

光符号分割多重信号の高速フーリエ変換による多チャンネル一括復号・多重分離技術の開発

Multi-channel simultaneous de-multiplexing of optical code division multiplexed signal by fast Fourier transform



埜 雅典 (Masanori HANAWA, Ph. D.)

山梨大学 工学部 電気電子工学科 教授

(Professor, Faculty of Engineering, Electronics and Electrical Engineering, University of Yamanashi)

電子情報通信学会 IEEE Optical Society of America 日本教育工学会
受賞：APCC2009 Best Paper Award (APC2009 Award Committee)
(2009) 平成 10 年度電子情報通信学会学術奨励賞 (1999)

研究専門分野：通信・ネットワーク工学 (光信号処理、光ファイバ通信システム、光デバイス) 計測工学 (信号処理) 教育工学 (高等教育)

あらまし 本研究では、光符号分割多重^{*1} (以後 OCDM と略記) 伝送システムにおいて、フーリエ符号を用いて光学的に符号化した OCDM 信号の高速デジタル信号処理によるコヒーレント受信^{*2} に世界で初めて取り組んだ。これにより、加入者側装置では受動素子を用いた光学的符号化・多重化手法により、局側装置では単一受信機での一括受信処理の導入により、設計自由度の向上・高速化・低エネルギー消費・低コスト化を同時に実現した次世代光アクセスネットワーク技術の実現を目指した。

具体的には、OCDM システムに QPSK (直交位相シフトキーイング) や PAM4 (4 値振幅変調) などの多値変調技術の世界で初めて導入して伝送速度の高速化を図るとともに、光学的に符号化された OCDM 信号のデジタル信号処理による一括復号・多重分離技術の実証実験にも世界で初めて挑戦した。その上で、短光パルス源の簡素化に取り組み、簡素な利得スイッチ短光パルス源による多値変調信号の OCDM の可能性について検証した。

1. はじめに

光符号分割多重 (OCDM) は、将来のフォトニックネットワークの実装手段の 1 つとして認知されており、例えば、情報通信研究機構と大阪大学がイタリア・ローマ大学の Cincotti 教授らのグループなどと共同して、アレー光導波路型 (AWG) の符号器・復号器を用いる方式の研究を行なっている[1]他、英国・ヘリオットワット大学の Wang 教授[2]、中国・精華大学[3]など、国内外で広く研究が行われている。著者らは、2008 年にオーストラリアのシドニーで開催された Optoelectronics and Communications Conference (OECC) において、OCDM 用の新しい直交符号^{*3} として一般化アダマール行列の一種であるフーリエ行列の各行を符号語として利用するフーリエ符号を提案[4]し、以後の検討[5]-[7]を通じ、他のグループが用いてきた $0, \pi$ の 2 つの位相のみから表現される 2 相符号に比べて、多重干渉を劇的に低減できることを示した。

フーリエ行列は、離散逆フーリエ変換 (IDFT) に用いられる回転子行列と同一であるため、これと送信信号を乗算して得られる符号化信号は送信信号を逆フーリエ変換したものと考える。よって、それらを多重化した OCDM 信号をデジタル信号に変換し、高速フーリエ変換 (FFT) を実行することによって復号化と多重分離を一括して実行できることを、これまでのフーリエ符号化 OCDM システムの研究を通じて見出した。符号化-復号化のプロセスが IDFT-DFT に対応するという点では、フーリエ符号 OCDM は無線通信システムで広く用いられている直交周波数多重 (OFDM) 方式と本質的に同義であるが、この符号化処理を光学的に実施することによって、デジタルシグナルプロセッサ (DSP) やデジタル-アナログ変換 (D/A 変換) の速度制限を受けずにサブキャリアあたりのシンボルレート向上が可能となること、受動光素子による符号化は高速 DSP に比べて消費電力の低減が可能となること、などのメリットがある。

従来の OCDM 方式の検討では、一次変調に二値変調のみが用いられ、復号も光学的に行う検討のみであったことから、その実力が十分に示されてきていない。一次変調への多値変調方式の導入やデジタルコヒーレント光受信技術が適用された例は、著者らが知る限

