

光周波数コムの大気微量分子の長光路吸収測定への応用
 Application of Optical Frequency Comb to Long-Path Absorption Measurements
 of Atmospheric Trace Species

杉本伸夫¹, 湊 淳²

Nobuo Sugimoto¹ and Atsushi Minato²

1 国立環境研究所, 2 茨城大学大学院理工学研究科

1 National Institute for Environmental Studies, 2 Ibaraki University

Abstract

Applications of the dual comb spectroscopy to long-path absorption measurements of atmospheric trace species are discussed. Concept of the switching-comb long-path absorption spectrometer system using a single variable pulse-repetition frequency comb for both signal and local oscillator is proposed. The pulse repetition frequency is switched alternately with the period of the delay in the signal path. Concept of a comb heterodyne receiver for a geosynchronous satellite for earth-to-satellite long-path absorption measurements is also presented and discussed.

はじめに

光周波数コムは、モードロックレーザーなどで得られ、Fig. 1 の右側に示すように櫛状のスペクトルを持つ。時間領域では、短パルスのパルス列である。スペクトル全体の幅は1つのパルス幅の逆数に比例し、スペクトル領域の櫛の間隔は、パルスの繰り返しと対応する。また、櫛の一本の周波数幅は、パルス列の継続時間の逆数に比例する。

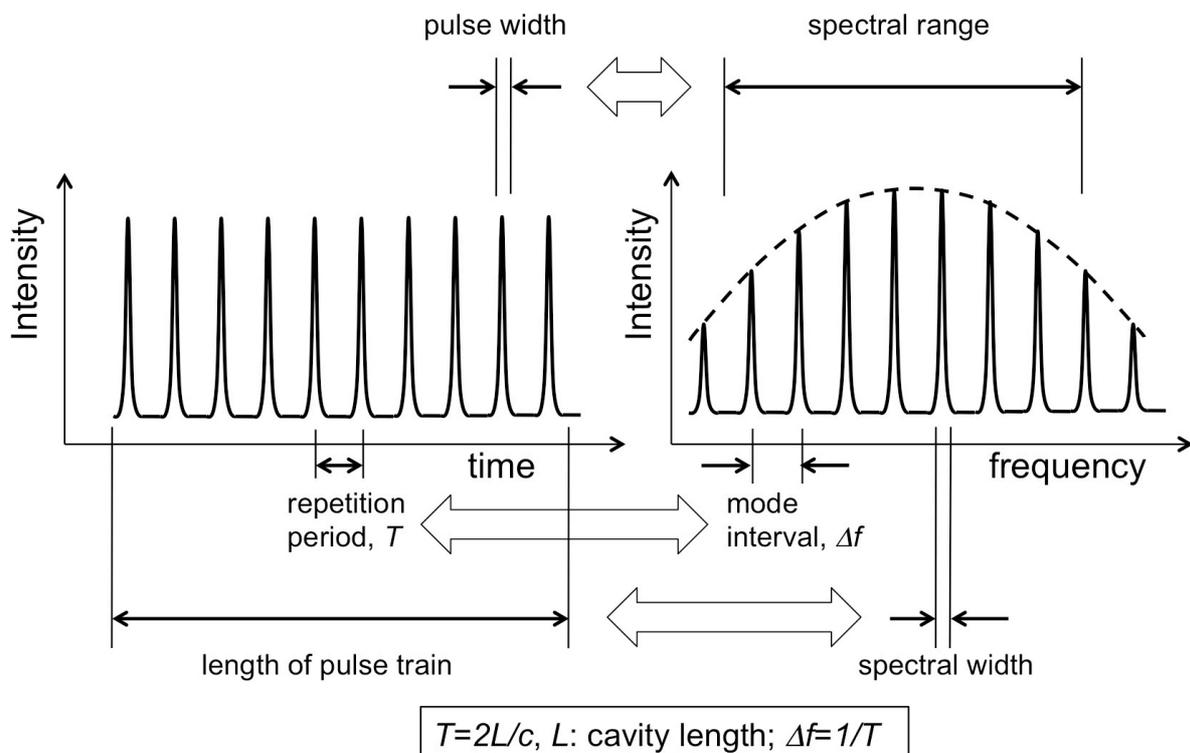


Fig. 1 Fundamental characteristics of optical frequency comb.

