

デジタルコヒーレント光通信技術の研究開発 (081503001)

Research on Digital Coherent Optical Communication Systems

研究代表者

菊池和朗 東京大学大学院工学系研究科
Kazuro Kikuchi Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

研究分担者

五十嵐浩司[†] 加藤一弘^{††}
Koji Igarashi[†] Kazuhiro Katoh^{††}
東京大学大学院工学系研究科[†] 東京大学大学院情報理工学系研究科^{††}
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo[†]
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo^{††}

研究期間 平成 20 年度～平成 22 年度

概要

クロック抽出、偏波多重分離、キャリア位相推定を同時に行うデジタル信号処理回路を提案し、これを用いて 10Gsymbol/s 16QAM デジタルコヒーレント光受信器を開発した。この受信器は、レーザスペクトル線幅 1MHz、周波数オフセット 100MHz まで安定に動作する。また、この受信器における信号処理の基本アルゴリズムは、並列化により FPGA に実装できることを明らかにした。次にこの受信器を用いて、16QAM 信号の偏波多重 WDM 伝送特性を解明した。伝送特性は、波長間の相互位相変調により劣化するが、スペクトル効率 2bit/s/Hz の時 1,000km の伝送が可能であることが実験により示された。

Abstract

We demonstrate the digital coherent optical receiver for demodulating 10Gsymbol/s 16 QAM signals. Such a receiver includes newly developed digital signal-processing circuits, which simultaneously realize clock recovery, polarization demultiplexing, and carrier-phase estimation. Even when the spectral width and the frequency offset of lasers are as large as 1 MHz and 100 MHz, respectively, our receiver can work in a stable manner. By using this receiver, we demonstrate transmission of wavelength-division multiplexed 16QAM signals. When the spectral efficiency is 2 bit/s/Hz, the transmission distance reaches 1,000 km.

1. まえがき

本研究課題は、申請者が先鞭をつけ、世界的に急速に研究が進展しつつある、デジタルコヒーレント光受信器の一層の性能向上をはかることを目的としている。

まず、光電界複素振幅の持つ全ての情報、すなわち振幅、位相、偏波状態を抽出する光通信用デジタルコヒーレント光受信器を開発した。次に、16 相直交振幅変調 (16QAM) 変調技術を導入し、受信端で伝送された多値信号を等化、復号するためのデジタル信号処理アルゴリズムを確立した。さらに、電子回路の速度限界を打破するために、時間多重分離機能を持つデジタルコヒーレント光受信器を開発した。

これらの成果に基づき、超高密度波長多重、多値変復調、偏波多重、信号等化の機能を持つデジタルコヒーレント受信器を長距離光伝送システムに導入し、シンボルレート 10Gsymbol/s において周波数利用効率 2bit/s/Hz、伝送距離 1,000km を達成した。

2. 研究内容及び成果

2.1 デジタルコヒーレント光受信器の設計と試作

デジタルコヒーレント光受信器では、偏波分離、信号等化、クロック抽出、キャリア位相推定などの機能をデジタル信号処理によって実現する。本研究では、これらすべての処理を同時に行うことができる、判定指向型 LMS アルゴリズムを用いた新しい構成の FIR フィルタを提案する。その動作を詳細に解析したのち、この FIR フィルタを導入した 10G シンボル/秒で動作する 16QAM 用の受信器を

設計・試作・評価を行う。

図 1 に提案するデジタル信号処理回路の構成を示す。破線で囲んだ $\mathbf{p}$ はバタフライ構成の FIR フィルタであり、2 入力、2 出力を結合する 4 つの行列要素からなる。これらは、信号の等化やクロック抽出を行うために長い遅延タップ段数を要し、タップ係数は判定指向型 LMS アルゴリズムにより、シンボルレートで更新される。一方、遅延タップ段数が長い場合、レーザの位相雑音のような速い揺らぎに対しては係数タップの更新が追いつかず、動作が不安定になる。この問題を解決するために、図 1 では 1 タップのフィルタを別途用意し、この部分でキャリア位相推定を行う。次に推定された位相を用いて、LMS アルゴリズムにおける誤差信号から、速い変動成分を取り除けば、長い遅延タップを用いた FIR フィルタが安定に動作する。

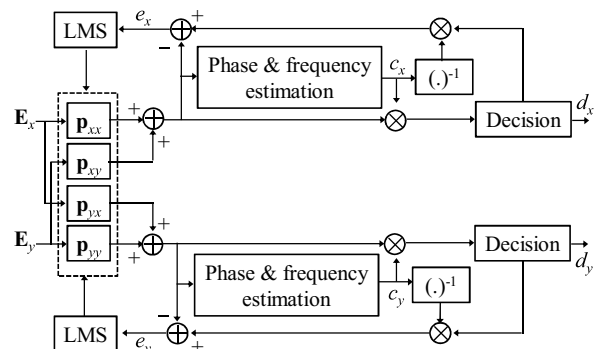


図 1 提案する新しい構成の FIR フィルタ。

図1の構成を用いれば、等化やクロック抽出のために長いタップ段数を用いた場合でも、キャリア位相変動にかかわらず安定な動作が期待できる。計算機シミュレーションにより、図1に示す信号処理回路の動作解析を行った。10Gsymbol/sの偏波多重16QAM信号(80Gbit/s)を入力として用いる。この入力、周波数20GHzで2倍オーバーサンプルされ、図1の回路でデジタル信号処理される。キャリア位相変動として、ここではスペクトル線幅を考える。図2は、周波数オフセットを0とした時符号誤り率 10^{-3} におけるパワーペナルティを、レーザスペクトル線幅の関数として計算した結果を示す。キャリア位相推定部分を分離していない従来型では、タップ段数が大きくなると、ペナルティが急激に増大する。一方、提案する方式を用いれば、ペナルティはタップ段数に依存せず、レーザのスペクトル線幅に対する耐性が強まる。スペクトル幅が1MHz以下であれば十分な性能が得られることがわかる。

