

周波数シフト帰還型レーザーを用いたリフレクトメトリー

中村孝一郎・伊藤 弘昌

周波数シフト帰還型(frequency-shifted feedback: FSF)レーザーは、レーザー共振器に周波数シフターとして音響光学素子(acoustooptic modulator: AOM)を挿入し、その1次回折光(ドップラーシフト光)で帰還ループを形成するレーザーである¹⁾。その出力はチャープ周波数コムで構成されており²⁾、このチャープ周波数コムの周波数変化率は数百 PHz/s ($P=10^{15}$)と超高速であり、またコム成分間に高い位相の相関関係が存在する³⁾。このようなユニークなスペクトル特性を有するFSFレーザーをリフレクトメトリーの光源として用いれば、従来のリフレクトメトリー手法にない性能が期待される。

1. FSFレーザーによるリフレクトメトリーの原理

1.1 FSFレーザー

FSFレーザーでは、共振器内の光波につねに周波数シフトが与えられるので、定在波が存在することはできず、その出力はチャープ周波数コムとなる。レーザー出力の瞬時周波数の時間変化は次式で与えられる。

$$\nu_i(t) = 2\nu_{\text{AOM}}t/\tau_{\text{RT}} - q/\tau_{\text{RT}} \quad (1)$$

式中、 ν_{AOM} はAOMの駆動周波数、 τ_{RT} は共振器の周回時間、 q は整数である。すなわち周波数チャープ率は共振器で光波が受ける単位時間当たりの周波数シフト量に等しく、コムの間隔は共振器縦モード周波数に等しい。コム成分のチャープ幅は共振器の利得に依存して変化し⁴⁾、同時に存在するコム成分の数はチャープ幅が広いほど増加する。

図1にFSFレーザーの構成を示す。利得媒質にはNd:YVO₄結晶を用い、波長810 nmの半導体レーザー(1 W)で励起した。共振器は結晶端面のHRコーティングと出力ミラーからなり、 $1/\tau_{\text{RT}}=1.265$ GHz、 $\nu_{\text{AOM}}=80$ MHzであり、周波数チャープ率は202 PHz/sである。コム成分の周波数チャープ幅は共振器の利得に依存して変化し⁴⁾、本稿で示す実験結果はチャープ幅が16 GHzのときのものである。

1.2 FSFレーザーを光源とする距離計測⁵⁾

チャープ周波数コム出力を、マイケルソン干渉計を用い

て自己遅延ヘテロダイン検波すると、光路差が z のときに観測されるビート周波数は次式で与えられる。

$$\nu_{\text{B}m} = (2\nu_{\text{AOM}}/\tau_{\text{RT}})(z/c) - m/\tau_{\text{RT}} \quad (2)$$

式中、 m はビートの次数であり、 m 次離れたチャープ周波数コム成分間の干渉により生じるビートであることを表す。図2に、干渉計の光路差とビート周波数の関係を示す。距離測定を行う上では、ビートの次数 m の判別が重要であり、次式により判別する。

$$d\nu_{\text{B}m}/d\nu_{\text{AOM}} = (m + \nu_{\text{B}m}\tau_{\text{RT}})/\nu_{\text{AOM}}\tau_{\text{RT}} \quad (3)$$

すなわち、AOMの駆動周波数に対するビート周波数の変化が、ビートの次数 m に比例する関係から次数の判別が可能となる。

2. 実験結果

図3は、干渉計の片側の光路に長さ約2.5 kmのシングルモードファイバーを用いたときのビートスペクトルである。ビートスペクトルの測定、次数の判別などは、すべてコンピューターからの自動制御により行った。共振器縦モード周波数以下に2つのビート周波数が観測され、それぞれの次数は式(3)にもとづいた測定⁵⁾から3919次、3920次と判別された。式(2)からこれらの次数が観測される光路差は7346.25~7350 mであり、既知のファイバー(約2.5 km)の往復の光学長と一致する。距離の分解能はビートスペクトルの広がり依存し、この場合9.4 mmである。この値は、周波数チャープの持続時間から決まる理論値にほぼ等しい値であり、FSFレーザー出力の周波数チャープの線形性の高さを示している。

周波数シフト帰還型レーザー(FSFレーザー)による光距離計測について述べた。その特長は、チャープ周波数コム出力の高次ビートの活用によって、幅広い距離範囲で高い距離分解能が得られる点である。中長距離での光距離計測では、OFDR・OTDRがよく用いられるが、10 km以上では10 m以下の分解能は難しいのが現状である。一方、FSFレーザーでは、20000次ビートを利用して20 kmの距離を分解能2 cmで測定できる。現在筆者らは、光ファイバーの最低損失波長である1.5 μm 帯で発振するFSFレー

東北大学電気通信研究所 (〒980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)
E-mail: koro@riec.tohoku.ac.jp

