_0 \quad (4)$$

と表すことができ、光ファイバ上で受けた位相雑音がキャンセルされ、安定度は保たれる。光キャリア伝送システムの評価はやはりローカルサイト、リモートサイトを同じ場所に設置し行う。伝送された光をリファレンス光と結合し、そのヘテロダイン信号を光検出器で検出し、その周波数を計測することで伝送した光の精度を評価することができる。

光キャリア伝送システムでは伝送された光がユーザーへ供給される。従って RF 信号を必要とするユーザーのためには、リモートサイトに光コムを配置して RF 領域へ周波数を下げる必要がある。光キャリア伝送システムは光そのものを必要とする、例えば波長の絶対値が校正された光を必要とするような場合や光周波数標準比較を行うような場合に適しているといえる。また RF 伝送システムと比較しよりシンプルなシステム構造であるが、伝送先での光のコヒーレンスを保つために狭線幅のレーザーが必要となり、レーザーについては RF 伝送よりも高価になる。一方で、光キャリア伝送においては、ヘテロダイン検波により光がもつ位相雑音をそのまま RF 信号にトレースできるため、光と RF の周波数比、約 10^6 倍だけ RF 信号の精度が悪くても許容される。この大きな周波数比が光キャリア伝送の高精度につながっているといえる。例えば AOM の駆動信号は 10^{-12} 程

度で安定化しておけば、光領域では AOM の通過前後で 10^{-18} の安定度が得られる。このため AOM を駆動する RF 信号源の位相雑音は 1 kHz オフセットで -80 dBc/Hz 程度で充分であり安価に購入することができる。また周波数比のおかげで高精度に RF 信号を制御する必要がないため、ケーブル取り回しやコネクタの取り扱いに気を配らなくとも、比較的容易に高い伝送精度が得られるという利点がある。

2.3 JGN2plus 光ファイバリンク

NICT では新世代ネットワークの研究を推進するため光テストベッド JGN2plus (Japan Gigabit Network 2 plus) の運用を行っている [23]。その中に、低損失の光ファイバ芯線によるテストベッドが提供されており、NICT 小金井と大手町、白山間を結んでいる。我々は実際に都市に敷設された光ネットワークでの伝送を実証するため、JGN2plus 光ファイバリンクを使用し実証実験を行った。実験に使用した光ファイバリンクの構成を図 4 に示す。使用した光ファイバリンクは 114 km、光ロスが約 40 dB と 90 km、30 dB であった。この光ファイバリンクは非常に大きな位相雑音を持つことが知られている。この理由としてリンクの約半分が空中に敷設されており、大きな位相雑音をもたらしていると考えられる。また、残りの部分は地下鉄の線路にそって敷設されている模様で、電車の運行による影響も見られている。

2.4 実証実験結果

周波数伝送システムの実証実験は JGN2plus 光ファイバリンクで行われた。RF 伝送実験は NICT、大手町、白山をつないだ 114 km リンクにて、光キャリア伝送実験は NICT、大手町をつ

