

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2013

課題番号：24656223

研究課題名(和文) デジタル・コヒーレント光受信器を用いた波長パス光ネットワークの研究

研究課題名(英文) Wavelength-path optical networks based on digital coherent receivers

研究代表者

菊池 和朗 (KIKUCHI, Kazuro)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50134458

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：波長多重(WDM)光通信システムにおいて、各チャンネルのスペクトルがナイキストフィルタで整形されているときには、チャンネル間隔を零にすることができるので、伝送容量を最大化できる。このような伝送技術を、「ナイキストWDM技術」と呼ぶ。本研究では、デジタル・コヒーレント受信器を用いて、ナイキストWDM信号の波長多重分離を行うためのアルゴリズムに関する研究を行った。クロストークを含む所望チャンネルの全帯域をコヒーレント受信し、適応デジタルフィルタを作用させてチャンネル分離を行う方式を提案し、シミュレーションと実験から提案手法の有効性を評価した。

研究成果の概要(英文)：When spectra of wavelength-division multiplexed (WDM) channels are shaped by Nyquist filters, we can set the channel spacing equal to zero and maximize the transmission capacity. Such a WDM transmission technology is called "the Nyquist WDM technology". In this project, aiming at efficient demultiplexing of Nyquist WDM channels, we have proposed the digital signal-processing algorithm used in digital coherent receivers. After we receive the total spectrum of a desired channel including crosstalk from the adjacent channel, we can demultiplex the two WDM channels optimally with the proposed adaptive digital-filtering algorithm. The effectiveness of the proposed method has been confirmed with intensive computer simulations as well as experiments.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学, 電子デバイス・電子機器

キーワード：光ネットワーク コヒーレント光通信

1. 研究開始当初の背景

これまでの直接検波方式に基づく光ファイバ通信システムでは、光強度のみが変調パラメータとして利用されてきた。しかし最近になって、光電界の複素振幅を変調するデジタル・コヒーレント光通信方式の実用化が進展しつつある。

一方、波長をラベルとして波長チャンネルの動的なルーティングを行う波長パス光ネットワークの実用化も、従来の直接検波方式を用いて急速に進められている。このようなネットワークのノードでは、波長合分波をつかさどる光フィルタによって、波長チャンネルの動的なルーティングが行われる。しかし、光フィルタには、波長間クロストークと分散による波形歪が避けられないため、波長チャンネルの高密度化とチャンネル数増大によるネットワークの大規模化には、限界があると考えられている。

デジタル・コヒーレント光受信器の波長選択機能を大幅に拡大し、波長パス光ネットワークに導入すれば、波長パス光ネットワークの大規模化を阻止している光フィルタによる制約を打破することができると考えられる。

2. 研究の目的

本研究課題では、申請者が近年研究・開発に成功したデジタル・コヒーレント光受信器の波長選択機能を拡大し、波長パス光ネットワークへの導入をはかる。これまで、光フィルタのクロストークや波形歪によって強く制限されてきた波長パス光ネットワークの性能を、デジタル・コヒーレント光受信器を用いて大幅に改善することを目指す。

3. 研究の方法

高分解能・波長可変デジタル・コヒーレント光受信器を開発し、波長パス光ネットワークの評価を行う。研究計画は、以下の3項目からなる。

- (1) 波長可変局部発振器 (LO) を実装したデジタル・コヒーレント光受信器を試作する。
- (2) デジタル信号処理を用いたナイキストフィルタおよび波形等化器を、受信器に実装する。取得した光複素振幅に対するデジタルデータから、波長間クロストークと波形歪を除去するアルゴリズムを開発する。
- (3) 開発された受信器を用いて、信号品質の評価を行う。

4. 研究成果

矩形状バンドパス特性を持つナイキストフィルタは、符号間干渉なく、光信号帯域をシンボルレートまで狭帯域化できる。このフィルタを用いて光信号帯域を整形し、シンボルレートに等しい周波数間隔で隙間なく波長多重する方式は、ナイキスト波長分割多重 (WDM)

方式と呼ばれ、将来の光パス光ネットワークで重要な役割を担うと考えられる。しかしこの方式では、送信用レーザのわずかな周波数ドリフトにより、隣接チャンネル間のクロストークが避けられない。

本研究では、まず、適応 FIR フィルタを用いて波長多重分離を行うことにより、チャンネル間クロストークによるペナルティを最小化する方法を提案し、ナイキスト WDM 4 相位相変調 (QPSK) 信号に対するシミュレーションにより、本方法の有効性を評価した。

