

[研究助成 (A)]

光処理でのパターンマッチングに基づく メモリ不要なパケットスイッチの開拓

A study on optical packet switching by using optical comparison operation

2191001



研究代表者

沖縄工業高等専門学校
情報通信システム工学科

助教 相川 洋平

[研究の目的]

インターネットの出現により我々の世界は一変した。とくに、近年におけるスマートフォンの台頭によって、その影響は加速度的に広がっている。一般に、トラフィックは「伝送」と「処理」とで信号形態を『光』と『電気』に使い分ける必要があり、この信号変換（光電変換）に膨大な電力が必要とされる。そのため、急増するトラフィックは通信網における消費電力をひっ迫する。なかでも、パケットスイッチにおける電力が問題視されているものの、構造上メモリが不可欠であることから、抜本的な改善が困難と考えられている。このような問題に対し、光信号を光のまま制御することで電氣的機能を代替できないものかと考えてきた。これを実現できたならば、「伝送」と「処理」とをシームレスに扱う事が可能となり、両者の光電変換に伴う電力を払拭することができる。

本研究は、メモリ不要なパケットスイッチ技術の開拓に取り組むものである。具体的には、光のままで候補パケットとの尤度を算出する手法を提案し、パケット識別を光信号処理に代替する。また、当該機能の集積化を図るとともに、集積デバイスを用いてパケット識別の動作実証に取り組むものである。これにより、候補パケットを保持するためのメモリが不要となることから、パケットスイッチにおける光電変換を

払拭することができる。この取り組みが光通信網における消費電力を改善し、エネルギー問題解決の一助になることを期待している。

[研究の内容、成果]

図1に、提案技術をパケットスイッチに応用した際の例を示す。スイッチに到着したパケットは、複数に分岐し、それぞれがパケット識別器に入力される。パケット識別器は、候補のパケットに応じて各々が異なる干渉条件に設定されており、入力パケットと候補パケットとの尤度を出力する。これにより、尤度情報から入力されたパケットを推定することが可能となる。このように、候補パケットの数だけ識別器を用いることで、メモリに頼ることなくパケットスイッチを実現することができる。

提案技術である光パケット識別動作は、光が伝搬する過程で処理が完了する。具体的には、候補パケットに応じた位相回転を付与し合波さ

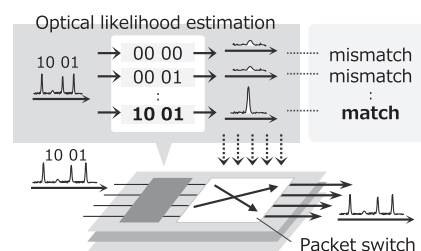


図1 メモリ不要なパケットスイッチの概念図

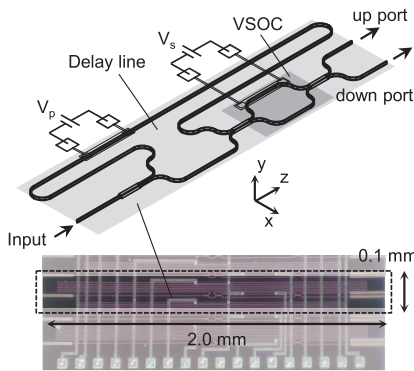
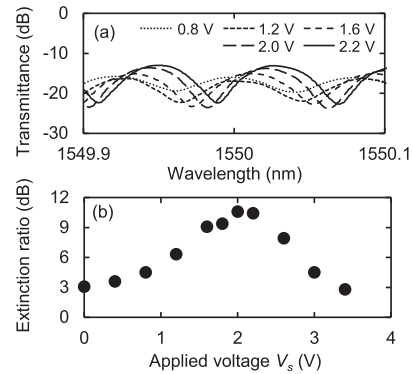


図2 Si 細線導波路を用いた光パケット識別器

せ、複素座標に尤度情報を反映させるものである。時系列な信号を合波させる必要があることから、当該動作は遅延干渉計を用いて実装することができる。そのため、ビットレートに応じた遅延量の設定が重要となる。なお、位相回転のために、熱光学効果を利用したヒータを制御する必要がある。

光パケット識別デバイスをシリコン細線導波路を用いて設計した。図2にデバイスの顕微鏡写真および模式図を示す。当該デバイスは、4 bit QPSK 信号を対象として設計されている。2.0 mm×0.1 mm サイズの矩形型であり、1 入力×2出力の遅延干渉計と同一構造である。シリコン導波路は幅 0.45 μm および厚さ 0.21 μm とし、1550 nm 波長においてシングルモード伝搬を満たす条件として設計した。なお、当該導波路における群屈折率は 4.2 であった。

