

フィードフォワード/フィードバック併用型制御の提案とこれを用いた波長可変レーザの高速波長切替の実現

木村凌河 立本雄大 佐熊一輝 恩地裕和 久保木猛 加藤和利
(九州大学大学院システム情報科学研究院)

1 はじめに

近年のデータトラフィックの増大により電気ルータにおける消費電力の増加が問題視されている。その解決策として期待されているのが、光信号を電気信号へと変換することなく光の波長に従って経路を切り替えることが出来る波長ルーティングシステムである[1]。このシステムを構成する主要な素子に波長可変光源と入力された光の波長によって出力先の異なる光フィルタで構成される光スイッチがあるが、この波長可変光源には高速かつ高精度な波長切替が求められている。その光源の1つとして開発された TDA (Tunable Distributed Amplification)-DFB レーザは、電流量変化により波長を数ナノ秒で高速に切り替えることが可能なデバイスである[2]。しかし、電流量変化に伴う発熱量変化による波長変動(熱効果)のために波長が安定するまでに必要な時間は数百マイクロ秒から数ミリ秒となっている。そこで、我々は TDA-DFB レーザの出力波長を計測し、その波長情報をもとにレーザ注入電流をフィードバック制御することで 1 μ s の波長切替を実現した[3], [4]。本稿では構築した制御系を用いた更なる波長切替時間の高速化を目指して、フィードバック制御周期未満の短時間領域に対してフィードフォワード制御を導入した、フィードフォワード/フィードバック併用型制御を提案する。本技術を用いて初めて、波長可変レーザの波長切替時間を 100ns 以下に短縮しつつ長期的波長安定性を実現したのでこれを報告する。

2 波長制御系の構築

2.1 波長検出とフィードバック制御

TDA-DFB レーザの波長を高速制御するにあたり、レーザの波長を高速検出する必要がある。そこで我々は波長検出器であるレーザモジュール内蔵の波長ロッカを用いた波長検出の高速化を検討した。

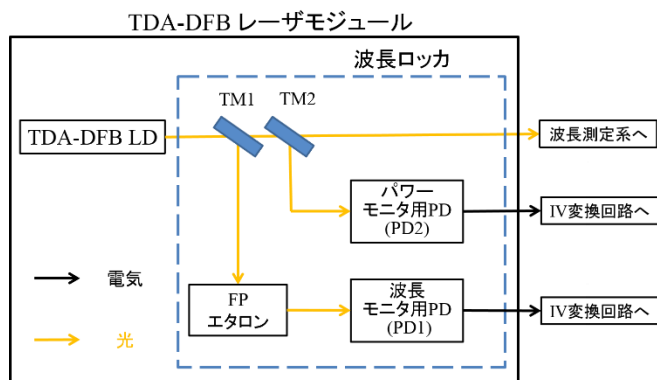


図 1. モジュール内蔵波長ロッカの構成図

図 1 にモジュール内蔵波長ロッカの構成図を示す。波長ロッカは二つのタップミラー(TM1, TM2)、ファブリペローエタロン(FP エタロン)、波長モニタ用フォトダイオード(PD1)、パワーモニタ用 PD(PD2)から構成される。最初のタップミラー(TM1)でタップされた光は FP エタロンを通過し波長モニタ用 PD で電流値に変換され、もう一方のタップミラ

ー(TM2)でタップされた光はパワーモニタ用 PD で電流値に変換される。ここで、レーザの出力強度に依存しない波長の観測を行うために波長モニタ用 PD の電流値をパワーモニタ用 PD の電流値で除算(規格化)する必要がある。今回新たに開発した回路は図 2 に示すように、波長ロッカから出力された電流値を電流電圧変換回路(IV 回路)、対数変換回路(LOG 回路)により電圧値の対数へ変換し、これらを制御装置である Field Programmable Gate Array (FPGA) に入力して二つの対数の差を求め、その値からレーザの波長を算出する。通常 FPGA での単純な除算は時間を要するため、これらの対数値の差を計算することで除算の高速化を行うという工夫により、従来方法と比べて 1 桁以上の高速な波長検出を達成した。また、この検出した波長を参照してレーザに対してフィードバック制御を行った。

