

交番直交コヒーレント QAM 方式を用いた 100G 級光アクセス伝送システムの研究開発



小玉 崇宏 (Takahiro Kodama, Ph. D.)

香川大学 創造工学部 講師

(Lecturer Kagawa University, Faculty of Engineering)

電子情報通信学会 他

受賞：IEEE 関西支部学生研究奨励賞 (2012 年)、丹羽保次郎懸念論文賞 (2014 年)他

研究専門分野：光通信工学 光通信ネットワーク

あらまし

光通信における短距離・多分岐収容の役割を果たす光アクセスネットワークでは、既に実用されている IQ 変調信号を安価なハードウェアで受信できるように、IQ 変調信号生成および光受信器構成の簡素化に焦点が当てられている。我々はこれまでに、交番直交パイロットキャリア (AQPM) を用いた M -QAM 変調信号を用いて 1 台の光検出器で受信できる方式を提案している。今回の研究期間中に、交番直交パイロットキャリアを用いた M -QAM 変調信号を光アクセスシステムに適用することを想定し、(課題①) 長時間安定動作に向けた偏波制御技術と (課題②) 伝送距離の延伸化が可能な波長分散補償技術の 2 つに焦点を当てた研究に取り組んだ。課題①に対する研究成果として、20 Gbit/s、QPSK 信号に対して光受信器側に偏波ダイバーシチ受信を適用することで、受信時の偏波状態に依らず受信可能なことを示した。②に対する研究成果として、20 Gbit/s、QPSK 信号に対して前置波長分散補償を適用することで、200 km の光ファイバ伝送が可能であることを明らかにした。

1. 研究の目的

現在、無線通信分野において 5G の検討が進む中で、モバイルネットワークの通信トラフィックを 1 本の光ファイバで効率良く収容するため、光アクセスネットワークの延伸化と大容量化を進める必要がある。延伸化

と大容量化を同時に達成できるアプローチとして、海底長距離伝送で実用化されている直角位相振幅変調 (QAM) 信号を用いたコヒーレント変調・ホモダイン検波方式が注目されている。しかし、ホモダイン検波方式は信号成分の実数成分と虚数成分の分離においてローカル光源と 90 度光ハイブリッドから成る複雑なコヒーレント光受信器を利用するため、光受信器が高価・高電力となり光アクセスネットワークに適用する上で大きな障壁となっている。

本研究では、1 台の光検出器 (PD) のみを用いた直接検波方式で受信できる交番直交パイロットキャリアを用いた M -QAM 変調信号を対象に、実用化に向けた課題に挑戦する。 M -QAM 変調信号の伝送時に生じる波長分散を補償する前置・後置分散補償技術により無分散化し、100km、100Gbps 光アクセス伝送システムを視野に入れながら伝送損失のみ考慮したシステム設計を目指す。更に、従来コヒーレント光受信器を利用した場合と比較して、次世代低電力光アクセス NW の実現性を示すことが本研究の目的である。具体的には、長時間安定動作に向けた偏波制御技術と延伸化および簡易設計に向けた分散補償技術の 2 点の課題を設定し、シミュレーションによる検討を進める。

2. 研究の背景

現状の光アクセスシステムでは波長分散の影響を考慮し、十分なマージンをもつ形でシステム設計を行う必要があるため、所望の信号品質を確保する上で冗長な送信信号パワーが必要になるといった問題がある。また、コヒーレント変調技術は海底長距離伝送および陸上メトロ伝送において大容量伝送を実現する有効な手段として実用化された技術として認知されているが、光アクセス伝送への適用に向けた検討は国外・国内問わず現在研究されている状況である。100km 伝送を対象として、コヒーレント変調・ホモダイン検波方式を用いてデジタル信号処理の分散補償アルゴリズム改善による低消費電力化の研究が行われている [1]。

一方で、コヒーレント光受信器の簡素化に焦点を当てた技術は少ない。先行研究では、データ信号とパイロットキャリアを偏波多重することで、ローカル光源を不要とする構成を提案したが、90 度光ハイブリッド

交番直交コヒーレント QAM 方式を用いた 100G 級光アクセス伝送システムの研究開発

や偏光制御が必要となるため実用化に向けた課題は残されていた [2]。最近の報告では、送信器側で別波長光源を配置し、受信器側で Kramers-Kronig 法 [3] を用いて位相情報を復元することで、コヒーレント光受信器を不要とした構成が注目されており、光通信分野の主要国際会議における発表件数が増大の傾向にある。

