

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 9 月 11 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06403

研究課題名(和文) 多値振幅変調用小型多チャンネル光送信モジュールのチャンネル間クロストークに関する研究

研究課題名(英文) Study on an inter-channel crosstalk in a multi-channel optical transmitter module for multi-level pulse amplitude modulation.

研究代表者

高畑 清人 (Takahata, Kiyoto)

早稲田大学・理工学術院(情報生産システム研究科・センター)・准教授

研究者番号：40780797

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)：次世代の高速・大容量光通信システムに必要な小型多チャンネル多値振幅変調光送信モジュールにおけるチャンネル間クロストークについて研究を行った。電界吸収型変調器集積レーザを多チャンネル実装した光送信モジュールを対象として、高周波線路基板、はんだバンプ、及び電界吸収型変調器で構成された解析モデルを構築し、チャンネル間隔250 μm以下で信号の符号誤り率(BER)が上昇し始めることをシミュレーションにより確認した。また、クロストークペナルティの評価時間短縮方法を検討した。10回程度必要なBER測定のうちの半数を雑音強度測定に置き換えることでクロストークペナルティの評価時間半減を可能とする方法を考案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

次世代の高速光イーサネット、及び高速高密度光インタークネクションで必須となる多値振幅変調信号を用いた多チャンネル光送信モジュールについては多くの報告がなされているが、チャンネル間隔の設計が信号伝送特性に与える影響については報告例がなかった。本研究の結果は、将来の更なるチャンネル数増加、及び小型化に伴いチャンネル間隔狭小化が必要となった際にモジュール設計の指針となるものである。また、実際の製品製造の際には検査工程の簡略化・時間短縮は重要な課題であり、本研究で提案したクロスペナルティ評価方法は産業界における多チャンネル送信モジュール製造時の検査工程の簡略化に寄与するものである。

研究成果の概要(英文)：For next-generation high-speed and large-capacity optical communication systems, an inter-channel crosstalk in a compact multi-channel optical transmitter module has been investigated. An analysis model including a high-frequency transmission board, solder bumps and electro-absorption modulators was built on the simulator, and it was indicated that BER (Bit Error Rate) became larger when the channel pitch became shorter than 250 μm. In addition, the new method which can halve a measurement time of a crosstalk penalty by replacing some of BER measurements with power measurement of noise power was proposed.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：光送信モジュール 光デバイス クロストーク 多値振幅変調 高速光イーサネット

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

全世界の通信トラフィックは年率 22%で増加し続けると予測されており[1]、通信速度、及びデータ処理速度の高速化は重要課題である。通信速度向上の観点で、次世代規格である 400G イーサネット(400GbE)の標準化においては、最大 16 チャンネル構成の導入と、変調方式として高速化のために 1 つの信号で 2 ビット送ることが出来る PAM4 (4-level pulse amplitude modulation, 4 値振幅変調) の採用が決まっている [2]。しかし、高速化検討の過程で、振幅変調の多値度については検討がなされたが、従来の NRZ (Non Return to Zero) 信号と比較してアイ開口が狭いため雑音耐性の低下が懸念される多値振幅変調に対して、光トランシーバの小型化が進展してチャンネル間隔が狭小化した際のチャンネル間クロストークの影響については検討が報告されていない。

一方、膨大なデータを処理・格納するデータ・サーバーにおいてもデータ処理を行う LSI チップ間の通信速度向上が重要課題である。LSI 間の通信速度は 2020 年には 10Tbi/s に達すると予測され[3]、これに対応するために小型多チャンネル光電気インターフェイスモジュールの研究・開発も進められている[4]。しかし、これらの報告では信号は通常の NRZ 信号であり、今後検討が必要となる多値振幅変調の適用、及び更なる多チャンネル化に伴うチャンネル間隔狭小化の影響については報告例がない。

また、実際のモジュール開発においては、クロストークの影響をクロストーク雑音による受信信号の BER (Bit Error Rate, 符号誤り率) 劣化の度合い (クロストークペナルティ) を測定して評価することが一般的である。しかしながら、クロストークペナルティの測定には多くの試験装置と長い時間を要し、より簡易に短時間で評価する方法の確立が望まれている。

[1] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2015-2020.

