L-1

波長可変光フィルタを用いた Fourier Domain Mode Locking レーザによる FBG センサの振動測定

Vibration Measurement of FBG Sensor using Fourier Domain Mode Locking Laser with Optical Tunable Filter

○山口達也[1]，　篠田之孝[2]
*Tatsuya Yamaguchi[1], Yukitaka Shinoda[2]

Abstract: We demonstrated that Fourier domain mode locking (FDML) laser is capable of bidirectional sweeping at sweep frequency of 20.3 kHz, and developed fiber Bragg grating (FBG) measurement system with FDML laser. This paper describes the results of vibration measurement using this system.

１．はじめに

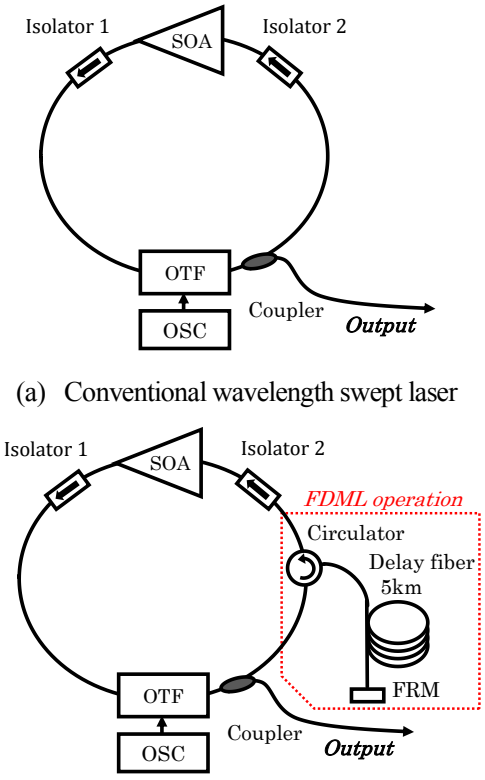
本研究は高速な波長掃引レーザを構築し，光ファイバ型センサのファイバブラッググレーティング(FBG)を用いた高速な振動測定システムを開発することを企図している[1],[2]。しかしながら，波長可変光フィルタを用いた波長掃引レーザでは長波長から短波長方向に高速に波長を掃引したとき，光出力が著しく低下する問題がある。そこで，筆者らは Fourier Domain Mode Locking (FDML)[3]を用いて，双方向の波長掃引が可能な波長掃引レーザを構築した。本文は構築した FDML レーザが高速に双方向の波長掃引ができることを示すとともに，FDML レーザを用いた FBG による高速な振動測定を行った報告である。

２．実験装置

2.1 波長掃引レーザの構成

図１は波長可変光フィルタ OTF を用いた波長掃引レーザの構成である。図１(a)，(b)は各々一般的な波長掃引レーザと FDML レーザの構成である。一般的な波長掃引レーザは光ファイバリング共振器内に利得媒質である半導体光増幅器 SOA，OTF，２つの光アイソレータと光カップラを挿入している。OTF は発振器 OSC の制御信号により選択された波長領域のみを透過する。レーザは発振器 OSC の制御信号に掃引周波数 f_m の正弦波波形を用いて OTF を駆動し，正弦波状の波長掃引を行う。一方，FDML レーザは共振器内に遅延ファイバを挿入している。これにより，FDML レーザは共振器を周回する光の周回時間が OTF の掃引周波数に同期するように制御する。なお，構築した FDML レーザの遅延ファイバの長さは 5km であり，終端にはファラデーローテーターミラーFRM を取り付けている。そのため，長さ 10km に相当する遅延時間が生じる。

実験は掃引周波数 f_m が 20.3kHz の正弦波波形を用いて波長掃引を行った。



(a) Conventional wavelength swept laser

(b) FDML laser

Figure 1. Composition of wavelength swept laser

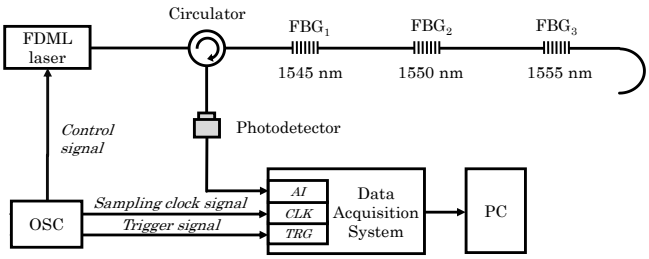


Figure 2. FBG measurement system using FDML laser

１：日大理工・院（後）・電気　２：日大理工・教員・電気

2.2 FDML を用いた測定システム

図２は FDML レーザを用いた FBG の測定システムであり，光学系は FDML レーザ，光サーキュレータ，振動測定用の３つの FBG(λ_{B1}=1545nm，λ_{B2}=1550nm，λ_{B3}=1555nm)と光検出器からなる。FDML レーザからの射出光は光ファイバを伝搬し，光サーキュレータを介し，FBG に入射する。FBG は各々の反射波長の光のみを反射し，反射した光は再び光サーキュレータを介して，光検出器に入射する。測定はデータ集録装置のサンプリング周波数 fs を 40.6MHz とし，検出器の信号を PC に取り込み，反射波長の換算を行う。

