

平成 27 年 6 月 25 日現在

機関番号：13501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630160

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Simultaneous decoding/demultiplexing of optically Fourier-encoded optical code division multiplexing signals

研究代表者

埴 雅典 (HANAWA, Masanori)

山梨大学・総合研究部・教授

研究者番号：90273036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：フーリエ符号化同期光符号分割多重(FE-SOCDM)システムにおいて、ファイバ型回折格子(FBG)によって実装された符号器で光学的に符号化したFE-SOCDM信号のデジタル信号処理による一括復号化システムの検討に取り組んだ。その結果として、以下を得た。(1) FE-SOCDM信号のデジタル一括復号の実験的実証。(2) 利得スイッチ短光パルス源のタイミングジッタとチャープの同時低減条件の明確化。(3) 多入力多出力(MIMO)技術の適用によるFE-SOCDM信号のデジタル補償技術の有効性の実証(数値シミュレーション)。(4) フーリエ符号化用FBG型符号器の位相誤差低減と歩留まりの向上。

研究成果の概要(英文)：In this study, investigations on digital simultaneous detection of optically Fourier-encoded synchronous optical code division multiplexing (FE-SOCDM) were performed. The results are as follows: (1) Experimental demonstration of digital simultaneous detection of FE-SOCDM signals. (2) Clarification of simultaneous reduction of timing-jitter and frequency chirp on gain-switched optical short pulse source. (3) Numerical demonstration of digital impairment compensation scheme for FE-SOCDM signals. (4) Phase error reduction of FBG-based Fourier encoders based on structure identification of FBG encoders by using down-hill-simplex (DHS) algorithm and boost yield in fabrication of FBG-based Fourier encoders.

研究分野：光ファイバ通信

キーワード：光符号分割多重 フーリエ符号 デジタルコヒーレント受信 利得スイッチング短光パルス源 ファイバ型回折格子 MIMO デジタル信号処理 光信号処理

1. 研究開始当初の背景

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一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。他にも英国・ヘリオットワット大学の Wang 教授、同じく英国中国・精華大学など、国内外広く研究が行われている。

一方、研究代表者は 2008 年の Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) において OCDM 用の新しい直交符号として一般化アダマル行列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し、以後の検討を通じ、他のグループが用いている 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得る。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。

一方、OCDM 方式では従来一次変調には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、多値変調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世界的に見ても一つもなかった。これらの実現によりフーリエ符号化 OCDM 方式の周波数利用効率が OFDM (直交周波数分割多重) 方式と同等であることを明らかにできるとともに、能動素子による簡易な光学的符号化と単一デジタルコヒーレント受信機による一括受信、伝送路歪等のデジタル補償、などにより、アナログ/光学処理とデジタル/数値計算処理によって柔軟なシステム設計が可能となり、将来のフォトニックネットワークに向けた様々な新しい光技術の研究を活性化することが期待される。

これが研究開始当初の背景である。

2. 研究の目的

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、高速フーリエ変換によって (以後 FFT) デジタル的に全チャネル一括して符号化する方式の有用性の検証を行った。平成 25 年度は、計算機シミュレーションによる実験実施条件の決定、および送信側用 OCDM 符号器の位相誤差低減、OCDM システムへの差動 QPSK 変調の導入と位相ダイバーシティ光受信実験、平成 26 年度は 4 ~ 16 チップフーリエ符号化 OCDM 信号の一括復号・多重分離実証実験を目的とした。

本研究では、図 1 のように受動光デバイス、ここでは光ファイバ回折格子 (FBG) 型光相関器を用いた光信号処理によって符号化・多重化された OCDM 信号を、図 2 のようにデジタル信号処理によって一括して復号・多重分離を行うという点に新規性がある。特に

直交符号としてフーリエ符号を用いた OCDM システムでは受信処理に高速フーリエ変換 (FFT) を用いることが可能となり、とても効率的に一括復号・多重分離が可能となる。これはこれまで一切検討すらされたことのない斬新で挑戦的な手法であり、受動光ネットワーク (PON) 型アクセスネットワークへ OCDM 方式を導入するきっかけになる飛躍的な技術革新を与えることが期待されている。