我々は交番直交コヒーレント変調・直接検波方式の実験的検討を進めてきており、国際会議 OECC2014 においてデータ信号とパイロットキャリアを偏波多重した交番直交パイロットキャリア方式を提案し、ローカル光源と 90 度光ハイブリッドを不要とする簡素な受信器構成で位相変調信号を受信できることを実験により実証した。また、主信号と交番直交パイロットキャリアに対して光送信器で波形整形を行うことで分散耐性が向上することを数値シミュレーションと実験で原理検証を行い、その結果を 2015 年の電子情報通信学会ソサイエティ大会で報告している。ただし、光受信器でデータ信号とパイロットキャリアを合成する際に、受信時の偏波状態に応じて信号品質が著しく劣化する問題と延伸化の課題が残されていた。

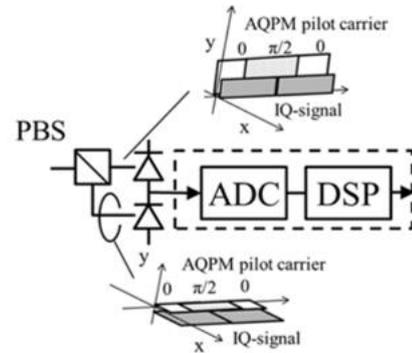


図 2 理想的でない SOP 角度による IQ 信号

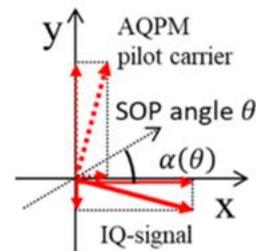


図 3 AQPM パイロットキャリアの不均等な分布

3. 研究の方法

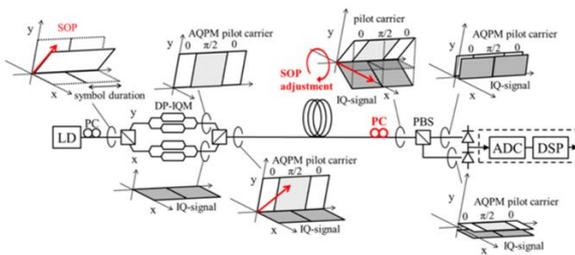


図 1 AQPM パイロットキャリアによる IQ 信号の偏波多重伝送とその自己ホモダイン検出

まず、長時間安定動作に向けた偏波制御技術に関して述べる。図 1 に、受信時における偏波依存性を解決する AQPM-偏波多重自己ホモダイン伝送システムの概念を示す。受信器構成は非常に単純であるが、正しい信号検出には、IQ 信号と AQPM パイロットキャリアの両方を X 偏波と Y 偏波の両方に均等に分配するための適切な SOP 調整が必要となる。

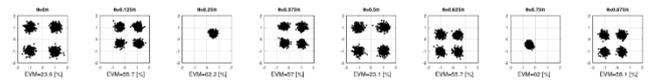


図 4 $0 \leq \theta \leq 2\pi$ における SOP 角度のコンスタレーションダイアグラム

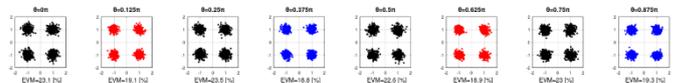


図 5 $0 \leq \theta \leq 2\pi$ における SOP 角度のコンスタレーションダイアグラム

図 2 は、不完全な SOP 調整が問題となる状況を示している。SOP 角度 θ がゼロでない場合、IQ 信号と AQPM パイロットキャリアの両方が X 偏波と Y 偏波の両方に不均等に分配され、図 3 に示すように受信信号の深刻な劣化を引き起こす。図 4 に、0 から 2π までの SOP