光コムは、光周波数の測定や周波数標準等に利用されているが、分光測定における応用として2つの光コムを用いた **dual comb spectroscopy** が注目されている^{1,2)}。これは、Fig. 2 に示すように、パルス繰り返し数が適度に異なる2つの光コムを用い、一方を信号光、もう一方をローカルオシレータ光としてヘテロダイン検波を行ないラジオ波領域のビート信号を解析する。ビート周波数は、コムの歯毎にわずかに異なるので、光領域のスペクトルをラジオ波領域のスペクトルに変換して測定することができる。測定の1周期に要する時間は、簡単には2つのコムのパルス列のタイミングのずれがパルスの繰り返し周期を越える時間である。

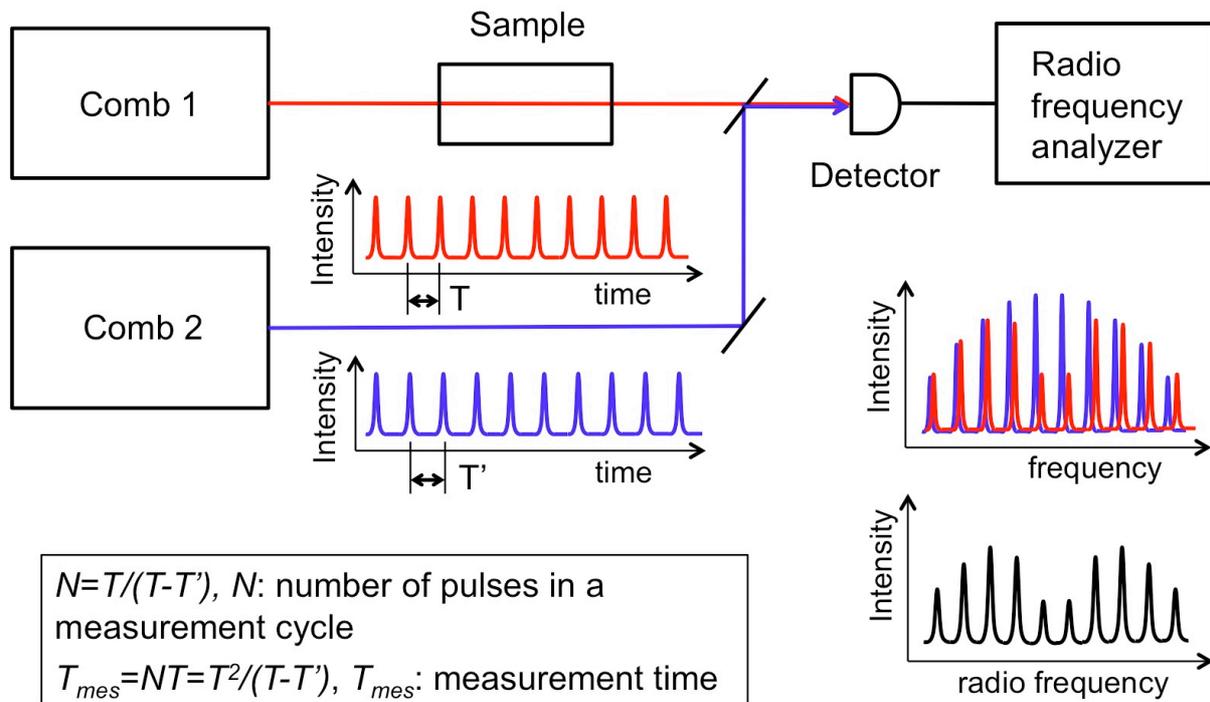


Fig. 2 Concept of dual comb spectroscopy.

Dual Comb Spectroscopy の長光路吸収測定への応用

一例として、 $2\ \mu\text{m}$ 帯の比較的狭い波長領域で炭酸ガスの吸収線の形状を測定するような場合を考える。コム1のパルス周期を10ns、コム2を10.01nsとすると、モード間隔はそれぞれ100MHzと99.9MHzで、ビート信号の周波数は0.1MHzずつ増える。アナライザのチャンネル数を400とするとビート周波数で40MHz、光周波数で40GHzの領域をカバーする。コムの中心波長を仮に $2\ \mu\text{m}$ とするとコム1のモードの次数は1,498,962程度、コム2は、1,500,461程度となる。ビート周波数のオフセットは、コム1、コム2のパルス周期を微調整することによって調整できる。この例では、1測定周期のパルス数 (Fig.2 中の N) は1000である。この N は一般には整数ではなく、その場合は測定周期毎にパルス列の位相が異なることになるが、スペクトル領域でビート信号のパワーを測定する場合には問題にはならないと考えられる。この例では、測定の1周期の時間は $10\ \mu\text{s}$ である。