[2] IEEE P802.3bs 400 Gb/s Ethernet Task Force (<http://www.ieee802.org/3/bs/>)

[3] K.Yamada, et al., "Integrated Silicon-based Optical Interconnect for Fast, Compact, Energy-efficient Electronic Circuit Systems," NTT Tech. Review., vol. 11, No. 2, 2013.

[4] K.Yashiki, et al., "5 mW/Gbps hybrid-integrated Si-photonics-based optical I/O cores and their 25-Gbps/ch error-free operation with over 300-m MMF," Optical Fiber Com. (OFC), Th1G.1, 2015.

2. 研究の目的

本研究は、次世代以降の高速光イーサネット、及び高速高密度光インターネクションに共通して必要となる小型多チャンネル多値振幅変調光電気インターフェイスに適用する光送信モジュールを対象として、検討が報告されていないチャンネル間クロストークの影響の解明に取り組むものである。具体的には、

- 1) チャンネル間隔とクロストークの相関の明確化
- 2) クロストーク抑制に適したモジュール構造の検討
- 3) クロストークペナルティの簡易な評価方法の提案

の 3 項目を目的として研究を進める。

3. 研究の方法

本研究では、高速変調信号を送信可能な電界吸収型変調器集積 DFB レーザ (EML: External Modulation Laser) を多チャンネル集積した小型光送信モジュール[5]を対象としてクロストークの解析を行った。EML は実際の 100GbE・400GbE 用光送信モジュールで広く使用される光半導体デバイスである。

研究の遂行にあたっては、3 次元電磁界シミュレータ、高周波回路シミュレータ、光伝送シミュレータを主なツールとして用い、実際のモジュールに近い解析モデルを構築して、チャンネル間隔とクロストークの相関の明確化、及び簡易なクロストークペナルティ評価方法の提案に取り組んだ。

[5] S. Kanazawa, et al., "Compact Flip-Chip Interconnection 112-Gbit/s EADFB Laser Array Module With High Eye-Mask Margin," IEEE J. Lightwave Technology, 32(1), pp. 115 - 121, 2014.

4. 研究成果

(1) チャンネル間隔とクロストークの相関の明確化

多チャンネル光送信モジュール内のチャンネル間クロストークの要因としては迷光と漏洩電磁波が、挙げられるが、適切な光学設計を行ってれば前者に起因する光クロストークは無視できる程度と仮定できるので、ここでは後者に起因する電気信号のチャンネル間クロストークを対象として解析を行うこととした。

図 1 に隣接チャンネル間電気信号クロストークを解析するための 2 チャンネル信号伝送モデルを示す。実際のモジュールではモジュール表面の入出力端子から入力された電気信号がモジュール内部に取り込まれ、内装基盤上の高周波伝送線路を伝搬して EML 内の EAM (Electro-

absorption Modulator, 電界吸収型光変調器)に到達して光信号へと変換される。図1 (a)はその接続の模式図であり、Port1, 3は内装基盤上の高周波信号入力端子を、Port2, 4はEAMの出力端子(光出力信号に対応)を表している。実際のモジュール構造に近づけるためにはEAMも含めて3次元モデルを構築することが望ましいが、3次元電磁界シミュレータ上にEAMのモデルを作成することは困難であったので、本解析モデルにおいては、図1 (b)に示すように、EAMを短尺の高周波基板で表して高周波伝送線路とのはんだバンプ接続部分を含めた3次元モデルとした。高周波伝送線路にはAlN基板上のコプレーナ導波路を用いている。EAMは高周波回路シミュレータ上に図1 (c)に示す等価回路モデルで作成し、電磁界シミュレーションで得た伝送線路部分の特性を回路シミュレータに取り込むことで、伝送線路部分とEAMを統合した解析モデルを回路シミュレータ上に構築した。