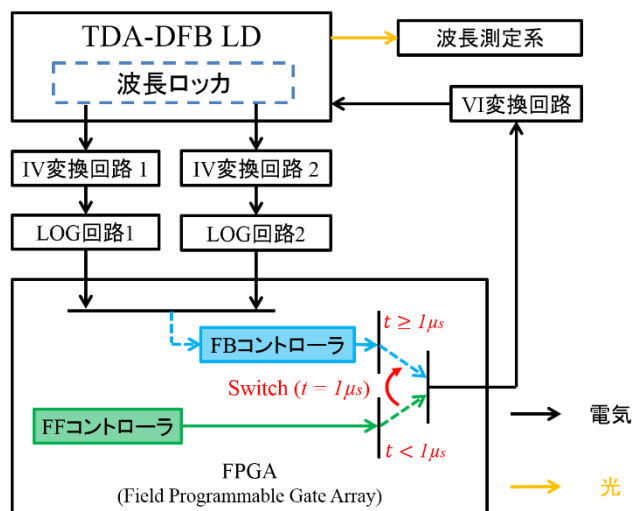


図 2. 波長制御系の構成図

2.2 フィードフォワードコントローラ的设计

フィードバック制御は外乱に対して強い性質を持つが、制御周期未満で発生する外乱に対しては瞬時に対応することが出来ない。そのため、本実験においては制御周期(約 400ns)以内で発生する波長切替直後の急峻な波長変動には対応出来ない。そこで、波長切替後の早い時間領域($< 1 \mu s$)に対してフィードフォワード制御を導入しフィードバック制御と併用することで高速な波長安定化を目指した。図 2 にフィードフォワード制御系のブロック図を示す。まず、入力電圧波形 $u(z)$ に対するレーザの出力波長変化 $y(z)$ の測定値をもとに波長切替特性モデル $P(z)$ を導出した。この際、測定値には雑音成分が含まれているため特性モデルに誤差が生じてしまう。これを防ぐために、レーザの波長変化を複数の現象の組み合わせとして捉え、それらの理論式から雑音成分を含まないレーザ本来の波長変化を導出するという新たな手法を検討した。本実験では、レーザの波長変化をキャリアプラズマ効果による波長変化(P1)、駆動回路による波長変化(P2)、熱効果による波長変化(P3)の3つの現象の組み合わせとして伝達関数を導出し、特性モデル $P(z)$ を導出した。次に導出した $P(z)$ をもとにフィード

フィードフォワード関数 $C(z)$ を設計した。最後に設計したフィードフォワードコントローラ出力 $u(z)$ を FPGA 上に作成し、レーザに対してフィードフォワード/フィードバック併用型制御を行った。