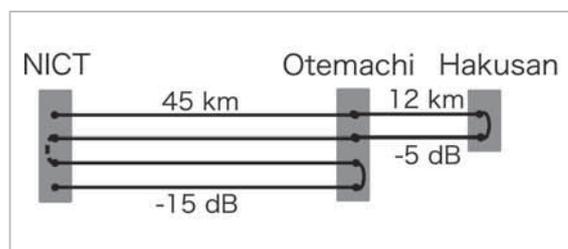


図 4 NICT 小金井、大手町、白山間を結んだ光ファイバリンク概略図

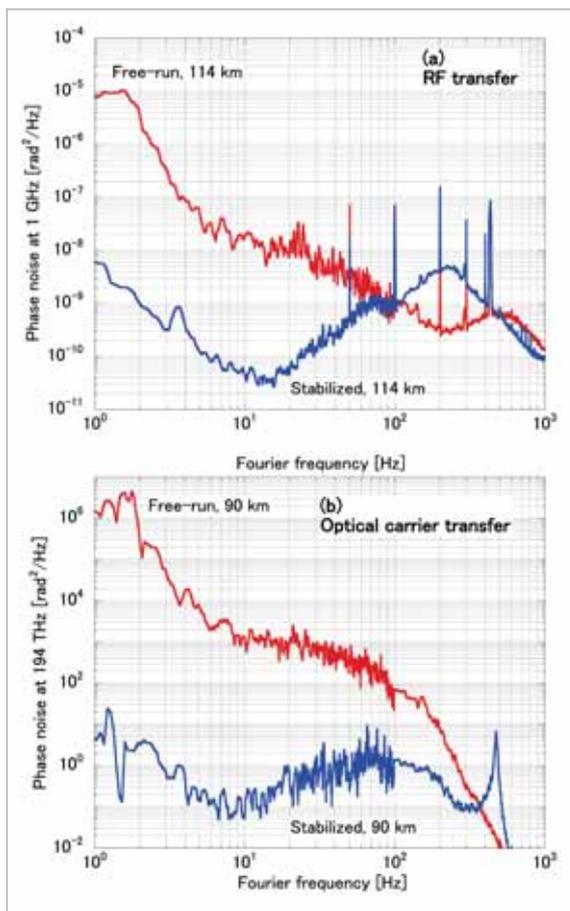


図5 (a) RF伝送と(b)光キャリア伝送の位相雑音測定結果

(a)では114 km伝送後の1 GHz信号の位相雑音を、(b)では90 km伝送後の1.5 μm帯光の位相雑音を示す。

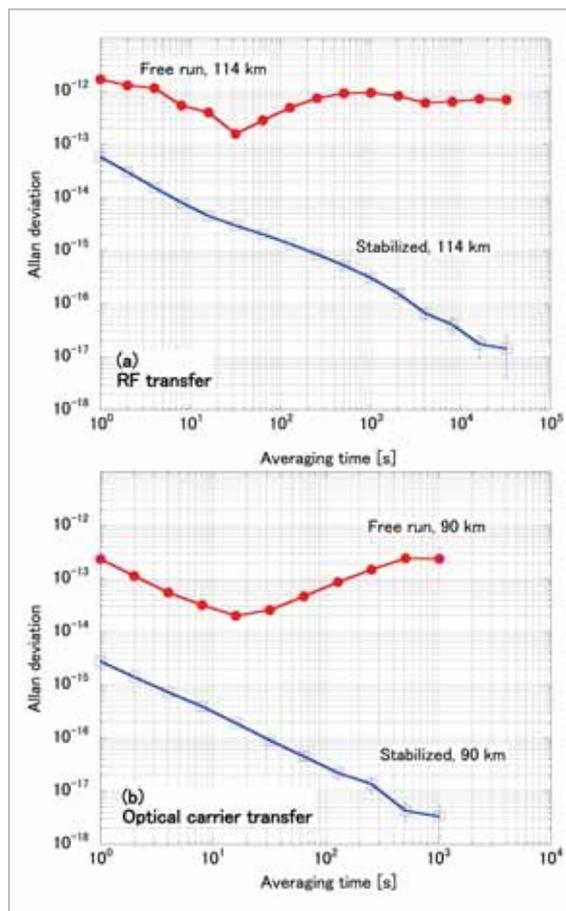


図6 (a) RF伝送と(b)光キャリア伝送の周波数安定度

(a)では114 km伝送後の1 GHz信号の伝送精度を、(b)では90 km伝送後の1.5 μm帯光の伝送精度を示す。

ないだ90 kmリンクで行った。

伝送後の信号の評価を行うため、ローカルサイト、リモートサイトの双方を同じ実験室に設置し、RF源、光源とした信号と伝送した信号を比較した。測定した位相雑音結果を図5に、周波数安定度を図6に示す。(a)が1 GHz信号のRF伝送での結果、(b)が1.5 μm帯光キャリア伝送の結果である。“Free run”は位相雑音のフィードバックなしの結果、“Stabilized”はフィードバックありの結果を示す。位相雑音はRF伝送においては約32 dBのキャンセレーションを、光キャリア伝送においては約56 dBのキャンセレーションを達成している。特に後者のそれは往復する光の遅延によって決まる理論限界に達している[10]。周波数安定度についてはRF伝送では位相比較器、光キャリア伝送ではII型周波数カウンターによって

測定を行った。“Free run”の精度に対してRF伝送では約15 dBの改善を示すのに対し、光キャリア伝送では約18 dBの改善を示す。またRF伝送では1日平均で 10^{-18} レベルを、光キャリア伝送では400秒平均で 10^{-18} レベルの安定度を得ている。光キャリア伝送のほうがよりよく位相雑音をキャンセルできている。RF伝送において、1 GHz、10 GHz信号の伝送を行った結果、より高い周波数のほうがより低いシステム雑音を得られることがわかっている[22]。これは周波数が高くなると位相の分解能が上がり、より精密に位相を制御しやすくなるためと考えられる。図6(a)の周波数安定度は2.1にて紹介した電気的位相雑音キャンセルシステムのほか、光学的遅延制御器を加えて得られたものである。詳細は文献[21]を参照していただきたい。

3 まとめ

本稿では、高精度周波数信号伝送を可能とする光ファイバを用いたRF伝送と光キャリア伝送システムについて紹介した。我々のグループでは既に双方のシステム開発が進められており、東京に敷設された通信用光ファイバリンクを用いた実証実験において、RF伝送では1日平均で 10^{-18} 台、光キャリア伝送では400秒平均で 10^{-18} 台の周波数安定度を得ている。光キャリア伝送ではAOMというダブルパスで使用可能な周波数シフターのおかげでRF伝送に比べシンプルなシステムを構築することができた。またこれにより光周波数標準の直接比較をより高精度に短時間で行うことができる。今年度よりNICTと東京大学の間を光ファイバでリンクし、光周波数標準の直接比較測定が始められている。

