

# コヒーレントライダー光源のための 2 $\mu\text{m}$ 帯光周波数基準伝送システムの開発

## Frequency-comb-based optical transfer for stabilization of injection-seeding laser in 2 $\mu\text{m}$ -coherent lidar system

長野 重夫<sup>1\*</sup>, 熊谷 基弘<sup>1</sup>, 李 瑛<sup>1</sup>, 井戸 哲也<sup>1</sup>, 花土 ゆう子<sup>1</sup>, 石井 昌憲<sup>2</sup>, 水谷 耕平<sup>2</sup>,  
青木 誠<sup>2</sup>, 大塚 涼平<sup>2</sup>, 落合 啓<sup>2</sup>

Shigeo Nagano<sup>1</sup>, Motohiro Kumagai<sup>1</sup>, Ying Li<sup>1</sup>, Tesuya Ido<sup>1</sup>, Yuko Hanado<sup>1</sup>, Shoken Ishi<sup>2</sup>,  
Kohei Mizutani<sup>2</sup>, Makoto Aoki<sup>2</sup>, Ryohei Otsuka<sup>2</sup>, Satoshi Ochiai<sup>2</sup>

情報通信研究機構 時空標準研究室<sup>1</sup>, センシング基盤研究室<sup>2</sup>

Space-Time Standards Laboratory<sup>1</sup>, Remote Sensing Fundamentals Laboratory<sup>2</sup>  
National Institute of Information and Communications Technology (NICT)

### Abstract

Highly-stable and narrow-linewidth Q-switched pulse laser is essential for a coherent lidar to improve the measurement accuracy of greenhouse-gas concentration, wind velocity etc. We have developed a frequency-comb-based optical reference transfer system to stabilize a seed laser for Q-switching operation of 2  $\mu\text{m}$  Tm, Ho : YLF laser by injection seeding. The developed comb-transfer system was able to provide the 2  $\mu\text{m}$  optical frequency reference via a silica-glass optical fiber link. The linewidth and instability of 2  $\mu\text{m}$  reference, which was transferred through 1.7 km fiber linking two laboratories in NICT, were measured to be 100 Hz and  $5 \times 10^{-15}$  at 1 s averaging time, respectively. The developed system was found to be available for the coherent lidar experiment from a primary demonstration of the injection seeding by the seed laser phase-locked to the transferred reference.

### 1 はじめに

産業革命以降の急激な経済発展は人類に多大な恩恵を及ぼしてきたが、化石燃料に支えられてきたその活動は地球温暖化問題を引き起こし、年々深刻化する世界的な規模の環境破壊の原因ともなっている。この現状の改善には広範な環境モニターの構築が必要不可欠であり、地球温暖化と強い相関を持つ温室効果ガス、特に大気中の  $\text{CO}_2$  濃度や吸収・排出量については、これまでよりも 3 ~ 4 桁高い精度を実現できるような観測技術に注目が集まっている。コヒーレントライダーはヘテロダイン検出法を採用することで高精度・高感度モニターを可能にする重要な手法で、波長 2  $\mu\text{m}$  帯光源を利用することで温室効果ガス差分吸収ライダーやドッ

プラーライダーに活用されてきた。このコヒーレントライダー用光源には、発振波長 2  $\mu\text{m}$ 、高パルスエネルギー、単一縦モード、狭線幅・高安定、広い波長掃引幅および高い操作性などといった、現代の成熟したレーザー技術の観点からも互いに相反するような性能が要求される。これらの要求を満たすために、低出力な狭線幅レーザーを高出力レーザーの注入シード光源とすることで、高出力レーザーの発振モード選択および周波数安定化を実現できる Q スイッチパルスレーザーが利用されている [1]。

情報通信研究機構 (NICT) で開発されてきた 2  $\mu\text{m}$  コヒーレントライダーは、より高精度な温室効果ガス分布測定と風の探査を実現するために高度化が推進されている [2]。このコヒーレントライダーに用いる Q スイッチレーザーのシード光源には、発振波長  $2051 \pm 10$  nm、線幅 100 Hz、周波数確度  $6 \times 10^{-10}$  および連続動作 10 時間以上という要求が課せられる。我々はこれらの要求を満たせるシード光源の開発を目的として、波長 2  $\mu\text{m}$  帯の参照周波数基準を供給できる光コム伝送システムを開発した。