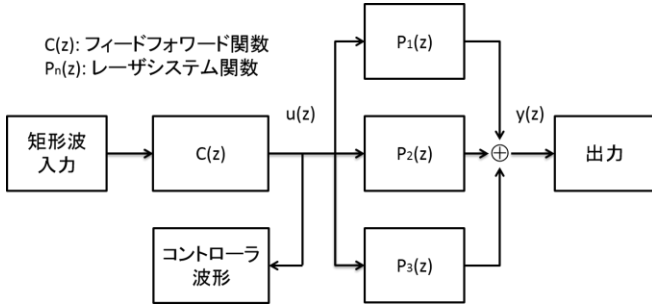


図 3. フィードフォワード制御系のブロック図

3 波長切替実験

図 4 に 194.0 THz から 194.2 THz へ波長切替を行った時の実験結果を示す。ここで、切替後十分時間が経過した 4.5 ms ~ 5 ms の期間の光周波数(波長)を平均した値を収束値とし、この値から ± 1 GHz 以内に収まる時間を波長切替時間と定義した。図中縦軸は収束値からの周波数ずれを、また横軸は波長を切り替えた瞬間からの時間を表しており、制御を行った場合と行わなかった場合をそれぞれ青色とオレンジ色で図中にプロットしている。また、本実験では $t=0$ で波長を切り替えてフィードフォワード制御を行い、 $t=1 \mu\text{s}$ でフィードフォワード制御からフィードバック制御に切り替えている。図 4(a) に短時間領域での制御結果を示す。制御を行わなかった場合、波長切替直後に 15 GHz 程度の急峻な周波数変化(オーバーシュート)が生じており、これが高速な波長切替の妨げとなっていた。一方、制御を行った場合、フィードフォワード制御によってオーバーシュートを 2 GHz 程度まで抑えることで波長切替時間は 80 ns となり、フィードフォワード制御によってフィードバック制御が対応できない短時間領域において目標波長へ収束させることができた。次に、図 4(b) に長時間領域での制御結果を示す。図から $t=1 \mu\text{s}$ でフィードフォワード制御からフィードバック制御へスムーズに移行し長時間にわたり波長を安定化することが確認できた。以上の結果から、波長切替時にフィードフォワード/フィードバック併用型制御を行うことで制御行わなかった場合の波長切替時間 160 μs と比較して非常に高速な 100 ns 未満での高速波長切替および切替後の長時間の波長安定化を達成した。

4 まとめ

フィードバック制御だけでは対応できない短時間領域の波長変動をフィードフォワード制御によって抑制することで高速な波長切替かつ長期間の波長安定化を目指して、フィードフォワード/フィードバック併用型制御を開発した。その結果、フィードフォワード制御による 100 ns 以下の波長切替時間とフィードバック制御による長時間の波長安定性を同時に達成した。これにより波長ルーティングシステムの

要である波長可変レーザを用いた光スイッチの実現性を明らかにした。

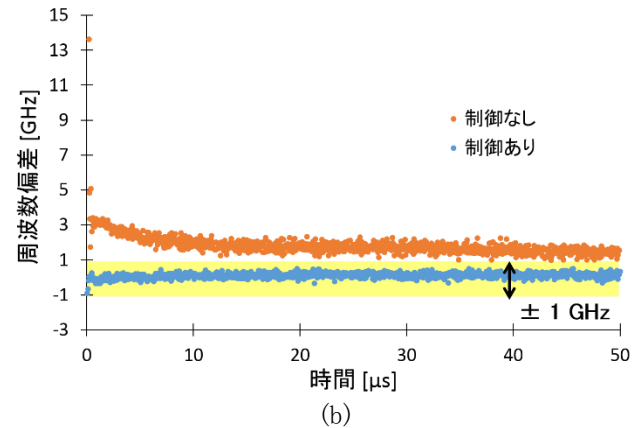
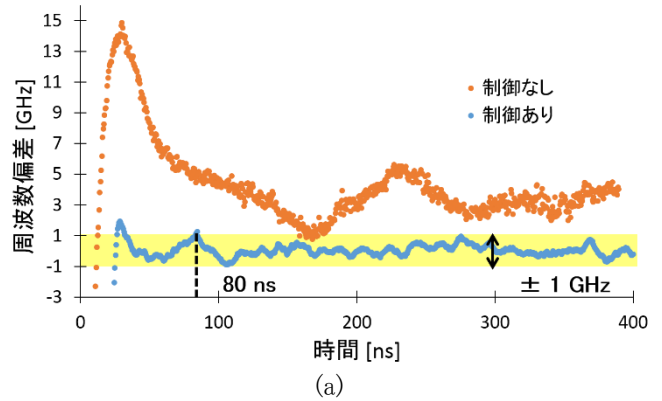


図 4. 波長切替実験結果
(a)短時間領域 (b)長時間領域

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 26420308 によるものです。実験に際して NTT 研究所から多大な支援をいただきました。

参考文献

- [1] K. Habara et al, IEICE Trans. on Commun, E83-B, 2304-2311(2000).
- [2] N. Nunoya et al, IEEE J. Select. Top. Quantum. Electron., 17, 1505-1512 (2011).
- [3] 佐熊他, 2014 年電子情報通信学会総合大会, C-4-21.
- [4] R. Kimura et al, 20th Microoptics Conference (MOC) 2015, H64.