光符号分割多重信号の高速フーリエ変換による多チャネル一括復号・多重分離技術の開発

Multi-channel simultaneous de-multiplexing of optical code division multiplexed signal by fast Fourier transform

り一つもない。本研究では、光学的に符号化された OCDM 信号の復号・多重分離を高速フーリエ変換 (FFT) によってデジタル的に全チャネル一括して行う方式の実現可能性を示すことを第一の目的とし、さらに、符号化に用いるファイバ回折格子 (FBG) 型符号器・復号器の作成精度向上、および簡素な利得スイッチ短光パルス源の利用可能性について数値的・実験的に検討を行った。

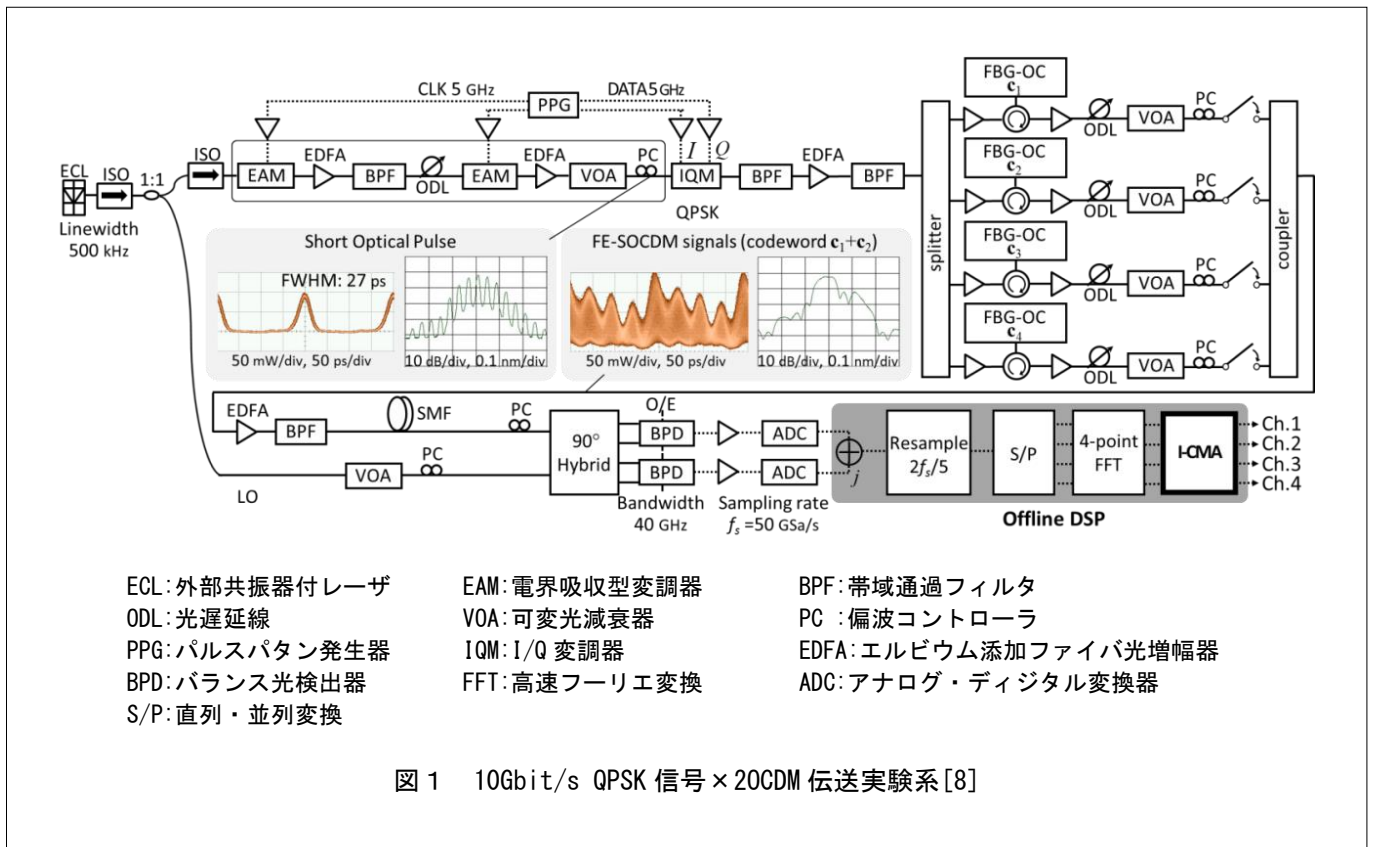
ザダイオード出力によって位相ダイバーシティ受信した後に、A/D 変換し、PC 上でのオフライン DSP によって一括復号した。送受信器を直接接続した B2B 接続では、復号信号の品質評価尺度である EVM (エラーベクトルマグニチュード) が 20%以下を示し、QPSK 信号の復調が確認されている [7]。30km 以上の長さの単一モード光ファイバ (SMF) を伝送させた場合には、符号語の組み合わせによっては大きく劣化する場合があるものの、DSP (ここでは M-CMA の繰り返し適用) によって信号劣化の補償が可能である。