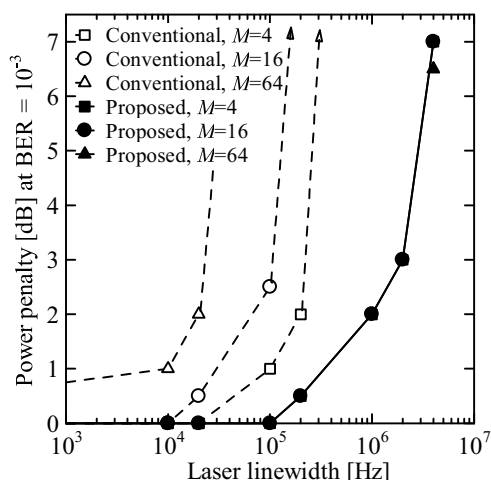


図2 レーザ線幅の関数として計算されたパワーペナルティ。

2.2 波長多重16QAM信号の長距離伝送実験

単一波長および3波長の40Gbit/s、16-QAM信号を、1,000kmの分散マネージメント(DM)伝送路を伝送させることにより、自己位相変調(SPM)と波長チャンネル間の相互位相変調(XPM)が16QAMシステムに与える影響を実験的に示した。受信器は2.1で設計されたものを用いている。

伝送系は25スパンであり、各スパンは29kmの単一モードファイバ(SMF)と11kmの分散補償ファイバ(DCF)によって構成されている。SMFの分散定数、損失係数、非線形係数はそれぞれ、20ps/nm/km、0.2dB/km、0.8/W/kmである。同様にDCFのパラメータはそれぞれ-58ps/nm/km、0.3dB/km、3.0/W/kmである。融着損失を含む各スパンの平均損失は11dBである。各スパンのSMFへの1波長当たりの入力パワー P_m は0dBmから-16dBmの範囲で変化させる。1,000km伝送の後、16-QAM信号はコヒーレント受信器によって検波される。

図3は、3波長、40Gbit/s、16QAM信号のBER特性の波長間隔依存性を示している。ここで、 P_m は1波長当たりのファイバ入力パワーである。波長間隔が狭まるに従い、BER特性が急激に劣化していることが分かる。入力パワー P_m が高くなると、このような傾向はより顕著となる。これはXPMによって生じる位相変動の影響であると考えられる。本伝送システムにおける最適な入力パワーは、所望の波長間隔によって異なるが、例えばファイバ入力パワー-12dBm、波長間隔20GHzにおいておよそ 10^{-3} のBERを達成している。これはForward error correction

(FEC)による誤り訂正の限界値(2×10^{-3})を下回る値である。またこのとき、周波数利用効率は2bit/s/Hzである。

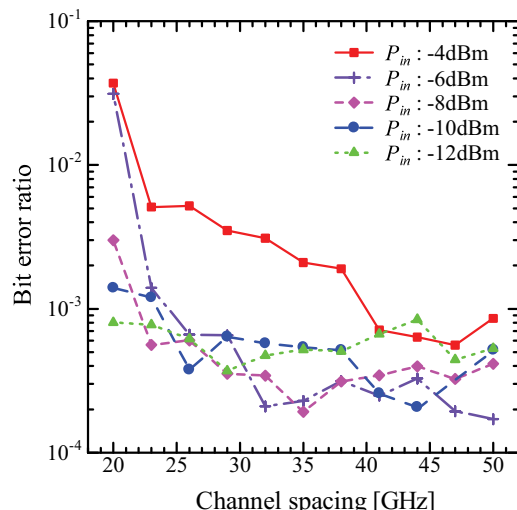


図3 3波長、40Gbit/s、16-QAM信号のBER特性の波長間隔依存性。

3. むすび

現在、100Gbit/s イーサネット伝送の実現に向けて、100Gbit/s 偏波多重QPSK信号を復調するデジタルコヒーレント光受信器の開発が進められている。次のステップは400Gbit/sであると考えられており、このためには16QAMデジタルコヒーレント受信器の開発が不可欠である。

本研究では、新しい信号処理法を導入した16QAM受信器を開発した。提案する受信器構成を用いたオフライン実験において、スペクトル効率2bit/s/Hzの時、伝送距離1,000kmを達成した。さらに本信号処理アルゴリズムの回路実装法、時間多重分離に基づくデジタルコヒーレント受信器のTbit/s級超高速動作など、更なる高速化に繋がる新しい知見が得られた。

【誌上発表リスト】

- [1] K. Kikuchi, "Performance analyses of polarization demultiplexing based on constant-modulus algorithm in digital coherent optical receivers," Opt. Express, vol.19, no.10, pp. 9868-9880 (May 2011).
- [2] K. Kikuchi, "Clock recovering characteristics of adaptive finite-impulse-response filters in digital coherent optical receivers," Opt. Express, vol.19, no.6, pp.5611-5619 (March 2011).
- [3] Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Unrepeated 200-km transmission of 40-Gbit/s 16-QAM signals using digital coherent receiver," Opt. Express, vol. 17, no.3, pp.1435-1441 (Feb. 2009)

【受賞リスト】

- [1] 菊池和朗、第80回服部報公会報公賞、「デジタルコヒーレント光ファイバ通信の研究」、2011年10月8日
- [2] 菊池和朗、第26回光産業技術振興協会 櫻井健二郎氏記念賞、「デジタルコヒーレント光ファイバ通信の研究」、2011年12月7日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://ginjo.t.u-tokyo.ac.jp>