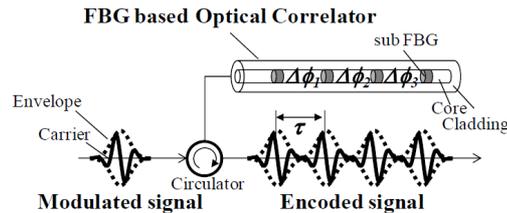


図 1 FBG 型光相関器

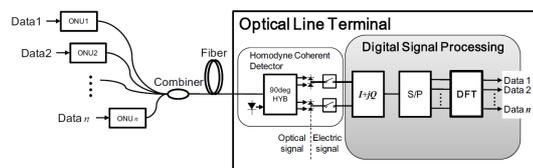


図 2 OCDM 信号の一括復号器

3. 研究の方法

FFT によりフーリエ符号化 OCDM 信号を一括復号・多重分離する原理は既に電子情報通信学会光通信システム研究会で報告済みである (岡村康弘, 埴 雅典, 電子情報通信学会技術研究報告, OCS2011-92, 2011 年 10 月)。一方で本課題の目的達成には以下の点を検討する必要があった。

- (1) FFT を用いた一括復号・多重分離技術の確立
- (2) 短光パルス源への要求仕様の明確化と駆動条件の最適化
- (3) 光学的符号化装置 (FBG 型光相関器) の位相誤差低減
- (4) OCDM 信号の位相ダイバーシティ受信技術の確立

我々がこれまでに行ってきた OCDM 技術の検討では変調方式に OOK を採用し、FBG 型光相関器によって光学的に復号処理を行っていたため、復号後は直接光検出器で検出を行っていた。しかし本課題の目標達成のためには符号化信号の光電界情報をデジタル信号に変換する必要があるため、位相ダイバーシティ受信が必須となる。そこで位相ダイバーシティ受信短光パルス源出力を FBG 型光相関器によって符号化した信号 (1 チャンネル OCDM 信号) を位相ダイバーシティ受信し、A/D 変換後に符号語の位相状態を取得できるようにすることを目指した。実際には、限られた研究経費と実験装置の調達に長い待ち時間を要した関係で、研究機関内には OCDM 信号の位相ダイバーシティ受信の実験環境を全て整えて研究室内で所望の実験を実施するまでには至らなかった。その一方で、ある研究機関より必要な実験環境を借用することができたことから、当初予定通り

フーリエ符号化 OCDM 信号の FFT による一括復号・多重分離の検討を実施した。4 チップフーリエ符号を用いた 2 チャンネル~4 チャンネル OCDM 信号の光電界情報をデジタルストレージオシロスコープで取得し,FFT によりフーリエ変換を求めることによって一括復号・多重分離を行う方式の原理確認実験を行った。

我々の OCDM システムではセルフシーディングにより安定化した利得スイッチ型短光パルス源 SS-GS-LD を短光パルス源として用いているが,利得スイッチによって生成される短光パルスは駆動条件によっては大きなチャープを有する。本課題の目標達成には,このチャープが位相ダイバーシティ光受信に与える影響を調べ,短光パルス源への仕様要求を明らかにする必要がある。そこでチャープパルスを光源とする位相変調信号の位相ダイバーシティ受信方法を実験的に検討すると共に,SS-GS-LD の駆動条件最適化を実施した。