Dual Comb Spectroscopy はフーリエ変換赤外分光法に取って代わるものとして、その可能性が期待されている。光コムは、各種のモードロックレーザー、モードロックレーザーの差周波発生、あるいはファブリペロ型電気光学変調器によるサイドバンド発生などで得られるが、現在のところ赤外域の分光測定に利用できるものは限られているようである。Dual Comb

Spectroscopy は、一般には、広いスペクトル領域を短時間に測定できる点に特徴があるが、上の例のように大気微量分子の測定では必ずしも広範囲のスペクトル領域をカバーしなくてもその利点を活用できると考えられる。

Dual Comb Spectroscopy では多重化したヘテロダイン検波を用いる。このとき、信号チャンネルに関係しないローカルオシレータ光のショットノイズが余計な雑音源になるので、ビート信号のパワーに対する SN 比は、単一チャンネルの場合に比べて、チャンネル数に逆比例して低下する。大気中の微量分子の測定では、不要な波長領域のローカルオシレータ光をフィルタで除去するなどの工夫も必要であろう。

Switching-Comb Long-Path Absorption Spectrometer System の提案

Dual comb spectroscopy を長光路吸収測定に応用する場合、信号光が長光路を往復するのに要する時間遅れを利用して、1 台の光コムを信号とローカルオシレータ光の両方に交互に切り替えて用いることができる。この方法の概念を Fig. 3 に示す。信号光が光路を往復する時間遅れと同じ周期で、光コムの繰り返し数を交互に切り替える。信号光の時間遅れが測定の周期よりも長いことが条件で、測定周期の設定によってはデッドタイムもあるが、1 台の光コムではほぼ連続的に測定を行うことができる。なお、測定されるスペクトルのサンプリング点は切り替える 2 つの測定モードでわずかに異なる。前節の例では、測定周期は $10\mu\text{s}$ であるので光路長は往復 3km 以上必要である。また、光コムの切り替えは十分に短い時間 ($1\mu\text{s}$ 程度以下) で行う必要がある。この手法は、大気微量分子の地上の長光路吸収システムや、地表面散乱を利用した衛星搭載の温暖化ガス測定システムなどに応用できると考えられる。