2. フーリエ符号化同期符号分割多重システムの多値化とデジタル一括復号

図 1 に、10Gbit/s の QPSK 信号を多重するフーリエ符号化同期 OCDM システムの実験系を示す [7]。この実験系では、外部共振器型の狭線幅レーザダイオード出力を電界吸収型変調器 (EAM) の二段縦列接続構成でカービングした繰り返し周波数 5 GHz、パルス半値全幅約 27 ps の短光パルス列を、IQ 変調器で QPSK 変調した後に FBG 型符号器でフーリエ符号化している。受信側では、光ハイブリッドと送信側狭線幅レー

3. 利得スイッチによる準フーリエ変換限界短光パルス源の生成と 4 値振幅変調信号の生成

上記の実験によって、4 値の位相変調信号の OCDM 信号の DSP による復号が可能であることが示された一方、狭線幅レーザダイオードを EAM でカービングした短光パルス列を光源としていることから、光アクセスネットワークへの適用という最終目的には必ずしもそぐわない構成となっている。



光符号分割多重信号の高速フーリエ変換による多チャネル一括復号・多重分離技術の開発

Multi-channel simultaneous de-multiplexing of optical code division multiplexed signal by fast Fourier transform

著者らは、かねてから、より簡易に短光パルス列を生成可能な利得スイッチ短光パルス源の OCDM への適用可能性について検討を重ねてきた。利得スイッチによって生成される短光パルスは、大きな発振時刻のゆらぎ（時間ジッタ）を有する上、パルス生成条件次第では大きな周波数チャープを有することも知られており、光通信、特に位相変調方式への応用は困難と考えられる。時間ジッタは、文献[9]で提案されたセルフシーディングで大幅に低減できることから、周波数チャープを急峻な特性を持つ光帯域通過フィルタ（OBPF）で低減することを試みた。

まず、キャリアレート方程式*4の数値解析によって周波数チャープの定量的な評価を行った上で、図2に示す実験系によって利得スイッチ短光パルスの周波数チャープを低減し、どの程度フーリエ変換限界に近いパルスが生成可能なのかを検証した。セルフシーディングで時間ジッタを低減した利得スイッチ短光パルス

のスペクトルを OBPF でスライスした結果、時間ジッタは低いままでフーリエ変換限界に近い準フーリエ変換限界パルス（QFTL パルス）の生成が可能であることが確認された（図3）。当初は、これを用いて差動 QPSK（DQPSK）変調を行う方向で検討を進めていたが、残留チャープによって復調が不可能であったため、QPSK と同じ伝送速度が得られる 4 値振幅変調（PAM4）方式に切り替えて検討を進めた。