### 2 2 $\mu\text{m}$ 帯光周波数基準伝送システム

ファイバーリンクを利用した光周波数伝送は光キャリア伝送と光コム伝送の 2 方式に大別することができる [3]。光キャリア伝送は伝送元 (ローカルサイト) から送信先 (リモートサイト) まで単一モード光のみを送る方式である。この方式はファイバー中で印加される付加ノイズの抑制が比較的簡単であったことから、ファイバーリンクの長さに比例した時間遅れを原因とする原理的制御限界にすでに達しており [4]、例えば 24 km 離れた研究所で同時運転された 2 台の光時計の周波数を比較することにも利用されており、2 つの光時計の高度差に起因して現れる一般相対論効果が観測できるほど高精度を達成している [5]。しかしながら、現在幅

\*e-mail:nagano@nict.go.jp

広く利用されている石英系光ファイバーの低損失波長依存性を最大限に享受するためには、キャリア波長を  $1.5\ \mu\text{m}$  付近のいわゆる光通信波長域に限定することとなり、精度を損なわずに所望される波長と橋渡しするためにはリモートサイトに光コムを準備する必要がある。一方、光コム伝送はモード同期パルスレーザー光を送るので、位相同期した多数のモードを同時に伝送できる。この方式はリモートサイトに光コムが不要になる可能性を秘めており、大幅なコスト削減が期待できる。しかし、伝送パルス光に付加されるファイバーノイズを完全に抑制するために光位相遅延と群遅延の2自由度制御が必要で、システム全体の複雑さから光キャリア伝送ほどの性能には到達していない [6]。また、現在のところ伝送できる光コムスペクトル幅は通信波長域を中心とした  $100\ \text{nm}$  ほどであり、 $2\ \mu\text{m}$  コヒーレントライダーに参照周波数基準を供給するには不十分である。このような問題点を解決するために新たに開発した、コヒーレントライダー光源のための  $2\ \mu\text{m}$  光基準伝送システム概念図を Fig. 1 に示す。これは光コム伝送方式を基盤としており、ローカルサイトである時空標準研究室からリモートサイトであるセンシング基盤研究室へ NICT 内に敷設されたファイバーリンクを用いて、日本標準時にトレーサブルな  $2\ \mu\text{m}$  光基準を送る構成になっている。ローカルサイトに設置された波長  $1538\ \text{nm}$  の超狭線幅レーザーが伝送される光コム参照基準である。このレーザーは Pound-Drever-Hall 法を用いて [7]、超低膨張 (ULE) ガラス製の Fabry-Perot 光共振器に周波数安定化されており、ULE ガラスのゼロ膨張温度に光共振器を温調しつつ高真空槽内に配置することで外部温度変動から隔離し、さらにその真空槽を防音ボックス内の受動防振装置上に設置することで地面振動および音響ノイズの影響を低減させて、レーザー線幅  $1\ \text{Hz}$  級およびアラン標準偏差  $4 \times 10^{-15}$  以下を達成している (Fig. 4(e)) [8]。また、このレーザーの発振周波数  $f_{\text{cw}}$  は NICT が管理する日本標準時によって絶対周波数が  $10^{-15}$  台の不確かさで保証されている。