当該デバイスは、4 bit の QPSK 信号に対して、1 つの合波信号を生成するものである。入力ポート直後の 1×2 カプラが、入力信号を 2 つに分岐する。分岐カプラにつづく上部ポートは遅延線からなる。これは群屈折率に基づいて、通過した光信号が 10 Gbaud において 1 シンボルだけ遅れる長さに設計されている。その後、分岐した 2 つのポートは 1 つに合流するが、その際に入力された 4-bit QPSK 信号は各シンボルが同一時間軸上に並んで合波される。合波カプラはマッハツェンダー干渉計からなる。干渉計には TiN からなるヒータが取り付けられて

図3 印加電圧 V_s に対するスペクトルおよび消光比

おり、電圧印加によって位相シフタとして機能する。すなわち、出力の光強度分岐比を位相シフタへの印加電圧によって制御できる構成となっている。なお、遅延線上にも位相シフタが配置されており、こちらを通過する光信号の位相を自由に変更できる構成となっている。このようにして、当該デバイスは 4-bit の QPSK 信号入力に対して 1 つの合波信号を生成する。

作製したデバイスの静特性を評価した。はじめに、光強度分岐比について動作最適点を導出した。当該デバイスに白色光を入力し、マッハツェンダー干渉計上の位相シフタに電圧 V_s を印加し出力光スペクトルを観察した。図3(a)に、電圧 V_s 印加時における光スペクトルの変化を示す。図3(a)に示す通り、スペクトルは波長に対し周期的に強度が変動する様子が確認された。これは遅延干渉計における特徴的な現象である。また、印加電圧を大きくすることで、スペクトル強度における最大値と最小値の差分が大きくなる傾向が確認された。これは、印加電圧によりマッハツェンダー干渉計における分岐比が等分岐条件に近づくためと考えられる。強度差分を消光比と定義し、印加電圧に対する依存性を示したものが図3(b)である。これより、2.0 V において最大となり、その際の消光比が 10.6 dB となることがわかった。

印加電圧 $V_s=2.0$ V において、デバイスの透過スペクトルを評価した。遅延線上の位相シフタに電圧 $V_p=2.9$ V を印加した際の上および

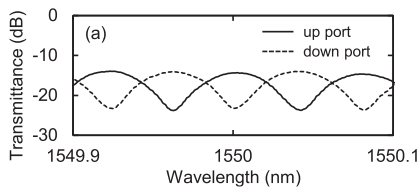


図4 光パケット識別器における透過スペクトル

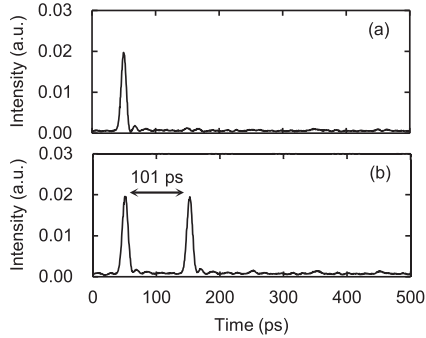


図5 光パケット識別器におけるインパルス応答

下部ポートのスペクトルを図4に示す。図より、各ポートの最大・最小波長が交互に現れることが分かり、正しく動作していると確認できた。

つづいて、インパルス応答の評価を行った。モードロックレーザを用いて半値全幅9.2 psの狭時間幅パルスを生じ、デバイスへ入力したうえで出力信号をオシロスコープで観察した。パルスの波長は1550 nmとし、シングルモード伝搬条件に合わせた。入力したパルス波形を図5(a)に、その際の出力波形を図5(b)にそれぞれ示す。図5(b)から、入射パルスが一度分岐し遅延が加えられた後で合波した様子がうかがえる。出力波形のパルス間隔は101 psであり、これは干渉計FSRに換算すると9.9 GHzであった。設計目標は10.0 GHzであったため、誤差1%程度と動作に問題がないレベルで設計できていることが分かった。これらの検討から、デバイス設計のために導出した群屈折率 n_g は正確な値であったと確認できた。

さらに、4-bitのQPSK信号に対して提案する光パケット識別動作の実証を試みた。測定系は主として、信号生成部、集積デバイス、および集積デバイスへの光結合系から構成される。まず、QPSK信号の生成を行った。2つのLN

変調器を用いて、波長可変光源からの出射光にQPSK変調を施しRZ-QPSK信号を生成した。このとき、信号波長を1550 nm、変調帯域を9.9 GHz、疑似ランダム信号系列を 2^9-1 に設定した。生成したRZ-QPSK信号に対して、LN変調器をゲート素子として用いることで、 2^9-1 信号系列から特定の信号系列を切り出す構成とした。なお、ゲートパルスは400 ps幅とし、任意の4 bit符号に加えて2シンボル分のゲートパルスを透過させた。

生成した4-bit QPSK信号およびゲートパルスを集積デバイスに入力した。このとき、遅延線上の位相シフタに電圧 V_p は2.9 Vおよび3.5 Vに設定した。これは、識別対象のパケットがそれぞれ00 00および11 00となる位相回転量に相当する。つづいて、デバイスからの出力信号を2-bit遅延干渉計に入力した。これにより、合波信号は2シンボル分遅れた位置にあるゲートパルスと干渉することとなる。干渉計出力はバランス型フォトディテクタへ入力し、その出力信号をオシロスコープにて観察した。