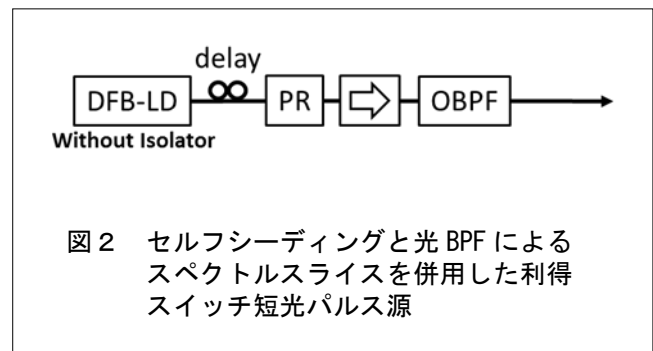


図2 セルフシーディングと光 BPF によるスペクトルスライスを併用した利得スイッチ短光パルス源

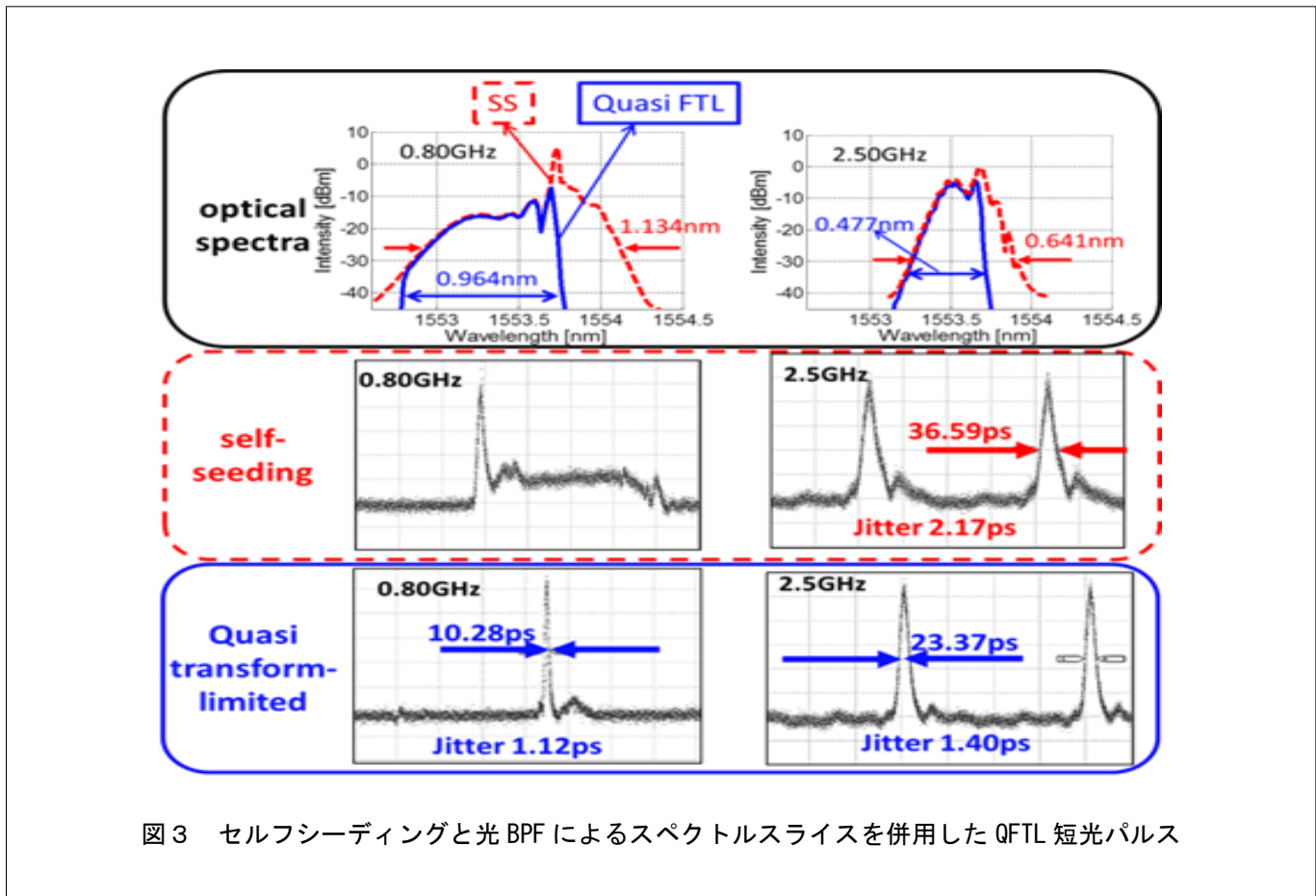


図3 セルフシーディングと光 BPF によるスペクトルスライスを併用した QFTL 短光パルス

光符号分割多重信号の高速フーリエ変換による多チャネル一括復号・多重分離技術の開発

Multi-channel simultaneous de-multiplexing of optical code division multiplexed signal by fast Fourier transform