変調フォーマットとして、10 Gsymbol/s QPSK 単一偏波信号を仮定し、2 つの独立なチャンネルを用いて、クロストークによるパワーペナルティを計算した。2 つのチャンネルのパワーを同一にし、周波数間隔を可変にすることによりクロストーク量を変化させた。シンボル数は 10^5 とし、白色ガウス雑音を加えたのち、送信信号スペクトルをロールオフ率 $\alpha=0$ のナイキストフィルタを用いて矩形に整形した。

受信端では、デジタル・コヒーレント光受信器を用いて復調を行った。波長多重分離の方法は、以下の3つの場合を比較した。

- (1) シンボルレートの2倍の速度で受信信号のサンプリングを行った後、ロールオフ率 $\alpha=0$ のナイキストフィルタで、クロストークを含む所望チャンネルの全帯域をフィルタリングする。次に、定包絡アルゴリズム (CMA) に基づく適応型有限インパルス応答 (FIR) フィルタを作用させる。この方法では、適応 FIR フィルタにより、クロストーク抑圧と信号帯域削減の効果が最適化され、クロストークによるパワーペナルティが最小化できることが期待できる。
- (2) (1)と同様にサンプリングした後、隣接チャンネルからのクロストークを完全に除くように所望チャンネルを矩形にフィルタリングし、波形整形のために適応 FIR フィルタを用いる。この方法では、クロストークは完全に除去されるが、同時に信号帯域も欠落する。
- (3) ロールオフ率 $\alpha=0$ のナイキストフィルタで、クロストークを含む所望チャンネルの全帯域をフィルタリングした後、ダウンサンプリングする。この方法では、信号帯域は欠落しないが、隣接チャンネルからのクロストークは避けられない。

(1)-(3)の操作の後に、位相推定を行い、受信パワーの関数として符号誤り率 (BER) を求めた。クロストークによるパワーペナルティは $BER=10^{-3}$ で評価した。

図 1 に、 $BER=10^{-3}$ におけるパワーペナルティを示す。黒線、青線、赤線がそれぞれ (1), (2), (3) の手法に対応する。また、受信パワーが 0 dBm、クロストーク量が -10 dB の

時, (1)における収束後の適応 FIR フィルタ振幅の周波数特性は, 図 2 の特性を持つ。

図 1 から, 所望信号を, クロストークを含め全帯域受信してから適応 FIR フィルタを用いた場合((1)のケース)に, パワーペナルティが最小になることがわかる。(1)の場合, 図 2 に示すように, クロストークが混入する帯域(5 GHz 近傍)では, 適応フィルタ振幅の制御によって, クロストーク抑圧によるパワーペナルティの改善と信号帯域の削減によるパワーペナルティの劣化が最適に調整されている。この結果, クロストークの影響が最小になると考えられる。