平均出力  $30\ \text{mW}$ 、パルス繰り返し周波数  $f_{\text{rep}} = 250\ \text{MHz}$  のエルビウム (Er) 添加ファイバーモード同期パルスレーザー (Menlo System, FC-1500) は  $1.5\ \mu\text{m}$  帯にスペクトル幅  $100\ \text{nm}$  の光コム構造を生成している。この光コムを構成する  $n$  番目のモード周波数  $f_n$  は、 $f_n = n f_{\text{rep}} + f_{\text{ceo}}$  と表現することができる。ここで  $f_{\text{ceo}}$  は carrier-envelope オフセット周波数である [9]。この式は、 $f_{\text{rep}}$  と  $f_{\text{ceo}}$  を参照基準に安定化することで光コム全体を安定化できることを明示しており、 $f_{\text{rep}}$  を  $f_{\text{cw}}$  に位相同期 (PLL) させ、 $f_{\text{ceo}}$  を自己参照法で制御することで [10]、光コムを構成する全てのモードを超狭線幅レーザーと同レベルにまで安定化し、光通信波長域を網羅する高精度な周波数グリッドを実現することが可能である。モード同期レーザーからの出射パルス光を高非線形ファイバーに導入すると、自己位相変調をはじめとする様々な非線形光学効果によって  $2\ \mu\text{m}$  帯域を超える光コムスペクトルを得られる [11]。しかし、このような超広帯域光コムを長波長域で急激に増大する赤外吸収損失を持つ石英系ファイバーで直接伝送することは困難である。実際に一般的に使用されている

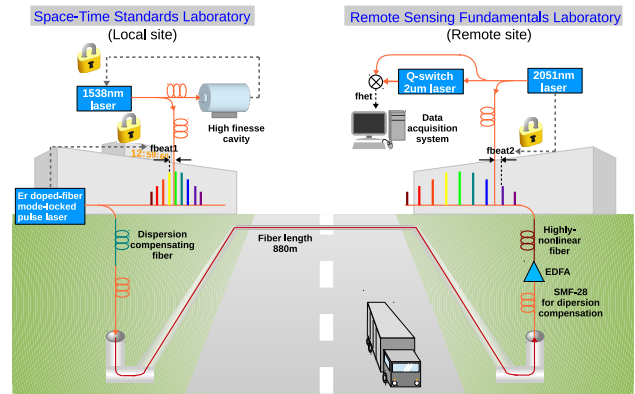


Figure 1: Frequency-comb-based optical transfer system for the stabilization of Q-switched  $2\ \mu\text{m}$  pulse laser. A frequency comb emitted from an erbium-doped-fiber femtosecond-pulse mode-locked laser is phase-locked to a cavity-stabilized narrow-linewidth laser at  $1538\ \text{nm}$  in wavelength. The ultra-short optical-pulse train from the femtosecond laser is transferred from the Space-time standards laboratory (local site) to Remote sensing fundamentals laboratory (remote site) through a polarization-independent single-mode optical fiber with a length of  $880\ \text{m}$ . At the remote site, the optical-pulse train transferred is introduced into a highly nonlinear fiber for spectral broadening exceeding the wavelength required for the frequency stabilization of a  $2051\ \text{nm}$  laser. The laser phase-locked to the  $2\ \mu\text{m}$  optical reference is served as a seed laser for a Q-switched pulse laser in coherent lidar system.

シングルモードファイバー (SMF-28) の波長  $2\ \mu\text{m}$  での伝送損失は  $30\ \text{dB/km}$  以上にも達するため、リモートサイトにおいてシード光源の安定化に十分な光量を確保することはできなかった。そこで、我々は参照基準に安定化された  $1.5\ \mu\text{m}$  帯光コムを約  $880\ \text{m}$  の偏波無依存光ファイバーでリモートサイトへ低損失で伝送した後、高非線形ファイバーによる光コムスペクトルの波長拡大を行っている。ただし、石英系ファイバーのゼロ分散波長は  $1.3\ \mu\text{m}$  付近にあり、 $1.5\ \mu\text{m}$  帯の超短パルス光は波長分散の影響により伝送後にチャープを起こすため、Er ファイバー光増幅器を利用して高非線形ファイバー内で十分な非線形効果を生じさせるだけのパルスピーク強度は得ることができない。そこで、伝送ファイバーの波長分散特性と逆特性を持った分散補償ファイバーをローカルサイトに導入して送信前の光パルスを予めプリチャープさせておくことで、リモートサイトにおいて再び超短パルスが復元されるように設計している。Fig.2 に伝送後に波長拡大された光コムスペクトルを示す。リモートサイトでの光スペクトルは  $1170\ \text{nm}$  から  $2150\ \text{nm}$  を網羅している。これは  $\text{CO}_2$  の R30 振動-回転遷移を検出する  $2\ \mu\text{m}$  コヒーレントライダーに十分であるだけでなく、 $\text{CO}_2$  以外の温室効果ガスとして極めて重要と見なされているメタン ( $\text{CH}_4$ ) な