IQ 変調器による PAM4 信号生成原理を図 4 に示す。図 5 に示すように、QFTL パルスを用いることによって、利得スイッチ短光パルス源から、きれいなアイ開口を有する PAM4 信号が生成された。この信号は、30km の SMF 伝送後も十分なアイ開口を有し(図 6)、エラーフリー伝送が可能であった。

差に起因する消光比劣化が原因と考えられる。

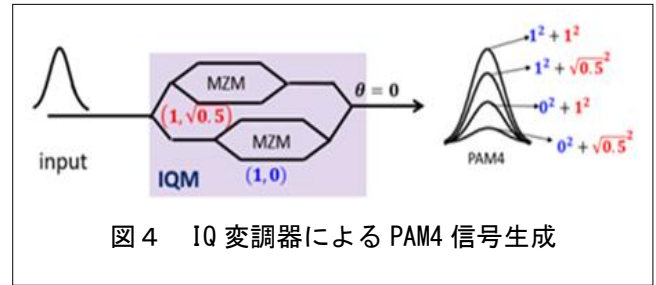


図 4 IQ 変調器による PAM4 信号生成

4. 4 値振幅変調信号の光学的フーリエ符号化光符号分割多重化復号化実験

最後に、前述の QFTL-PAM4 信号をベースにして、4 チャネル OCDM 実験を行った。実験系を図 7 に、B2B 時の誤り率特性を図 8 に示す。誤り率特性は、チャネルごとに大きな差があるが、最悪の符号語 C3 においても、誤り訂正符号化によってエラーフリーが実現可能な 10^{-3} 以下になっていることが確認できる。このチャネル間の差異は、FBG 型符号器の低反射率に起因する光 SNR 劣化と、同じく FBG 型符号器の位相誤