交番直交コヒーレント QAM 方式を用いた 100G 級光アクセス伝送システムの研究開発

角度のコンスタレーションマップを $\pi/8$ のステップで示している。計算されたエラーベクトルの大きさ (EVM) は、各コンスタレーションマップの下に表示している。図 5 からわかるように、受信したすべてのコンスタレーションマップはどの SOP 角度 θ に対しても良好な状態であり、EVM の変動は 5% 以内に抑制された。提案された方式の性能は、受信信号の信号対雑音比 (SNR) に依存する。図 6 に、EVM 変動と受信 SNR の関係を示す。提案された SOP 独立型の光受信器は、受信 SNR が 12 dB を超える場合、5% 未満の EVM 変動で動作する。この研究成果は関連文献 [A] で発表済みである。

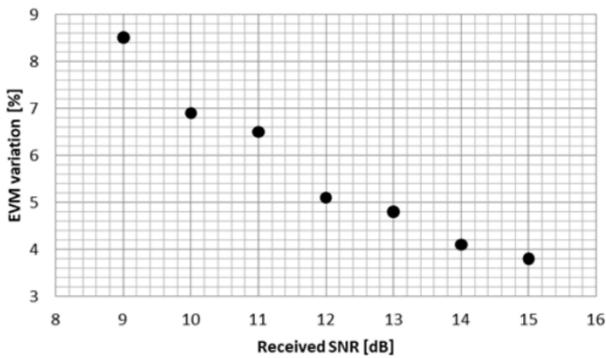


図 6 受信 SNR 対 EVM の関係

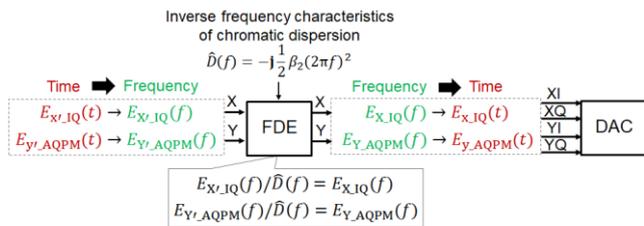


図 7 Pre-FDE 方式の構成

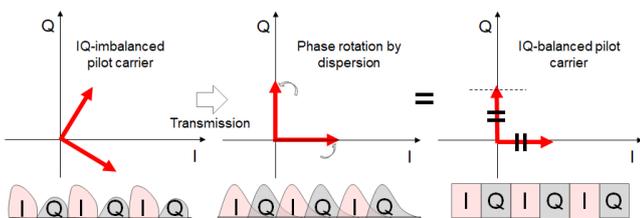


図 8 Pre-FDE を使用した AQPM パイロットキャリアのフェーズと対応する波形

次に、簡易設計に向けた分散補償技術に関して述べる。光受信器時点で IQ 軸の不均衡を完全に補償するために、AQPM パイロットキャリアと M-QAM 信号の両方に前置分散補償を導入する。図 7 に示すように、光送信器で前置周波数領域等化 (Pre-FDE) を使用する。図 8 に、Pre-FDE を使用した AQPM パイロットキャリアの位相回転の概念図を示す。Pre-FDE 後に、伝送距離に応じて位相回転量を加算することにより、IQ 不平衡 AQPM パイロットキャリアが生成される。光受信器側では、IQ バランスのとれたパイロットキャリアが位相回転によって回復される。したがって、M-QAM 信号の光受信器側の DSP は、IQ コンポーネント間の直交性を持つパイロットキャリアを使用できる。

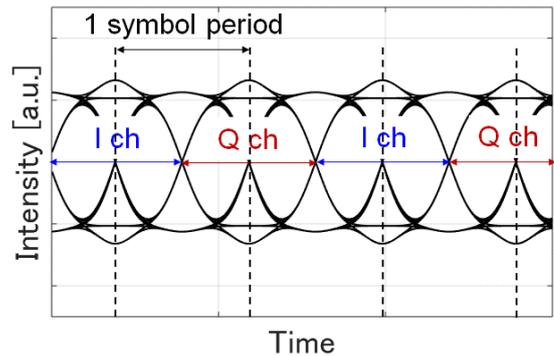


図 9 200km の送信後における受信 QPSK 信号のアイパターン波形

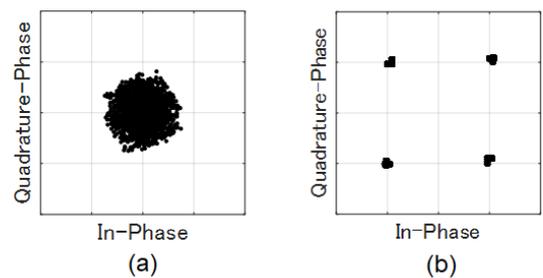


図 10 QPSK 信号のコンスタレーションマップ (a) 送信前、(b) 200km 送信後

図 9 に、200 km-SMF 伝送後における受信時点の QPSK 信号の 2 レベル値が存在するアイパターン波形を示す。これは、それぞれ I 成分と Q 成分の明確なアイ開口を示す。したがって、受信信号は正確なバイナ