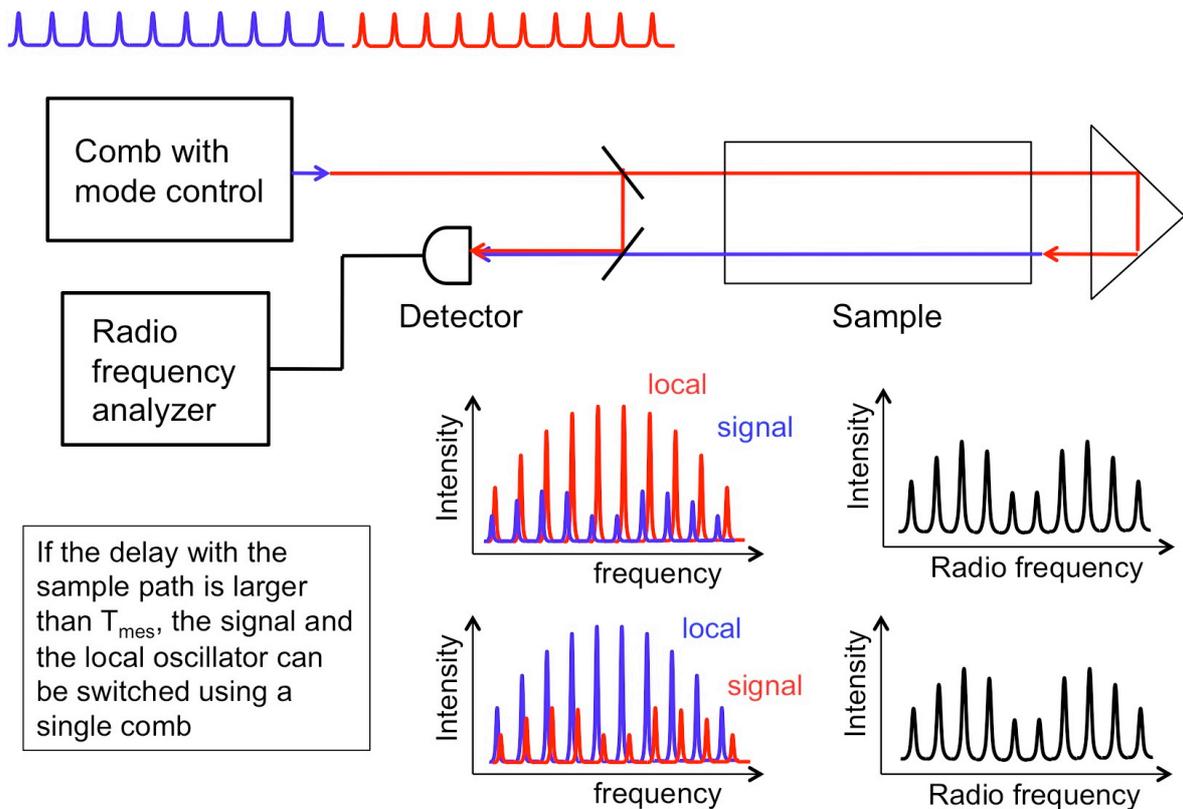


Fig. 3 Concept of switching-comb long-path absorption spectrometer system

地上-静止衛星間レーザー長光路吸収測定への光コムの応用

地上衛星間のレーザー長光路吸収は、大気微量成分の高感度の測定手法として有用であると考えられ、筆者らは衛星搭載レトロリフレクターを使った実験³⁾や分光手法の検討⁴⁾を行ってきた。特に、地上から送信するレーザー光を静止軌道衛星で受信するシステムは運用効率の高い測定システムとして期待される^{5,6)}。しかし、これまでに検討された手法は、いずれも地上局と衛星との間の測定プロトコルの設計が複雑であった。ここでは、光コムヘテロダイン受信器を静止軌道に搭載する手法を提案する。この手法では、多数の地上局との測定を同時に行うことは困難で、衛星側には地上局をポインティングする機能が必要であるが、地上局側には複雑な測定プロトコルは不要で、決められた繰り返し数の光コムを送信するだけで測定が成立する。ただし、コムのパルス繰り返し周期を精密に（9桁程度以上の精度で）制御することが必要である。

まとめ

以上、光コムを利用した大気微量分子の測定の可能性についてごく基本的な検討を行ない、Switching-Comb長光路吸収システムと静止衛星搭載光コム受信システムを提案した。今後、複数の大気微量成分の効率的な測定の具体的な検討と光コムの発生および制御手法の検討が必要である。また、測定中の光路長の変化やスペックル雑音などの影響の評価も必要である。

参考文献

- 1) B. Bernhardt, E. Sorokin, P. Jacquet, R. Thon, T. Becker, I. T. Sorokina, N. Picqué, and T. W. Hänsch: Mid-infrared dual-comb spectroscopy with 2.4 μm Cr^{2+} : ZnSe femtosecond lasers, *Appl. Phys. B*, 100, 3-8 (2010).
- 2) A. Schliesser, M. Brehm, F. Keilmann, and D. W. van der Weide: Frequency-comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing, *Optics Express* 13, 9029-9038 (2005).
- 3) N. Sugimoto, N. Koga, I. Matsui, Y. Sasano, A. Minato, K. Ozawa, Y. Saito, A. Nomura, T. Aoki, T. Itabe, H. Kunimori, I. Murata, and H. Fukunishi: Earth-Satellite-Earth Laser Long-Path Absorption Experiment Using the Retroreflector in Space (RIS) on the Advanced Earth Observing Satellite (ADEOS), *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 1, 201-209 (1999).
- 4) N. Sugimoto, A. Minato: Heterodyne spectroscopy using broadband short-pulse laser for long-path absorption measurement of atmospheric trace species, *Jpn. J. Appl. Phys.* 33, 7A, 3934-3936 (1994).
- 5) N. Sugimoto: Atmospheric environment monitoring system based on an earth-to-satellite Hadamard transform laser long-path absorption spectrometer: a proposal, *Appl. Opt.* 26, 763-764 (1987).
- 6) N. Sugimoto, A. Minato, K. Ozawa, Y. Saito, and A. Nomura: Theoretical evaluation of earth-to-satellite laser long-path absorption measurement of atmospheric trace species in the infrared region, *Jpn. J. Appl. Phys.* 34, 5A, 2329-2334 (1995).