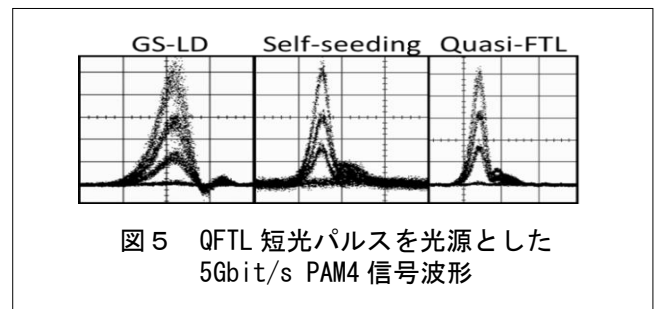


図 5 QFTL 短光パルスを光源とした 5Gbit/s PAM4 信号波形

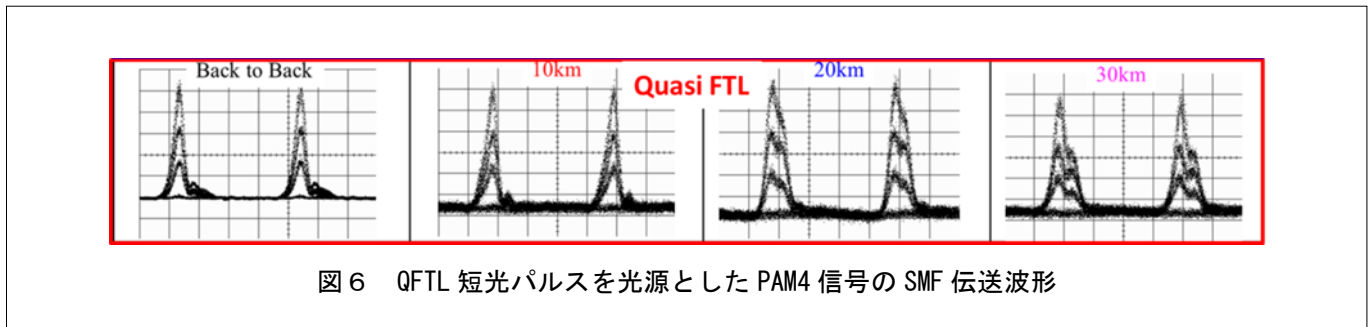


図 6 QFTL 短光パルスを光源とした PAM4 信号の SMF 伝送波形

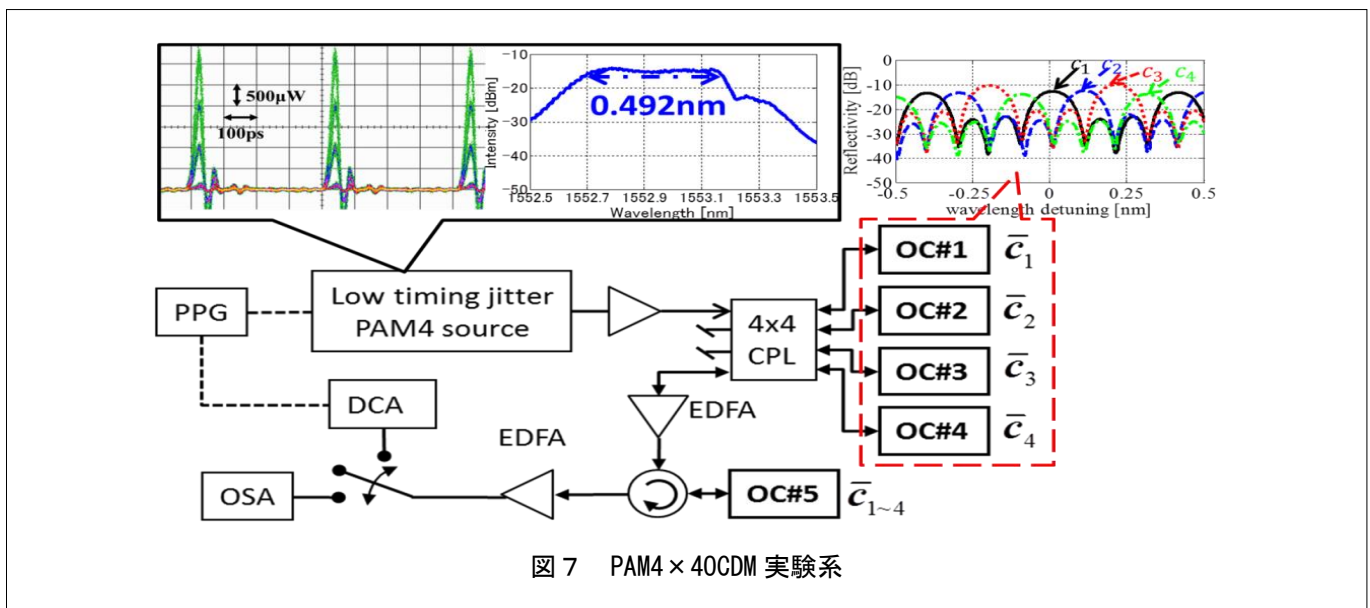


図 7 PAM4 x 40CDM 実験系

光符号分割多重信号の高速フーリエ変換による多チャネル一括復号・多重分離技術の開発

Multi-channel simultaneous de-multiplexing of optical code division multiplexed signal by fast Fourier transform