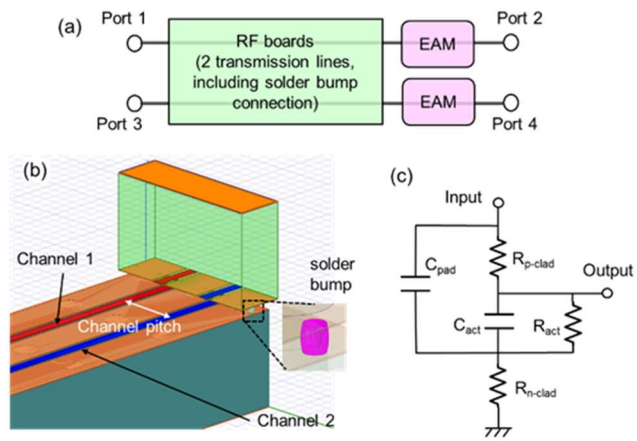


図1 2チャンネル解析モデル (a) 概要図 (b) 3次元電磁界解析モデル (c) EAMの等価回路図

本モデルを用いて、チャンネル間隔(2本のコプレーナ導波路の間隔)を $550\ \mu\text{m}$ から $150\ \mu\text{m}$ まで $100\ \mu\text{m}$ ステップで変化させながら $50\ \text{GHz}$ までの小信号応答特性をシミュレーションした結果を図2に示す。チャンネル間隔は主信号の伝送特性にはあまり影響しないが、クロストーク特性には明確な影響を与えることが確認できる。チャンネル間隔狭小化とともにクロストークが上昇し、チャンネル間隔が $350\ \mu\text{m}$ 以下になるとクロストークが高周波領域で $-40\ \text{dB}$ 以上となり、BERの劣化が懸念される。そこで、伝送シミュレータを用いて $50\ \text{Gbit/s}$ NRZ信号を両チャンネルに入力した際のBERがチャンネル間隔によってどのように変化するかを調べた。図3にシミュレーションで得られた結果を示す。これより、チャンネル間隔 $250\ \mu\text{m}$ 以上ではBERはほぼ一定であるが、 $250\ \mu\text{m}$ 以下になると狭小化に伴ってBERが劣化することがわかる。

以上の検討により、EMLを用いた多チャンネル光送信モジュールの設計において小型化のためにチャンネル間隔狭小化を図る際には、チャンネル間隔 $250\ \mu\text{m}$ が1つの目安となることが明らかとなった。

