

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14557

研究課題名（和文）光信号処理による尤度推定を利用したメモリ不要なパケットスイッチ技術の確立

研究課題名（英文）A study on optical likelihood estimation for packet switching architecture in next generation

研究代表者

相川 洋平（Aikawa, Yohei）

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：80804616

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、メモリを必要としないパケットスイッチの実現を目指して、多値変調光信号に対するラベル識別の検討を行った。具体的には、QPSK信号からなる符号列を対象として、その符号系列に紐づいた光強度を生成する技術を提案するとともに、当該技術の集積デバイス化に取り組んだ。実際にシリコン細線導波路を用いてデバイスを試作し、QPSK信号からなる4-bitラベルに対する識別動作を実証した。また、変調方式の異なる光信号に対しても同様のデバイスでラベル識別が実現できることを明らかにした。これにより、光パケットスイッチにおける要素技術の確立に貢献することができたと考えている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光通信では古くから光と電子の役割を「伝送」と「処理」とで使い分けてきた。本研究は光処理にてラベル識別を実現させるものであり、これによって電子処理を介在させることなく光のままラベル識別を実現することが可能となる。すなわち、従来は「伝送」のみ担っていた光を「処理」の領域へ拡張するものだといえる。両者が融合することで光・電子間の信号変換が払しょくされる。本研究がパケットスイッチの要素技術となることで、通信網における電力が劇的に改善されるものと期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated the technology of optical label recognition for multi-level modulation signals with the aim of realizing a memory-free packet switch.

Specifically, we proposed a method to generate an optical signal which shows how far it is like a predetermined code string consisting of QPSK-modulated signals. We fabricated a prototype device of optical label recognition, which is provided by a silicon-based optical waveguide structure. Using this device, we successfully demonstrated the identification for 4-bit QPSK labels, and further demonstrated that the same device can identify labels for optical signals with different modulation schemes. We believe that we have contributed to the establishment of elemental technologies for the memory-free packet switch.

研究分野：工学

キーワード：光信号処理 光集積回路 シリコンフォトニクス

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

インターネットトラフィックの増加に伴い、光通信網における消費電力が問題視されている。とくに、パケットスイッチにおける光電変換が主な要因であると考えられているものの、メモリが不可欠であることから根本的な解決が困難である。そこで、ラベルの識別を光領域で実現する手法を提案した。本研究により通信網の電力が改善されるものと期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、メモリを必要としないパケットスイッチを目指して、その要素技術となるラベル識別技術を確認するものである。具体的には、多値変調信号からなるラベルを光のままに識別する技術に取り組んでいく。本研究の目的は、ラベル識別技術を光回路上に機能集積するとともに当該デバイスを用いてラベル識別動作を実証することである。

3. 研究の方法

A) 尤度推定技術を用いたラベル識別手法の考案および当該技術の集積デバイス化

はじめに、メモリを不要とするパケットスイッチを構想するとともに、その要素技術となるラベル識別手法を考案した。これは、多値変調信号からなる符号列対象として、その符号系列に紐づいた光強度を生成する技術である。本研究では当該技術を尤度推定技術と名付けるとともに、当該技術が2つの縦列な遅延干渉計を用いて実現できることを明らかにした。そこで、DPSK/DQPSK 復調に用いられる市販の遅延干渉計を組み合わせた系において、4-bit の QPSK 変調信号を対象としたラベル識別動作に取り組んだ。

また、尤度推定技術の集積デバイス化に取り組んだ。シリコン細線導波路を用いて遅延干渉計が2つ縦列接続されたデバイスを設計および製作した。遅延干渉計における FSR は一段目と二段目にてそれぞれ、10 GHz および 5 GHz とした。また、各干渉計は強度分岐可変な構造とした。つづいて、作製したデバイスを用いて、4-bit の QPSK 変調信号を対象としたラベル識別動作に取り組んだ。

B) 異なる変調方式への拡張

さらに、異なる変調方式を対象として提案技術が適応できるかどうかについて検討を行った。ビット長を犠牲とするものの、OOK 変調方式および BPSK 変調方式にも適応できることを明らかにした。さらに、2-bit の BPSK 変調信号を対象としてラベル識別動作の実証に取り組んだ。