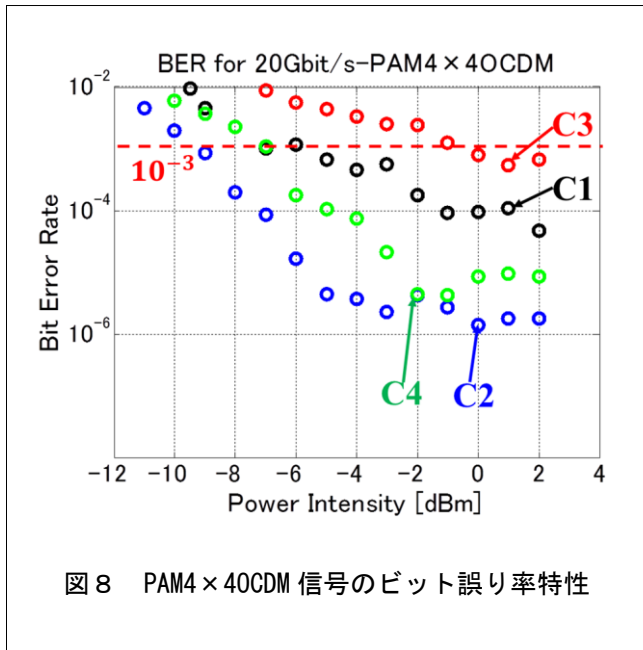


図 8 PAM4 x 4OCDM 信号のビット誤り率特性

5. おわりに

多値変調信号のフーリエ符号化同期 OADM と、そのデジタル一括復号、利得スイッチ技術を用いた光源の簡素化について研究を行った。光学的に符号化・多重化した QPSK-OADM 信号のデジタル一括復号の実現可能性は実験的に実証出来たと考えている。デジタル一括復号は事後の信号処理で信号劣化補償が可能などの利点を有するものの、狭線幅レーザが必要なことがアクセスネットワークへの適用ではネックとなる。そこで、光源の簡素化を優先して 5G bit/s PAM4 信号の光学的符号化・復号化実験を行い、ビット誤り率 10^{-3} 以下を実現できたことを示した。実験結果のチャネル間の差異は、実験装置の精度に起因するが、研究室内でエキシマレーザを用いて内製した FBG 型符号器では、これ以上の改善は見込めないことから、今後の検討は内製した FBG 型符号器ではなく、外部委託で作成したシリコン光導波路型符号器をベースにすべく、現在検討を進めている。

冒頭にも述べたように、フーリエ符号化 OADM は IDFT を用いた OFDM と本質的に同義であることから、本来は、すべての多重チャネルの信号が同期して符号化される必要がある。本研究では、研究室内で内製した FBG 型符号器・復号器を用いた関係上、サブミリメートルオーダーの経路長調整を必要とする完全

同期を実現することか不可能であったが、シリコン光導波路型符号器では、これも問題なく実現可能となる。シリコン光導波路技術は、OADM に限らず、様々な光信号処理に適用可能であることから、近年急速に実用化が進められている。先駆者との協働が研究の加速に必須である。

用語解説

*1 光符号分割多重 (OADM)

信号を直交符号で符号化後に送信し、受信側では同一の直交符号で復号化して元の信号を取り出すことによって、複数の信号を一つの通信路で多重することを可能とする方式

*2 コヒーレント受信

光の強度だけでなく、位相情報も復元する受信方式

*3 直交符号

互いの内積が 0 となる数列 (符号語) の集合

*4 キャリアレート方程式

レーザ媒質内におけるキャリア密度と光子密度の関係を記述する連立微分方程式

参考文献

- [1] N. Kataoka et al., in Tech. Digest of OECC2011, 8A2_5, July 2011.
- [2] Z. Gao et al., in Tech. Digest of OECC2009, WN1, July 2009.
- [3] L. Yang et al., in Tech. Digest of OECC2010, 9A3-5, July 2010.
- [4] M. Hanawa, in Tech. Digest of OECC/ACOFT2008, 1P-1, July 2008.
- [5] M. Hanawa et al., in Tech. Digest of OECC/ACOFT2008, WeA-2, July 2008.
- [6] M. Hanawa, in Tech. Digest of OECC2009, WN4, July 2009.
- [7] M. Hanawa et al., in Tech. Digest of OECC2010, 7B2-4, July 2010.
- [8] 岡村康弘他, 電子情報通信学会信学技報, OCS2014-29, 2014年7月.
- [9] K. Nonaka et al., Journal of Japanese Applied Physics, 47, 8S1, pp.6754-6756, August 2008.

この研究は、平成 24 年度 S C A T 研究助成の対象として採用され、平成 25 ~ 26 年度に実施されたものです。