

プログラマブル光ユニタリ回路のロバストな最適化

Robust Optimization of Programmable Unitary Photonic Integrated Circuits

○唐 睿, 湯 涵智, トープラサートポン カシディット, 高木 信一, 竹中 充 (東大工)

○Rui Tang, Hanzhi Tang, Kasidit Toprasertpong, Shinichi Takagi, Mitsuru Takenaka (University of Tokyo)

E-mail: ruitang@mosfet.t.u-tokyo.ac.jp

1. 背景

プログラマブル光ユニタリ回路はチップ上で任意の光ユニタリ変換を実現できるため、光通信、深層学習、量子情報処理などの分野に幅広い応用が期待できる[1]。回路の基本素子として、光を均等に二分岐する光スプリッターが不可欠であり、損失の低い方向性結合器 (DC) がよく用いられる。しかし、DC の光分岐比は作製誤差の影響を受けやすく、設計波長で高精度な光ユニタリ変換を実現することが難しい[2]。また、分岐比が 50:50 になる最適波長から動作波長が離れた場合、ユニタリ変換精度が急速に落ちる。このため、動作波長が大きく制限されている。本発表は、回路の段数を増やし、位相シフト量を最適化することで、作製誤差に対してロバストなプログラマブル光ユニタリ回路が実現可能であることを報告する。

2. 原理

Clements 型回路の標準構造を図 1 (a) に示す[3]。N ポートのデバイスでは N 段のマッハ・ツェンダー干渉計 (MZI) ステージが必要である。所望のユニタリ変換 U と実際に得られた変換 U_{exp} との誤差 ε は、式 (1) より計算できる。

$$\varepsilon = 1 - \left| \frac{\text{tr}(U^\dagger U_{\text{exp}})}{\sqrt{N \text{tr}(U_{\text{exp}}^\dagger U_{\text{exp}})}} \right|^2 \quad (1)$$

DC の光分岐比が 50:50 からずれた場合、 ε が大きくなるが、MZI ステージの段数 (M) を増やし [図 1 (b)], 各位相シフト量を擬似アニーリング (SA) 法で最適化することで、 ε を大幅に低減できる。

3. 計算結果

ランダムに生成された 1000 個のユニタリ行列に対し、4 ポート ($N=4$) の光回路中の位相シフト量を、それぞれ Clements の方法と提案する SA 法で最適化させた。得られた ε の分布の一例を図 2 に示す。ここで、位相シフト量の制御精度が 0.01 rad、各 DC の光分岐比は同じ値を取ることを想定した。30:70 の光分岐比では、Clements の手法 (ε の平均値: 0.24) と比較し、同じ段数 ($M=4$) でも最適化によって ε の平均値は 0.015 に小さくなった。さらに、 $M=8$ まで増やした場合、 ε の平均値は 5.8×10^{-5} と四桁小さくなった。位相シフト量をより高精度に制御できれば、同じ段数でもより小さい ε が期待できる。DC の光分岐比 ($r:100-r$) を 0:100 から 100:0 まで変化させた時の、最適化後に得られた ε の平均値を図 3 に示す。Clements の手法と比較し、同じ変換誤差に対して動作可能な範囲が大幅に改善された。

4. 結論

プログラマブル光ユニタリ回路の段数を増やし、位相シフト量を最適化することで、作製誤差に対してロバストなデバイスが実現可能であることを数値計算から示した。

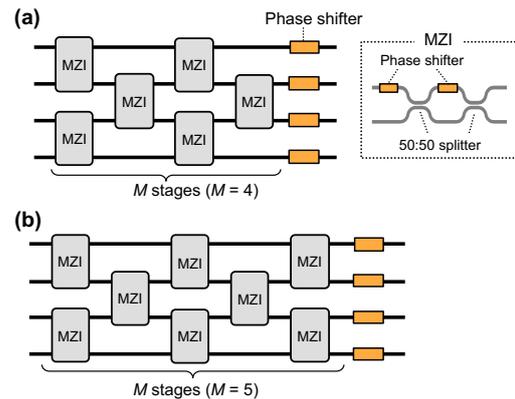


Fig. 1. (a) Schematic of a 4-port device based on Clements's architecture. (b) Example of adding one more MZI stage into the device.

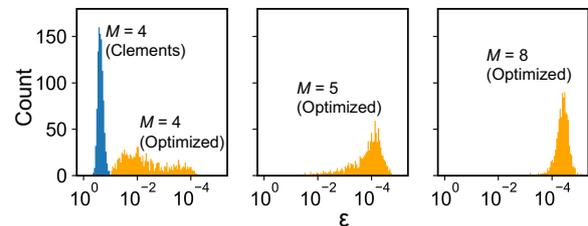


Fig. 2. Error distributions after implementing 1000 unitary matrices on 4-port devices, using the Clements method and the proposed optimization method, respectively. The splitting ratio of DCs is 30:70.

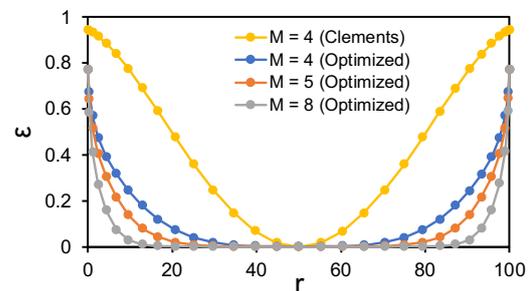


Fig. 3. Averaged errors for various splitting ratios.

謝辞 本研究の一部は JST、CREST、JPMJCR2004 の支援を受けて実施した。

参考文献

- [1] W. Bogaerts et al., *Nature* **586**, 207-216 (2020).
- [2] S. Bandyopadhyay et al., *arXiv:2103.04993* (2021).
- [3] W. R. Clements et al., *Optica* **3**, 1460-1465 (2016).