どの検出にも利用可能である。このような長距離ファイバー伝送後に超広帯域光コムを発生させた研究は世界で初めてである。

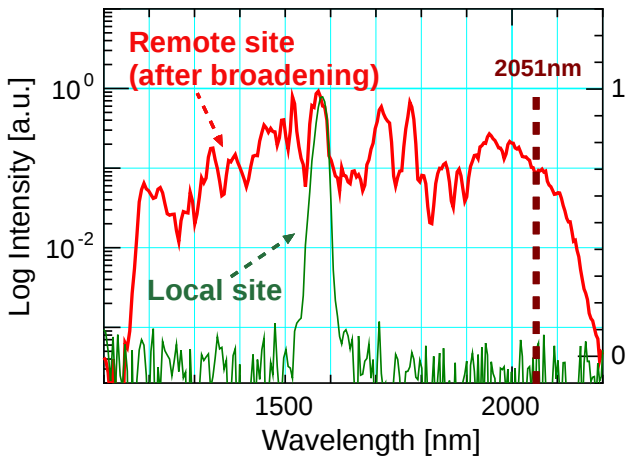


Figure 2: Optical spectra of frequency comb at Space-time standards laboratory (local site) and Remote sensing fundamentals laboratory (Remote site) in NICT. Two laboratories are linked with optical fiber network with 880 m length. The transferred comb spectrum was broadened by a highly nonlinear fiber at the remote site and ranges from 1170 to 2150 nm at 20 dB below maximum. The wavelength of 2051 nm for a coherent lidar system is indicated by dotted line.

### 3 実験結果

開発した  $2\ \mu\text{m}$  光基準伝送システムの性能評価を実施するために、時空標準研究室とセンシング基盤研究室を結ぶ 2 本の光ファイバーで往復リンクを確保し、時空標準研究室内に仮想リモートサイトを構築して、伝送前後の光コムの線幅および安定度測定を行った。波長 2051 nm 付近の光コムモードの線幅を Fig. 3 に示す。これらはローカルサイトに構築された、ファイバー伝送には関わらない独立した超広帯域光コムをリファレンスとしたヘテロダインビート信号計測から得られた。伝送前のモード線幅 (Fig. 3(a)) は 1 Hz 以下であり、測定器の分解能によって制限されている。これは光コムが参照基準である狭線幅レーザーの線幅まで狭窄化されていることを意味している。一方、伝送後の線幅 (Fig. 3(b)) はキャリア対ノイズ比 (CNR) が著しく劣化すると同時に 10 Hz 程度の周波数揺らぎも観測されたが、シード光源への要求は満たしていることが確認された。Figure 4(c,d) はファイバー伝送前後のアラン偏差を表している。伝送前の安定度は平均時間 100 s ほどで  $10^{-17}$  台に到達しているが、伝送後にはファイバーノイズの影響で平均時間  $10^3$  s を超えても  $10^{-15}$  レベルに制限されている。将来、より厳しい性能要求が課せられた際は G. Marra らが開発した能動ファイバー長制御法で対応可能であると考えられる [6]。

ファイバー伝送された  $2\ \mu\text{m}$  光基準に対して、波長

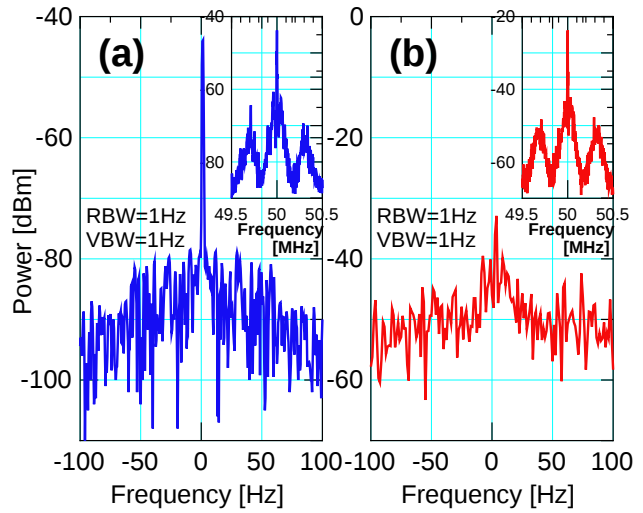


Figure 3: Spectra of the heterodyne beat linewidth between two original comb modes (a: before fiber transfer) and returned comb mode after a round trip through the fiber link (b). Each inset shows the beat spectrum with much wider 1 MHz span.

