オンチップ線形光演算とディジタル信号処理による位相回復コヒーレント受信

Phase-Retrieval Coherent Detection with On-Chip Photonic Linear Processing and Digital Signal Processing

NTT 先デ研,°中島 光雅，橋本 俊和

NTT Device Technology Labs., Mitsumasa Nakajima, Toshikazu Hashimoto

E-mail: mitsumasa.nakajima.wc@hco.ntt.co.jp

【背景】

近年、機械学習等に用いられる行列演算を光回路上で実行する線形光演算素子が着目されている[1,2]。その応用として、光通信における信号処理を光演算でアシストする手法が検討されている[3,4]。本稿では、チップ上に集積した線形光演算素子とディジタル信号処理を組み合わせによって、複数の入力信号に対して、強度信号のみから強度・位相信号を復元する手法を提案する。本手法によって、コヒーレント光受信機の抜本的な小型化が可能となる。原理確認として、20GBaud-QPSK 伝送信号によって実験実証する[4]。

【位相回復コヒーレント受信】

図 1 に複数の入力信号を復調するための従来コヒーレント受信手法と、提案手法の概要について示す。通常のコヒーレント受信では、各ポートに外部参照レーザと精密な光干渉系、4 つの PD(2 対の Balanced-PD)を用意し位相を測定する。一方、提案方式では、時間方向の畳み込み演算を行う光回路によって入力電界 E_i を $E_j'=h_{ij}*E_i$ のように変換し、それを複数の PD で受信する。得られた光強度 I_j から位相情報をディジタル信号処理によって元の電界を復元する[5]。ここで、*は畳み込み演算を示し、h_{ij} は i 番目の入力電界の j 番目の出力ポートへの光回路インパルス応答、I_j は二乗検波された光強度 $I_j=|h_{ij}*E_i|^2$ である。h_{ij} はランダムに定めて構わない。本方式は、参照レーザや精密な干渉系が不要であり、複数信号を一括で信号受信できることから、抜本的な装置の小型化が出来る。

得られた光強度 I から元の複素電界 E を求める問題は位相回復問題と呼ばれ、解析的に解くのは困難であるが、尤もらしい値 E_i^{est} を $min\|I - |h_{ij}*E_i^{est}|^2\|^2$ から推定できる[6]。上式について Wirtinger 微分を適用することで、Wirtinger flow と呼ばれる以下の更新則を得る[7]。

$$E_{i,n+1}^{est} = E_{i,n}^{est} + \lambda(n) h_{ij}^{*} * \left(I_j - \left|h_{ij} * E_{i,n}^{est}\right|^2\right)\left(h_{ij} * E_{i,n}^{est}\right), \quad (1)$$

n はイタレーションステップ, λ は更新量に関するハイパーパラメータである。上述のように、推定には h_{ij} の事前測定と $\lambda(n)$の経験的決定が必要であるが、式(1)を$E_{i,n+1}^{est} = E_{i,n}^{est} + f(E_{i,n}^{est})$と考えることで、ニューラルネットの枠組みで式を捉えることが出来る。これによって、h_{ij} と $\lambda(n)$をネットワークの学習パラメータとし、既知の信号にて訓練することで、測定や試行錯誤をすることなく h_{ij} と $\lambda(n)$を決定できる。

【原理実験】

図 2 に実験系の概要と数値/実機実験の結果を示す。本実験では、初期検証として 1 入力の 20GBaud-QPSK 信号を 35 タップの線形畳み込み演算回路に入力した。本方式は入力信号数 M（本実験では M=1）よりも出力ポート数 N が大きいほど精度よく推定出来ることが知られているため、使用する出力ポート数を 1 から 3 まで変化させることで、その依存性を調べた[図 2(b)]。図から分かるように、数値実験、実機実験において、3 つ以上の PD を利用することで、軟判定誤り訂正(FEC)限界を下回るレベルで信号受信を行うことが出来ており、本方式の動作が実証された。今後は、多入力時の動作検証および数値計算との乖離要因の分析を行う。

[1] Y. Shen *et al.*, Nat. Photonics 11, 441–446 (2017).
[2] M. Nakajima *et al.*, Comun. Phys. 4, 20 (2021)
[3] C. Huang *et al.*, Nat. Electron. 4, 837–844 (2021).
[4] M. Nakajima *et al.*, FiO-LS, FW.5E (2021).
[5] Y. Yoshida *et al.*, OFC-PDP, Th4A.3 (2018).
[6] Y. Shechtman *et al.*, IEEE Signal Processing Magazine 32, 87 (2015).
[7] E. J. Candès *et al.*, IEEE Trans. on Information Theory, 64 (2015).

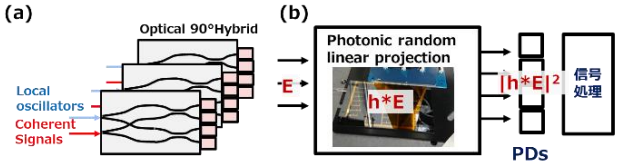

Fig. 1. (a)従来および (b)提案コヒーレント受信の概要

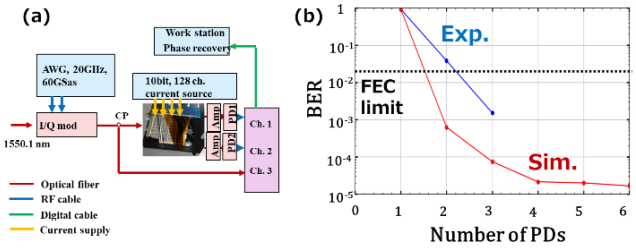

Fig. 2. (a)実験手法(b)数値計算および実機実験結果

© 2022年 応用物理学会