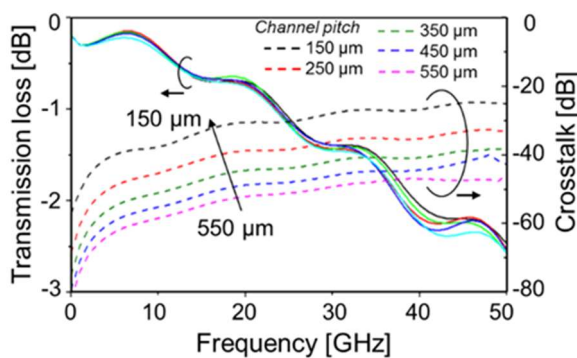


図2 周波数応答特性のチャンネル間隔依存性

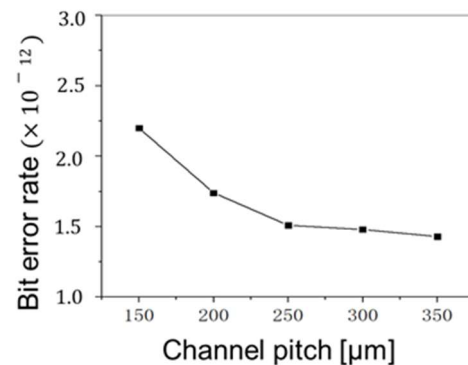


図3 チャンネル間隔によるBERの変化

(2) クロストーク抑制に適したモジュール構造の検討

クロストーク抑制に適したはんだバンプのサイズ、位置について図1 (b)に示した3次元解析モデルを用いて検討した。はんだ材料はSnとした。実際の製造を考慮してはんだバンプのサイズとしては直径 $20\sim 50\ \mu\text{m}$ 、高さ $20\sim 50\ \mu\text{m}$ の範囲で検討を行った。結果としては、この範囲では直径、高さともにクロストークに有意な影響はないことがわかった。

(3) クロストークペナルティの簡易な評価方法の提案

2チャンネル間のクロストークを表す簡易なモデルを図4に示す。ここではチャンネルbを伝搬する主信号からの漏洩信号がクロストーク雑音として隣接するチャンネルaを伝搬する主信号に影響を与える状態を表している。一般的なクロストークペナルティの評価方法(図5左列)は次の手順である。

- ① BERの測定(クロストーク無し, 1チャンネル動作): 受信信号強度を変化させて5, 6回
→ 図6の青点のデータを取得

- ② BER の測定 (クロストーク有り, 2チャンネル動作) : 受信信号強度を変化させて5, 6回
→ 図6の赤点のデータを取得
- ③ ①, ②のデータについて、線形近似で規定の BER (1×10^{-12}) を与える受信信号強度 (P_1, P_2')
を算出し、両者の差をクロストークペナルティとして求める
→ 図6中の” crosstalk penalty”

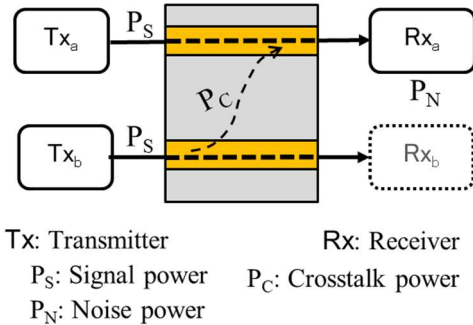


図4 2チャンネル伝送モデル

ここで①, ②では、評価する信号の速度にもよるが、各々数十分程度の測定時間を要する。本研究ではこの評価時間の短縮を可能とする新たな評価方法の検討を行った。

PAM4 信号では1つの信号(シンボル)が2ビットの情報を有し、信号強度レベルが4値であるため、2値信号であるNRZ信号の場合と同様にBERとSNR (Signal to Noise Ratio) の関係を明確化することが容易ではない。そこで、PAM4 信号の符号割当にグレイコードを適用してモンテカルロ法による数値解析シミュレーションにより、PAM4 信号においても同一のSNR条件では同一のBERが得られることを確認した。この条件下では、クロストークペナルティは次の式で表せることを導いた。

$$Crosstalk Pernalty = 10 \log \left(\frac{P_2'}{P_1} \right) = 10 \log \left(\frac{P_n(P_1 + P_c)}{P_1(P_n - P_c)} \right) [dB] \quad (1)$$

ここで、各記号は以下の信号、雑音強度に対応する。

- P_1 : 規定のBERを与える主信号の受信信号強度 (クロストーク無し)
- P_2 : 規定のBERを与える主信号の受信信号強度 (クロストーク有り)
- P_2' : 規定のBERを与える受信信号強度 (クロストーク有り) ($P_2' = P_2 + P_c'$)
- P_n : 受信器の熱雑音強度
- P_c : クロストーク雑音強度

式(1)は、クロストーク無しの状態でのBER測定により求められる P_1 に加えてクロストーク雑音と受信器の熱雑音の強度の測定値を得れば、それらからクロストークペナルティが算出可能であることを示している。すなわち、式(1)を用いれば、図5右列に提案方法として表された以下の手順でクロストークペナルティを求めることが可能となる。