光キャリア伝送では伝送した光からRF信号を供給するためには光周波数コムが必要となってしまうため、RFユーザーに対してはRF伝送が有効である。実際NICTの敷地内で基準信号をもたない他の実験室へ1kmの光ファイバを通してUTC(NICT)信号の供給を行っている[24]。このように光ファイバ周波数伝送は高精度周波数標準をもたないユーザーへ国家標準にトレーサブルな信

号供給可能とする有効な手段である。このシステムにおいてはその伝送距離をどこまで延ばせるかが一番の問題となる。光ファイバによる信号ロスを考慮すると1台の伝送システムでは150km程度が最長距離であると考えられる。しかしながら、複数台のシステムを直列につないで距離を伸ばすことが可能であり、その場合でも伝送精度は \sqrt{N} での劣化に留まる。もう1つの方法としては、中継点に双方向の光アンプをいれて、光の透過性を保つ方法がある。実際にドイツでは約900kmの光ファイバリンクの4箇所の中継点に双方向光アンプを設置し、複数の研究所と大学を結び、光キャリア伝送を行う計画が進んでいる[25]。この計画では、世界の様々な光ファイバリンクで測定された位相雑音から伝送距離1000kmの場合の精度を推測しており、その値は1000kmの伝送において1秒平均で 1×10^{-13} 、10000秒平均で 1×10^{-17} とされている。それらは依然として衛星経由の従来方法の比較精度を上回るものである。

謝辞

JGN2plus光ファイバリンクの利用に関して多大なる協力をいただいた中村一彦氏に感謝いたします。

参考文献

- 1 C. W. Chou, D. B. Hume, J. C. J. Koelemeij, D. J. Wineland, and T. Rosenband, "Frequency comparison of Two High-accuracy Al^+ optical clocks," *Phys. Rev. Lett.*, 104, 070802, 2010.
- 2 T. Rosenband, D. B. Hume, P. O. Schmidt, C. W. Chou, A. Brusch, L. Lorini, W. H. Oskay, R. E. Drullinger, T. M. Fortier, J. E. Stalnaker, S. A. Diddams, W. C. Swann, N. R. Newbury, W. M. Itano, D. J. Wineland, and J. C. Bergquist, "Frequency ratio of Al^+ and Hg^+ single-ion optical clocks; Metrology at the 17th decimal place," *Science*, Vol. 319, No. 5871, pp. 1808–1812, 2008.
- 3 T. Schneider, E. Peik, and Chr. Tamm, "Sub-hertz optical frequency comparisons between two trapped $^{171}\text{Yb}^+$ ions," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 94, p. 230801, 2005.
- 4 S. Blatt, A. D. Ludlow, G. K. Campbell, J. W. Thomsen, T. Zelevinsky, M. M. Boyd, J. Ye, X. Baillard, M. Fouche, R. Le. Targat, A. Brush, P. Lemonde, M. Takamoto, F.-L. Hong, H. Katori, and V. V. Flambaum, "New limits on coupling of fundamental constants to gravity using ^{87}Sr optical lattice clocks," *Phy. Rev. Lett.*, Vol. 100, p. 140801, 2008.
- 5 A. Bauch, J. Achkar, S. Bize, D. Calonico, R. Dach, R. Hlavac, L. Lorini, T. Parker, G. Petit, D. Piester, K. Szymaniec, and P. Urich, "Comparison between frequency standards in Europe and the USA at the 10-15 uncertainty level," *Metrologia*, Vol. 43, pp. 109–120, 2006.