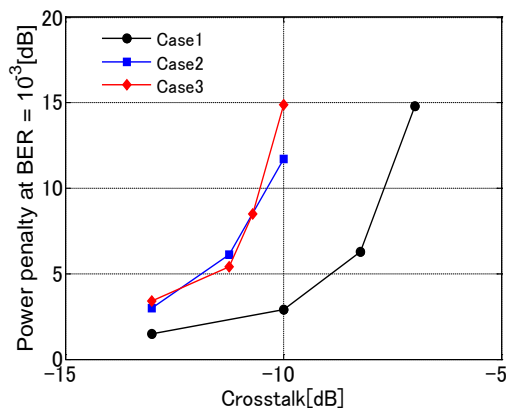


図 1 BER=10⁻³におけるパワーペナルティ。黒, 青, 赤線はそれぞれ(1) (2) (3))に対応する。

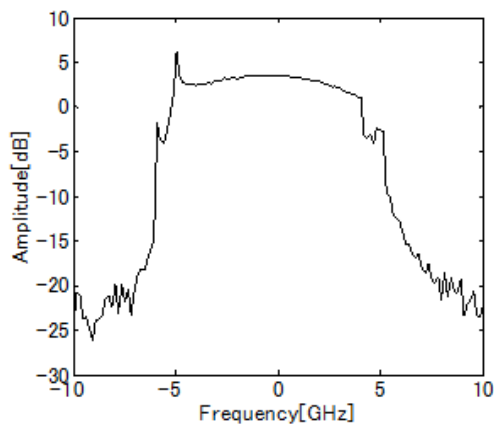


図 2 手法(1)の場合の FIR フィルタ振幅の周波数特性。

原理確認実験として, 10 Gsymbol/s のナイキスト WDM QPSK 信号の復調実験を行った。図 3 に実験系を示す。送信器に DFB レーザダイオード (LD) を用いた。DFB-LD の波長は 1552 nm であり, 線幅はおよそ 150 kHz である。周波数間隔 $\delta f = 10$ GHz の波長の異なる CW 光二つを, IQ 変調器 (IQM) を用いて独立に変調した。電気信号は任意波形電気信号発生装置のデジタル信号処理 (DSP) 回路とデジタル・アナログ変換器 (DAC) を用いて発生させた。PRBS9 疑似ランダム信号を作成し, 符号間にゼロを挿入することでサンプリング速度を 2 sample/symbol へ変更した。その信号 1022

サンプルを離散フーリエ変換 (DFT) してナイキストフィルタリングした。フィルタのロールオフ率は 0 である。更に電気回路の帯域制限のような線形歪みを等化する伝達関数をかけた後に逆 DFT により時間信号に戻し, DAC を介して 10 Gsymbol/s 電気信号を得た。ここでは 10 Gsymbol/s DAC2 台から構成される 20 Gsample/s 時間インターリーブ DAC を用いた。得られた電気信号を 2 分岐し, これらで IQM を駆動した。

以上のような処理によって得られた 10 GHz 帯域の矩形状光スペクトルを有する QPSK 光信号 2 チャンネルを合波することで WDM QPSK 信号が生成される。クロストーク量は各送信器のレーザのビートを RF スペクトルアナライザで観測し調整を行っている。

受信端では可変減衰器 (VOA) によって平均入力パワー P_{in} を調節する。その後, 光信号は EDFA によって前置増幅され, 位相ダイバーシティホモダイン受信器によって検波される。送信用の DFB-LD と同じ特性を持つ DFB-LD が局発光源として用いられている。受信器の出力はアナログ・デジタル変換器 (ADC) によって 50 Gsample/s の速度で非同期にサンプルされる。その後サンプルされたデータは DSP 回路によりオフライン処理される。DSP 回路図を図 4 に示す。信号データのサンプリング速度を 2 sample/symbol に変換した後, 両信号すべてを矩形フィルタでフィルタリングした。その後, クロックリカバリ, 信号等化, 位相推定を, 判定指向 LMS アルゴリズムに基づく適応 FIR フィルタを用いて行った。

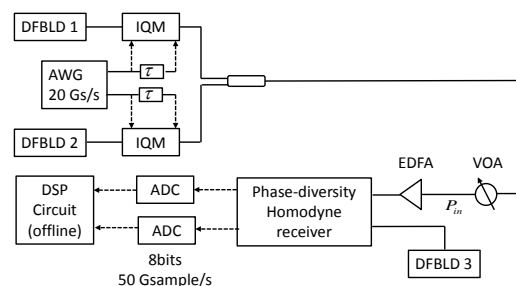


図 3 10 Gsymbol/s QPSK 信号復調のための実験系。

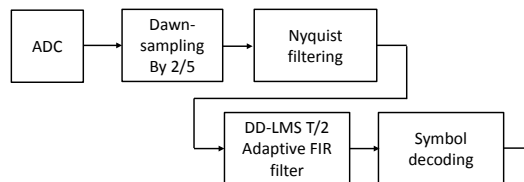


図 4 DSP 回路の構成。

図 5 に BER=10⁻³におけるクロストークに対するパワーペナルティを示す。青線, 赤線がそれぞれ(2), (3)の手法に対応するが(1)

の手法は、隣接チャンネルすべてを固定のフィルタでフィルタリングした後、適応 FIR フィルタを用い、波長多重分離した場合である。また受信パワーが-30 dBm、クロストーク量-10 dB の時、(1)における収束後の適応 FIR フィルタ振幅の周波数特性は図 6 の特性を持つ。図 5 から、所望信号を全帯域受信して適応 FIR フィルタを用いた場合((1)のケース)に、シミュレーションと同様にパワーペナルティが最小になることがわかる。(1)の場合、図 6 に示すように、クロストークが混入する帯域では、適応フィルタ振幅の制御によって、クロストーク抑圧によるパワーペナルティの改善と信号帯域の削減によるパワーペナルティの劣化を最適に調節することに成功している。実験においてもシミュレーションと同様に適切に調整されていることが分かる。