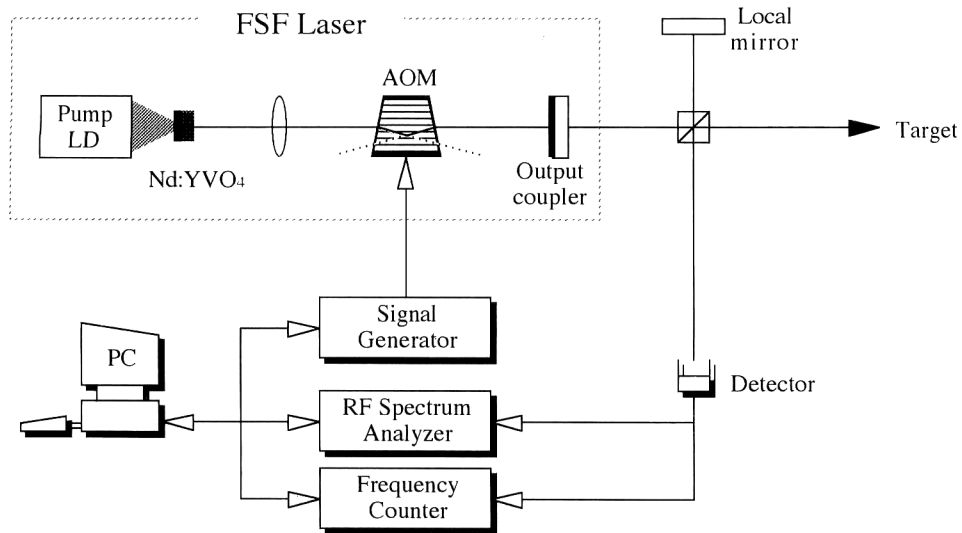


図1 FFSレーザーを光源とする光リフレクトメトリーシステム。

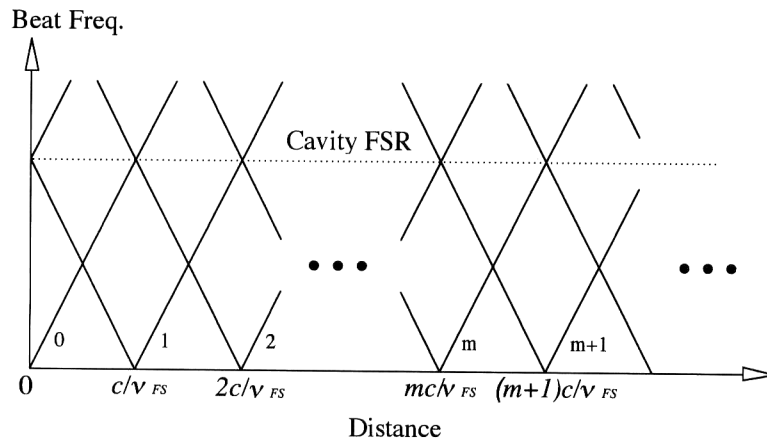


図2 FFSレーザー出力を自己遅延ホモダイン検波したときに観測されるビート周波数と干渉系の光路差の関係。

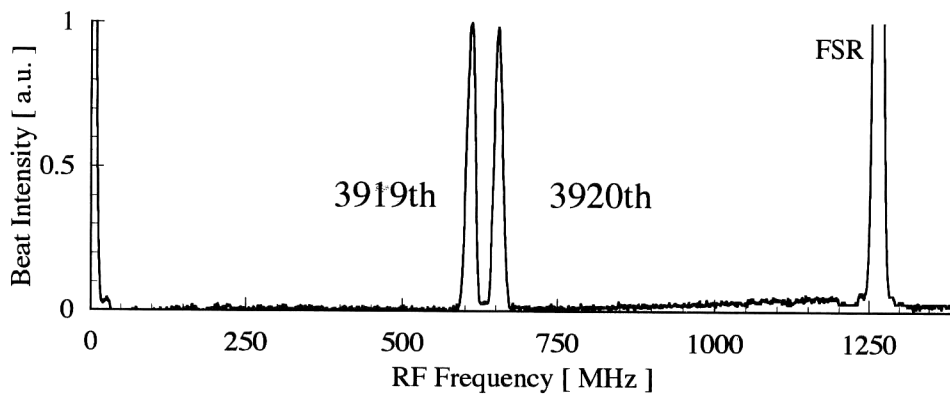


図3 干渉計の光路に長さ約2.5 kmの光ファイバーを用いたときのビートスペクトル。

ザーの研究も進めている。今後、光ファイバーセンサーとの組み合わせにより、圧力や温度などの各種物理量のセンサーネットワークなどへの応用が期待される。

文 献

- 1) F. V. Kowalski, *et al.*: Opt. Lett., **13** (1997) 622.
- 2) K. Nakamura, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **33** (1997) 103.
- 3) K. Nakamura, *et al.*: Appl. Phys. Lett., **72** (1998) 2631.
- 4) K. Kasahara, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **34** (1998) 190.
- 5) K. Nakamura, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **10** (1998) 1772.

(1998年10月30日受理)