2051 nm、出力 50 mW の Tm : YLF 固体レーザー (CLR Photonics, METEOR) を位相同期させることで狭線幅シード光源を開発した。このシード光をパルス繰り返し周波数 30 Hz、パルス幅 150 ns、パルスエネルギー 80 mJ、単一周波数発振の Tm, Ho : YLF レーザーに注入シードさせて Q スイッチ動作の実証実験を行った [2]。Q スイッチパルスレーザーの周波数変動を Fig. 5 に示す。シード光源がフリーラン状態のとき、Q スイッチレーザー周波数には Tm, Ho : YLF レーザー起因の約 15 kHz/s の周波数ドリフトを確認することができるが、狭線幅シード光源を使用することで周波数ドリフトは消失し、Q スイッチレーザー周波数とシード光源周波数は一致することが確認できた。ただし、狭線幅シード光源を使用したときにも周期性のない振幅 1 MHz 程度の周波数揺らぎが発生していることが分かる。これは Q スイッチレーザーにおけるシード光源の主な役割が Tm, Ho : YLF レーザーの発振モード選択であり、その短期周波数安定度への寄与は小さいために抑圧できなかった Tm, Ho : YLF レーザーの周波数揺らぎが表れていると考えられる [12, 13, 14]。Q スイッチレーザーの周波数安定度を Fig. 4(a,b) に示した。平均時間 1 s 以上では Tm, Ho : YLF レーザーの周波数ドリフト抑制効果が見られる一方で、1 s 以下では狭線幅シード光源の恩恵はほとんど得られていない。

### 4 まとめと今後の課題

コヒーレントライダー用 Q スイッチレーザーのための  $2\ \mu\text{m}$  帯光周波数基準伝送システムを開発した。このシステムは光コム伝送方式を採用しており、ファイバー伝送後にリモートサイトで波長拡大を行うことで、 $1.1\ \mu\text{m} \sim 2.1\ \mu\text{m}$  を網羅する超広帯域光コムスペクトル

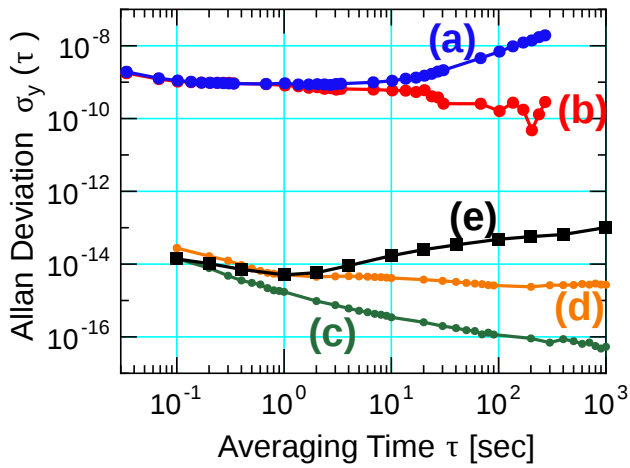


Figure 4: Measured frequency instabilities as given by the Allan standard deviation. (a,b) Instabilities of Q-switched  $2\ \mu\text{m}$  laser injection-seeded by free-running and comb-stabilized seed laser, respectively. (c,d) Instabilities of original comb mode (before fiber transfer) and returned comb mode at  $2051\ \text{nm}$  after a round trip through a  $1.7\ \text{km}$  fiber link. (e) Instability of cavity-stabilized narrow-linewidth  $1.5\ \mu\text{m}$  laser against a cryogenic sapphire oscillator.