4. 研究成果

A) 尤度推定技術を用いたラベル識別手法の考案および当該技術の集積デバイス化

2021 年度においては尤度推定技術の実証に取り組んだ。当該技術は2つの縦列された遅延干渉計を用いて実現される。図1に当該技術の模式図および動作原理を示す。本デバイスは4-bit の QPSK 信号に対して機能するものであり、入力された2つの QPSK シンボルから1つの光信号を生成する。このとき、生成された光信号の強度を、任意の4-bit 符号におけるハミング距離に一致させる動作条件の存在を明らかにした。すなわち、本デバイスは4-bit QPSK 信号に対して尤度を推定する機能をもつ。これを利用しラベル識別を光領域で実行させることで、メモリを不要とするパケットスイッチを構想した。

つづいて、提案手法を用いてラベル識別の実証に取り組んだ。遅延干渉計には DPSK/DQPSK 復調に用いられる市販の導波路型デバイスを利用した。一段目および二段目の遅延干渉計において FSR がそれぞれ 10 GHz および 5 GHz となるものを使用した。また、動作速度を 10 Gbaud とし、4-bit の QPSK 信号に対するラベル識別を実証した。なお、4-bit ラベルは遅延干渉計への位相回転を制御することで、任意の符号系列に適応できることを明らかにした。

さらに、当該機能の光集積デバイス化に取り組んだ。シリコンフォトニクス技術に基づいて、シリコン細線導波路からなる縦列な遅延干渉計を作製した。図2にデバイスの模式図および顕微鏡写真を示す。シリコン導波路は厚さ 0.21 μm × 幅 0.45 μm とし TE 偏波に対してシングルモード伝搬する条件とした。このとき、1550 nm 波長に対する群屈折率 n_g は 4.2 であった。そこで、干渉計における遅延線は一段目および二段目においてそれぞれ 7.14 mm および 14.28 mm とし、遅延量が 100 ps および 200 ps となるように設計した。なお、それぞれの干渉計の後段にはマッハツェンダ干渉計を設け、強度分岐比を任意に調整できる構造とした。さらに、導波路上部には Ti からなるヒーターを設け、熱光学効果を用いて位相を制御できる構成とした。

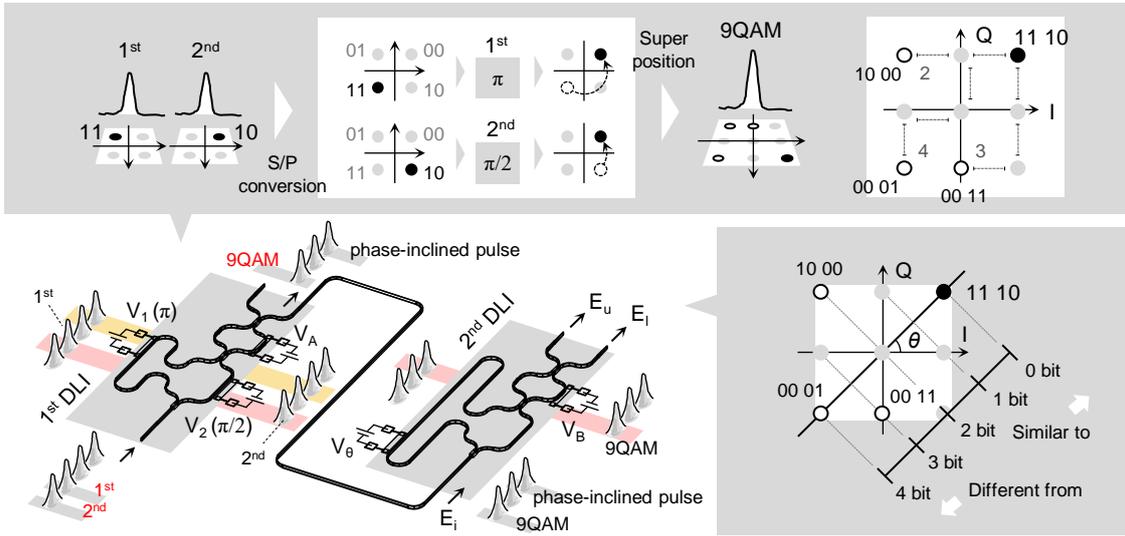


図 1 : 尤度推定技術の動作原理

作製した集積デバイスを用いてラベル識別動作の実証に取り組んだ。透過スペクトルおよびインパルス応答を評価し、それぞれの遅延干渉計におけるFSRが9.7 GHzおよび4.9 GHzであることを明らかにした。また、1550 nmの波長に対して10 Gbaudの4-bit QPSK信号を生成しデバイスに入力した。比較対象のラベルは、それぞれ位相条件を調整することで、0000, 0011, 1100, および1111に設定した。動作結果を図3に示す。ここで、縦の列は入力した信号系列に対応しており、横の行は設定したラベルに対応している。また、波形中央が識別対象となる光信号である。信号と符合が合致するとき光の強度が最も高くなっていることから、識別動作を実証することができたと分かる。さらに、両者のハミング距離が光強度に反映されていることから、原理通りに駆動していることが分かった。