実験はレーザの掃引周波数 f_m を 20.3kHz とし，短波長から長波長方向の掃引(順掃引)と長波長から短波長方向の掃引(逆掃引)の双方向の掃引光を用いて FBG の反射波長を測定した。

３．実験結果

3.1 波長掃引レーザの光出力

図３は波長掃引レーザの光出力強度の時間波形を測定した結果である。図３(a)は一般的な波長掃引レーザの結果であり，逆掃引の光出力強度が順掃引に比べて著しく低下している。一方，図３(b)の遅延ファイバを用いた FDML レーザでは順掃引と逆掃引の双方向において光出力が得られている。このことから，FDML レーザでは高速かつ双方向の波長掃引が行えることがわかる。

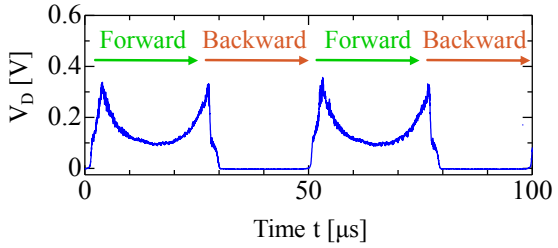
3.2 FDML レーザを用いた振動測定

次に，構築した FDML レーザを用いて FBG の反射波長を測定した。測定は FBG_3 に共振周波数 f_v が 1kHz の音叉を取り付け，音叉を打音することにより振動を印加して行った。図４(a)は振動を印加したときの反射波長の結果であり，時間 t= 0s の音叉の打音により，反射波長の値が大きく変化していることがわかる。図４(b)は図４(a)の t= 1s の時間領域を拡大した結果であり，1kHz で振動する反射波長を測定できている。FDML レーザを用いた FBG の測定システムは双方向の波長掃引により，測定時間分解能 $T_c(=1/2f_m)$が 24.6μs となっている。

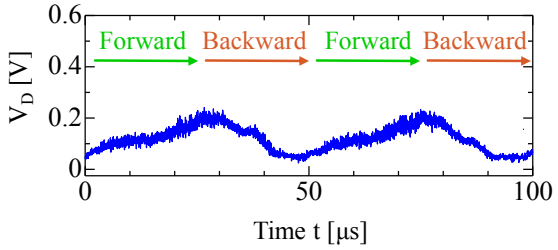
４．まとめ

(1)　筆者らは光の周回時間を制御する FDML レーザを構築し，掃引周波数が 20.3kHz の高速な双方向の波長掃引が行えることを示した。

(2)　FDML レーザを用いた FBG の測定システムは双方向の波長掃引により，24.6μs の測定時間分解能を有し，高速な振動測定ができることを示した。

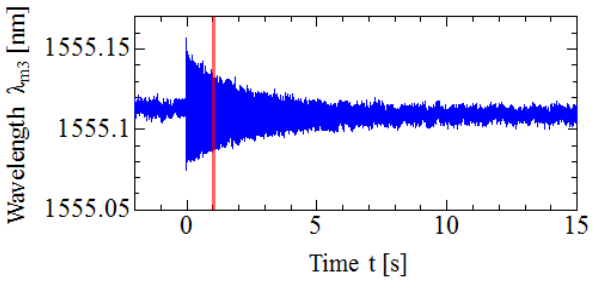


(a) Conventional wavelength swept laser

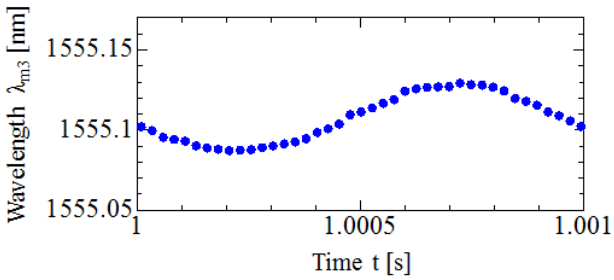


(b) FDML laser

Figure 3. Results of time waveform of laser output



(a) Vibration waveform of reflection wavelength



(b) Enlarged view of (a) at 1s

Figure 4. Results of high-speed vibration measurement

参考文献

[1] J.M.Lopez-Higuera *ed.*, *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, Wiley, 2002.

[2] T.Yamaguchi, Y.Shinoda, “Development of fast FBG interrogator with wavelength-swept laser”, Proc. SPIE 9506, 95061F-1, 2015.

[3] R.Huber *et al*, “Fourier Domain Mode Locking(FDML): A new laser operating regime and applications for optical coherence tomography,” Opt. Express, Vol.14, No.8, pp.3225-3237, 2006.