を供給可能である。このシステムで伝送された  $2\ \mu\text{m}$  帯光基準の線幅は約  $10\ \text{Hz}$ 、周波数安定度は  $5 \times 10^{-15}$  (@ $1\ \text{s}$ ) である。この光基準に位相同期したシード光源を高出力  $\text{Tm, Ho} : \text{YLF}$  レーザーに注入シードすることで、Q スイッチ動作することを確認した。また、 $\text{Tm, Ho} : \text{YLF}$  レーザー由来の周波数ドリフトが抑制されることも観測された。今後の課題としては、システムの連続動作安定性の向上が挙げられる。これに関しては、伝送ファイバーの温度揺らぎにより発生する偏波回転を制御することによって、要求された連続運転  $10$  時間以上を達成されると考えている。

## References

[1] A.E. Siegman: *LASERS* (University Science Books, 1986).  
 [2] S. Ishii, K. Mizutani, P. Baron, H. Iwai, R. Oda, T. Itabe, H. Fukuoka, T. Ishikawa, M. Koyama, T. Tanaka, I. Morino, O. Uchino, A. Sato, and K. Asai, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **29**, 1169 (2012).  
 [3] S.M. Foreman, K.W. Holman, D.D. Hudson, D.J. Jones, and J. Ye, *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 021101 (2007).  
 [4] P.A. Williams, W.C. Swann, and N.R. Newbury, *J. Opt. Soc. Am. B*, **25**, 1284 (2008).  
 [5] A. Yamaguchi, M. Fujieda, M. Kumagai, H. Hachisu, S. Nagano, Y. Li, T. Ido, T. Takano,

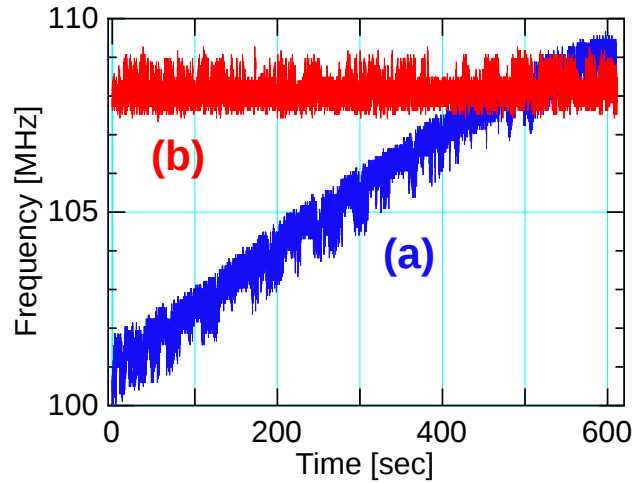


Figure 5: Measured frequencies of Q-switched  $2\ \mu\text{m}$  pulse laser injection-seeded by free-running (a) and comb-stabilized seed laser (b), respectively.

M. Takamoto, and H. Katori, *Appl. Phys. Express*, **4**, 082203 (2011).  
 [6] G. Marra, H. S. Margolis, and D. J. Richardson, *Opt Express*, **20**, 1775 (2012).  
 [7] R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, J. Hough, G.M. Ford, A.J. Munley, and H. Ward, *Appl. Phys.* **B 31**, 97 (1983).  
 [8] D. W. Allan: *Proc. IEEE* **54**, 221 (1966).  
 [9] J. Ye and S.T. Cundiff: *Femtosecond Optical Frequency Combs: Principle, Operation, and Applications* (Springer, New York, 2004).  
 [10] S.A. Diddams, D.J. Jones, J. Ye, S.T. Cundiff, J.L. Hall, J.K. Ranka, R.S. Windeler, R. Holzwarth, T. Udem, and T. W. Hänsch, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5102 (2000).  
 [11] 大西 正志, *光技術コンタクト*, **45**, 183 (2007)  
 [12] J.-L. Lachambre, P. Lavigne, G. Otis and M. Noël, *IEEE J. Quantum Electron.*, **12** 756 (1976).  
 [13] Y.K. Park, G. Giuliani and R.L. Byer, *IEEE J. Quantum Electron.*, **20** 117 (1984).  
 [14] 平等 拓範, 尾岸 久隆, 小林 喬郎, 福井大学工学部研究報告, **39**, 279 (1991).