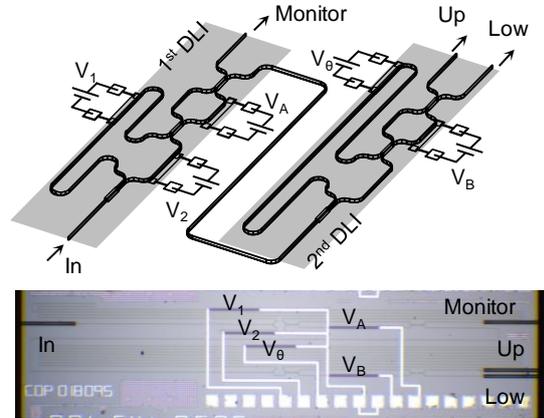


図 2 : 尤度推定デバイス

B) 異なる変調方式への拡張

2022年度においては異なる変調方式を対象として当該技術を用いたラベル識別に取り組んだ。はじめに、尤度推定デバイスがQPSK変調だけでなく、OOK変調, BPSK変調, 8PSK変調などにも適応できることを明らかにした。また、10 Gbaudの2-bit BPSK信号を対象として、尤度推定技術を用いてラベル識別が実現できることを市販の遅延干渉計を用いて実証した。さらに、光集積デバイスを作製するとともに当該デバイスを用いてラベル識別の動作実証に取り組んだ。デバイス構造は図2と同様であるものの、可変分岐構造を排除し省サイズ化を図った。1550 nm波長に対する10 Gbaudの2-bit BPSK信号を生成しデバイスに入力した。その結果、00, 01, 10, および11ラベルに対して、ラベルの違いを光強度に反映させることに成功した。

一連の取り組みを通じて、多値変調信号を対象としたラベル識別技術の確立に貢献することができたと考えている。今後はQAM変調への適応を目指して検討を進めていきたい。

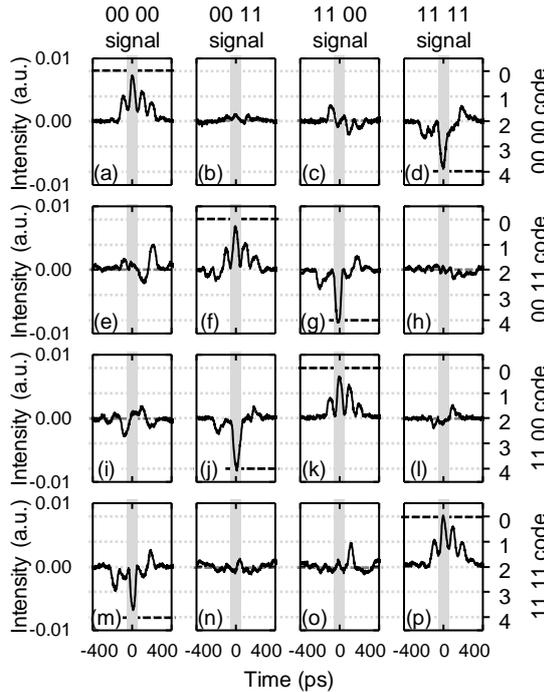


図 3 : ラベル識別動作の実証結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yohei Aikawa	4. 巻 16
2. 論文標題 Optical likelihood calculation for quadrature phase-shift keying signal based on silicon integrated waveguide	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IET Optoelectronics	6. 最初と最後の頁 188-194
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/ote2.12071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yohei Aikawa and Hiroyuki Uenohara	4. 巻 -
2. 論文標題 An optical digital-to-analog converter with a built-in intensity converter consisting of silicon waveguide	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IET Optoelectronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 相川洋平，植之原裕行
2. 発表標題 光信号処理による復号化回路の提案および基本動作の実証
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------