- ① BER の測定 (クロストーク無し, 1チャンネル動作) : 受信信号強度を変化させて5, 6回
- ②' 雑音の測定 (クロストーク有り, 1チャンネル動作) : クロストーク雑音、熱雑音の測定
- ③' ①, ②' のデータを用いて、式(1)によりクロストークペナルティを求める

一般的に信号強度の測定には数分程度あれば十分であるので、この提案方法では従来方法と比較して約半分の時間でクロストークペナルティを評価することができる。



図5 クロストーク評価方法の比較

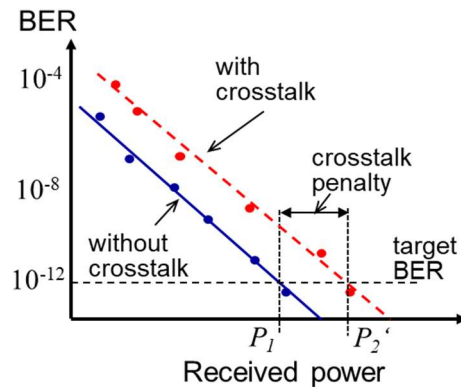


図6 クロストークペナルティの測定

(4) 提案した評価方法の検証

前項で提案した評価方法を実物の多チャンネル光送信モジュールを用いて測定で検証する手段を保有していなかったため、シミュレーションによる検証を行った。まず、図4に示した2チャンネルの信号伝送モデルを伝送シミュレータ上に構築した。前述の3次元電磁界シミュレーションで得られた2チャンネル高周波線路の伝送特性を伝送モデルに取り込むことで、周波数依存性のあるクロストークを伝送モデルに導入した。このモデルを用いて従来方法と提案方法で40 Gbit/s PAM4 信号を伝送した場合のBER を評価した結果を図7に示す。 1×10^{13} ビット以上の疑似ランダム信号を生成してBERを評価するには非常に長い計算処理時間を要するため計算機の処理時間の制約により、ここでは $BER = 1 \times 10^{-4}$ でクロストークペナルティを評価した。従来方法と提案方法により求めたクロストークペナルティは各々0.160 dB、0.136 dBであり、ほぼ同等の結果が得られた。この結果は、評価時間を約半減することが可能な提案方法がクロストークペナルティの評価においてほぼ正確性を低下させることがないことを示している。

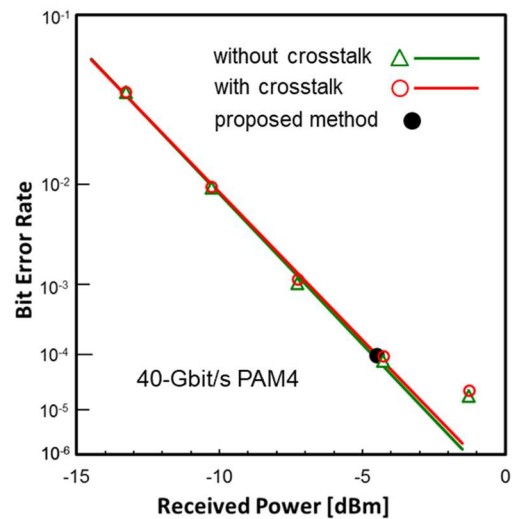


図7 シミュレーションによるBER評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 X. Gan, C. Guo, J. Chang, K. Katayama, T. Baba and K. Takahata
2. 発表標題 Analysis on crosstalk of a multi-channel optical transmitter
3. 学会等名 第26回電子情報通信会九州支部学生会講演
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Q. DU, L. DONG and K. TAKAHATA
2. 発表標題 Evaluation method of crosstalk penalty based on SNR analysis
3. 学会等名 第26回電子情報通信会九州支部学生会講演
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. DUAN, H. CHEN, Q. DU and K. TAKAHATA
2. 発表標題 New evaluation method of crosstalk penalty for PAM4 signals
3. 学会等名 Asia Communications and Photonics Conference (ACP2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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