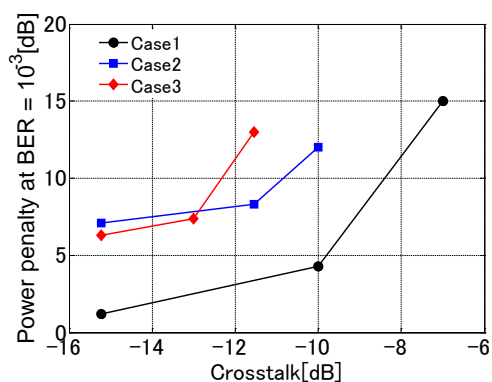


図 5 BER=10⁻³におけるパワーペナルティ。黒、青、赤はそれぞれ(1) (2) (3)に対応する。

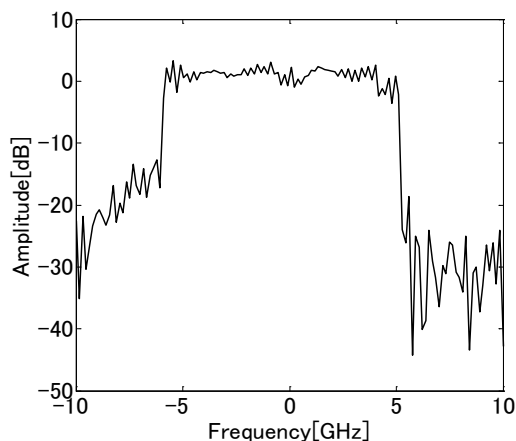


図 6 FIR フィルタ振幅の周波数特性の測定結果。

以上のように、本研究では、ナイキスト WDM の波長多重分離を行うために、クロストークを含む所望チャンネルの全帯域に対して適応 FIR フィルタを作用させる方式を提案し、シミュレーションと実験から提案手法の有効性を評価した。提案手法が、ナイキスト WDM システムの波長多重分離に有効であることが示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Md. S. Faruk, Y. Mori, and K. Kikuchi, "In-band estimation of optical signal-to-noise ratio from equalized signals in digital coherent receivers," *IEEE Photonics J.*, 査読有, vol.6, no.1, 7800109, Feb., 2014. DOI:10.1109/JPHOT.2014.2304557
- ② 菊池和朗, “デジタルコヒーレント光受信器における適応等化技術,” 電子情報通信学会論文誌(B), 査読有, vol. J96-B, no. 3, pp. 212-219, 2013年3月. <http://search.ieice.org/bin/index.php?category=B&lang=J&curr=1>

[学会発表] (計 5 件)

- ① Md. S. Faruk, Y. Mori, and K. Kikuchi, "Estimation of OSNR for Nyquist-WDM transmission systems using statistical moments of equalized signals in digital coherent receivers," *Optical Fiber Communications Conference (OFC 2014)*, Th2A.29, San Francisco, CA, USA (9-13 March 2014).
- ② Y. Mori, C. Han, H. Lu, and K. Kikuchi, "Wavelength demultiplexing of Nyquist WDM signals under large frequency offsets in digital coherent receivers," *European Conference on Optical Communication (ECOC2013)*, Mo.4.C.6, London, UK (22-26 Sept. 2013).
- ③ K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Frequency stabilization of multiple semiconductor lasers for Nyquist-WDM transmission systems," *Optical Fiber Communications Conference (OFC 2013)*, OTu2I.6, Anaheim, CA, USA (17-21 March 2013).
- ④ Y. Mori and K. Kikuchi, "Dual-stage decision-directed phase estimator enabling perfect frequency-offset elimination in digital coherent optical receivers," *Optical Fiber Communications Conference (OFC 2013)*, OTu3I.7, Anaheim, CA, USA (17-21 March 2013).
- ⑤ 平岡大希, 韓燦教, 菊池和朗, “ナイキスト WDM 信号におけるチャンネル間クロストークペナルティの適応 FIR フィルタによる抑圧,” 電子情報通信学会総合大会, B-10-51, 岐阜大学, 岐阜, 2013年3月19日-22日.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

菊池 和朗 (KIKUCHI, Kazuro)
 東京大学・大学院工学系研究科・教授
 研究者番号: 50134458