- 6 J. Frisch, D. Bernstein, D. Brown, and E. Cisneros, "A high stability, low noise RF distribution system," in Proc. PAC 2002, Vol. 2, pp. 816–818, 2002.
- 7 H. Kiuchi, T. Kawanishi, M. Yamada, T. Sakamoto, M. Tsuchiya, J. Amagai, and M. Izutsu, "High extinction ratio mach-zehnder modulator applied to a highly stable optical signal generator," IEEE Trans. Micro. Theo. Tech, Vol. 55, No. 9, pp. 1964–1972, 2007.
- 8 S. M. Foreman et al., "Remote transfer of ultrastable frequency references via fiber networks," Rev. Sci. Inst., 78, 021101, 2007.
- 9 O. Lopez, A. Amy-Klein, C. Daussy, C. Chardonnet, F. Narbonneau, M. Lours, and G. Santarelli, "86-km optical link with a resolution of 2×10^{-18} for RF frequency transfer," Eur. Phys. J. D, Vol. 48, pp. 35–41, 2008.
- 10 P. A. Williams, W. C. Swann, and N. R. Newbury, "High-stability transfer of an optical frequency over long fiber-optic links," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 25, No. 8, pp. 1284–1293, 2008.
- 11 M. Musha, F. -L. Hong, K. Nakagawa, and K. Ueda, "Coherent optical frequency transfer over 50-km physical distance using a 120-km-long installed telecom fiber network," Optics Express, Vol. 16, No. 21, pp. 16459–16466, 2008.
- 12 G. Grosche, O. Terra, K. Predehl, T. Hansch, R. Holzwarth, B. Lipphard, F. Vogt, U. Sterr, and H. Schnatz, "Measurement noise floor for a long-distance optical carrier transmission via fiber," arXiv: 0812. 0289, 2008.
- 13 H. Jiang, F. Kefelian, S. Crane, O. Lopez, M. Lours, J. Millo, D. Holleville, P. Lemonde, Ch. Chardonnet, A. Amy-Klein, and G. Santarelli, "Long-distance frequency transfer over an urban fiber link using optical phase compensation," J. Opt. Soc. Am. B, Vol. 25, No. 12, pp. 2029–2035, 2008.
- 14 N. R. Newbury, P. A. Williams, and W. C. Swann, "Coherent transfer of an optical carrier over 251 km," Optics Letters, Vol. 32, No. 21, pp. 3056–3058, 2007.
- 15 G. Grosche, O. Terra, K. Predehl, R. Holzwarth, B. Lipphardt, F. Vogt, U. Sterr, and H. Schnatz, "Optical frequency transfer via 146 km fiber link with 10^{-19} relative accuracy," arXiv: 0904.2679v1, 2009.
- 16 F. Kefelian, O. Lopez, H. Jiang, C. Chardonnet, A. Amy-Klein, and G. Santarelli, "High-resolution optical frequency dissemination on a telecommunications network with data traffic," Opt. Lett., Vol. 34, No. 10, pp. 1573–1575, 2009.
- 17 M. Calhoun, R. Sydnor, and W. Diener, "A stabilized 100-megahertz and 1-gigahertz reference frequency distribution for Cassini radio science," IPN Progress Report, 42-148, pp. 1–11, 2002.
- 18 F. Narbonneau, M. Lours, S. Bize, A. Clairon, G. Santarelli, O. Lopez, Ch. Daussy, A. Amy-Klein, and Ch. Chardonnet, "High resolution frequency standard dissemination via optical fiber metropolitan network," Review of Scientific Instruments, 77, 064701, 2006.
- 19 長野重夫, 伊東宏之, 李瑛, 熊谷基弘, Clayton R. Locke, John G. Hartnett, 細川瑞彦, "フェムト秒レーザー光周波数コムによる精密周波数計測," 情報通信研究機構季報, 本特集号, 3-4, 2010.
- 20 M. Fujieda, M. Kumagai, T. Gotoh, and M. Hosokawa, "Ultrastable frequency dissemination via optical fiber at NICT," IEEE Trans. Inst. Meas., Vol. 58, No. 4, pp. 1223–1228, 2009.
- 21 M. Kumagai, M. Fujieda, S. Nagano, and M. Hosokawa, "Stable radio frequency transfer in 114 km urban optical fiber link," Opt. Lett., Vol. 34, No. 19, pp. 2949–2951, 2009.
- 22 M. Fujieda, M. Kumagai, and S. Nagano, "Coherent Microwave Transfer Over a 204-km Telecom Fiber Link by a Cascaded System," IEEE Trans. Ult. Ferr. Freq. Cont., Vol. 57, No. 1, pp. 168–174, 2010.

- 23 Japan Gigabit Network 2 plus. [Online]. Available: <http://www.jgn.nict.go.jp/english/index.html>
- 24 M. Fujieda, M. Kumagai, S. Nagano, and T. Gotoh, "UTC(NICT) signal transfer system using optical fibers," IVS NICT-TDC News, 31, pp. 17-20, 2010.
- 25 H. Schnatz et al., "Phase-coherent frequency comparison of optical clocks using a telecommunication fiber link," IEEE Trans. Ult. Ferr. Freq. Cont., Vol. 57, No. 1, pp. 175-181, 2010.



ふじえだ みほ
藤枝美穂

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
精密時刻比較、光ファイバ周波数伝送



くまがい もとひろ
熊谷基弘

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
原子周波数標準、
光ファイバ周波数伝送

ながの しげお
長野重夫

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(理学)
光周波数標準、精密時空計測



いど てつや
井戸哲也

新世代ネットワーク研究センター
光・時空標準グループ主任研究員
博士(工学)
光周波数標準・光精密計測・光周波
数精密伝送