光パケット識別における動作波形を図6および図7に示す。それぞれの図は10種類の4-bit信号を入力した際の出力信号における動作波形を示している。両図において、上半分は候補パケットを00 00に想定した際の結果を示し、下半分は候補パケットを11 00に想定した際の結果を示している。また、いずれの図においても、各波形において中央に位置する時間タイミングが合波信号に相当している。

まず、候補パケットを00 00とした結果に着目すると、動作波形の光強度と対象符号とのハミング距離が一致していることが分かる。例えば、00 00信号が入力された場合には光強度は最大値を示している。また、00 01および00 10信号が入力された場合には、光強度が最大値よりも1つ小さい値を示している。なお、11 11信号が入力された場合には、光強度が最も小さくなっていることが確認できる。

同様の傾向は、候補パケットを11 00とした

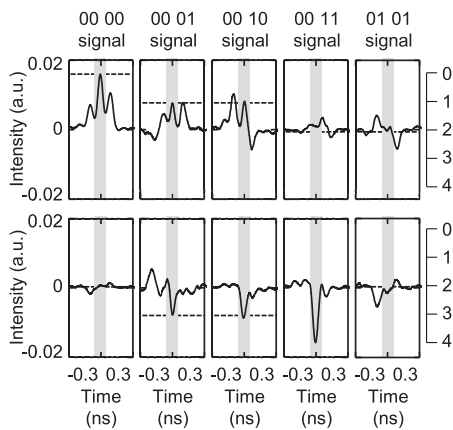


図6 光パケット識別における動作波形1

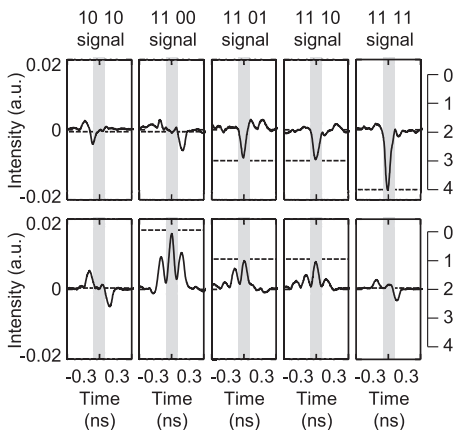


図7 光パケット識別における動作波形2

際においても確認できる。例えば、11 00 信号が入力された場合には光強度は最大値を示している。また、11 01 および 11 10 信号が入力された場合には、光強度が最大値よりも1つ小さい値を示している。さらに、00 11 信号が入力された場合には、光強度が最も小さくなっていることが確認できる。このように、候補パケットとの類似度を光強度として獲得できることが分かった。提案手法では、候補パケットに任意の4-bitを選択できることから、光パケット識別を実証できたといえる。

[今後の研究の方向, 課題]

当該デバイスを用いて光処理によるパケット

識別動作を実証することができた。一方で、提案手法は1つの候補パケットに対する尤度を算出するものであり、複数の候補に対して成り立つものではない。そこで、当該デバイスをアレイ状に配置することに取り組んでいく。これにより、複数のパケットに対する尤度を一度に算出することが可能となる。なお、アレイ構造を採用したことで、素子を共有化するなど、最適な構造に検討の余地が生まれる。そこで、今後は動作効率を最適化する構造の検討を行っていく。また、構造が決まった際には、細線導波路を用いて集積デバイスを作製していく。なお、当該デバイスを用いて改めてパケット識別動作に取り組んでいく。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 相川洋平, “Si 細線導波路を用いた QPSK 信号に対する比較演算デバイス”, 光通信システム研究会, 電子情報通信学会総合大会講演文集, 2019年2月.
- [2] Y. Aikawa, “Ultracompact Optical Comparator for 4-bit QPSK-modulated Signal Based on Silicon Photonic Waveguide,” *IEEE Photon. J.*, 11(3), 1-10, (2019).
- [3] Y. Aikawa, “Optical digital-to-analogue conversion for 2-bit BPSK-modulated signal based on delay line interferometer with balanced photodetector,” *Electron. Lett.*, 55(21), 1139-1141, (2019).
- [4] 相川洋平, “シリコン細線導波路を用いた光比較演算処理デバイス”, 光通信システム研究会, 2019年10月.
- [5] Y. Aikawa, “Integrated Optical Comparator for 2 successive QPSK-modulated Symbols Based on Silicon Photonics Waveguide,” *International Conference on Photonics Research*, (2019).
- [6] Y. Aikawa, “Integrated optical digital-to-analogue converter for a 2-bit BPSK-modulated signal based on a silicon photonics waveguide,” *Electron. Lett.*, 56(16), 830-832, (2020).