交番直交コヒーレント QAM 方式を用いた 100G 級光アクセス伝送システムの研究開発

リ信号に復元できる。図 10 に、200km の送信前後の QPSK 信号の IQ コンスタレーションマップを示す。4 点が明確に分離できている。IQ コンスタレーションマップのエラーベクトルの大きさは 5.9% と非常に小さいことが確認できる。図 11 に、RF ドライバーの許容誤差を評価するため、前置分散補償した QPSK 信号の I コンポーネントのピーク対平均電力比 (PAPR) を示す。PAPR は、伝送距離を変更しながら測定した。伝送距離が 170km を超えると、PAPR の値は 2.6 に収束していることが確認できる。この研究成果は関連文献 [B] で発表済みである。

4. 将来展望

本研究は、ローカル光源、90 度光ハイブリッド、バランス型 PD から成る複雑なコヒーレント光受信器は不要であり、光受信器において偏波制御を用いて主信号と交番直交パイロットキャリアを同時に PD で受信する簡素な直接検波方式でコヒーレント M-QAM 信号を復調できる点に新規性がある。受信器側の偏波制御によって M-QAM 変調方式が長時間安定動作する点で斬新かつ画期的な手法であり、加入者側回線終端装置 (ONU) と局側回線終端装置 (OLT) から成る受動型光ネットワーク (PON) ヘコヒーレント変調方式を安価な形で導入し、将来的に長距離・大容量光アクセスシステムを実現する上で革新的な技術となることを確信している。

更に、コストと消費電力の観点で非対称構成が要求される光アクセスシステムに対して交番直交サブキャリア方式を適用するため、ハードウェアだけでなくソフトウェアを担うデジタル信号処理の非対称化についても検討する。信号処理の中でも FIR 回路規模と消費電力を占める分散補償を上り回線と下り回線のいずれも基地局で行うことで、コヒーレント変調・直接検波方式を適用した PON システムの研究を活性化し、実用化に結びつける研究に発展させる。

おわりに

以上のように今回の研究を通して、交番直交パイロットキャリアを用いた M-QAM 変調信号の光アクセスシステムへの適用に向けた 2 つの課題に取り組み、そ

の課題を解決できるアプローチによって有効性をシミュレーションにより示した。まず、光受信器における偏波間ダイバーシチ受信によって、無偏波依存な AQPM-PM 自己ホモダイン伝送システムが実現できることを明らかにした。次に、前置波長分散補償を適用することで、対象とする伝送距離の地点での波長分散の影響をなくすことができることを明らかにした。但し、波長分散補償量が増大するにつれて PAPR が増大するため、送信 SNR は低下する点に注意する必要がある。

参考文献

- [1] D. Lavery et al., IEEE J. Lightw. Technol., vol. 31, no. 4, pp. 609-620, Feb. 2013.
- [2] T. Miyazaki et al., IEEE Photonic. Technol. Lett., vol. 18, no. 2, pp. 388-390, Jan. 2006.
- [3] A. Mecozzi et al., Optica, vol. 3, no.11, pp. 1220-1227, Nov. 2016.

関連文献

- [A] T. Kodama et al., "Dispersion-induced IQ imbalance compensation using an electrical-domain pre-FDE in QPSK self-homodyne transmission with AQPM pilot-carrier," *Proc. Photonics in Switching and Computing (PSC)*, Th3C.2, Limassol, Cyprus, Sept. 2018.
- [B] M. Hanawa et al., "SOP independent self-homodyne detection of polarization multiplexed QPSK signal with AQPM pilot carrier," *Proc. Opto Electronics and Communications Conference/ Photonics in Switching and computing (OECC/PSC)*, TuP4-F4, Fukuoka, Japan, July 2019.

この研究は、平成 29 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 30 ~ 令和元年度に実施されたものです。