光学的符号化装置 (FBG 型光相関器) の位相誤差低減について,これまでにを行った計算機シミュレーションの結果によれば,OCDM に BPSK や QPSK などの位相変調方式を組み合わせる場合には,OOK 方式以上に符号化・復号化用装置の高精度化が必要となることが明らかになっている。これまで我々は部分反射型光ファイバ回折格子を縦列接続した FBG 型光相関器を研究室内で内製し,隣接する FBG 間の空隙部を位相トリミングや小型の TEC (サーモエレクトロニックコントローラ) によって温度制御することによって様々な OCDM 用符号に対応させることができるプログラマブルな FBG 型光相関器 PFVOC を開発してきた。しかし内製した FBG の隣接 FBG 反射光波間位相には大きな位相誤差が含まれる。この位相誤差を低減するには,作成時の FBG 型光相関器の位相構造を把握する必要があるが,我々はこれを可能とする手法を既に提案し,特許も取得している。具体的には,実測した光相関器スペクトルと数値モデルから算出した光相関器スペクトルが一致するように数値モデルのパラメータを適応アルゴリズムで調整し,両スペクトルの誤差が十分に小さく収まった数値モデルより,位相誤差を推定する。従来,適応アルゴリズムとして最小二乗平方 (LMS) アルゴリズムを用いてきたが,局所解へトラップされ誤差が収束しないことが問題となっていた。本課題では,この問題を解決すべく,数値モデルと適応アルゴリズムの見直しにより,位相推定誤差の低減と,本方式を用いて作成する FBG 型光相関器の歩留まりの向上を図った。

4. 研究成果

図 3 に示す実験系を用いて実証実験を行った QPSK 変調した OCDM 信号の一括復号結果の例を図 4 と図 5 に示す。

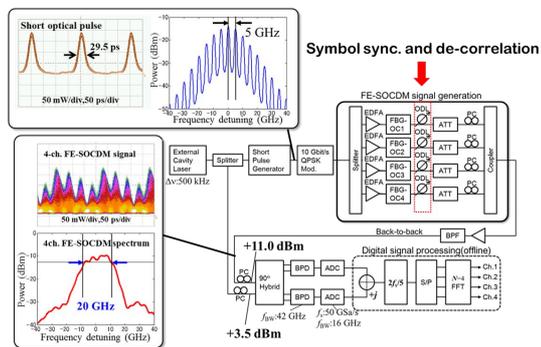
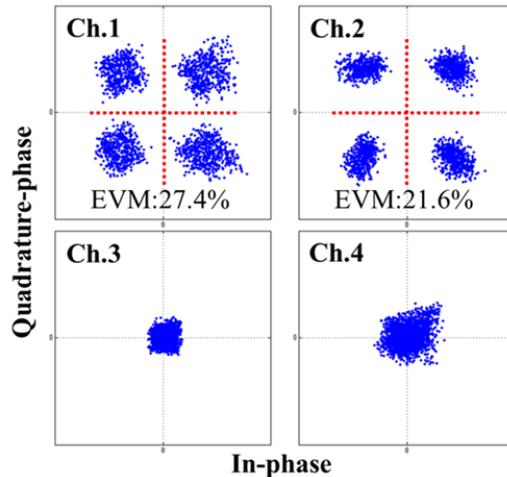
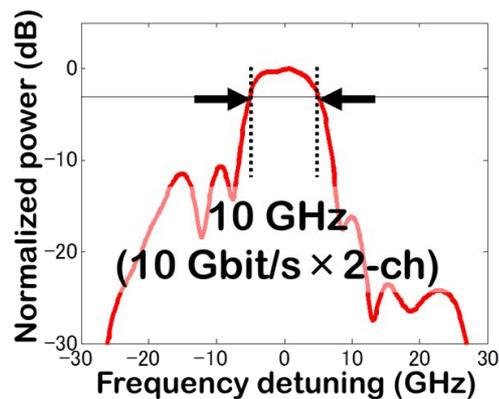


図 3 デジタル一括復号の実験系



(a) QPSK 信号のコンスタレーションマップ

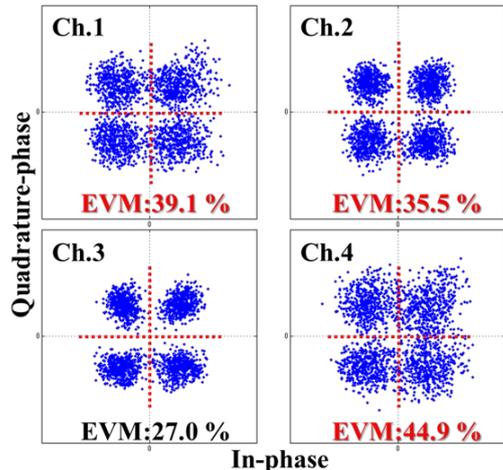


(b) 光スペクトル

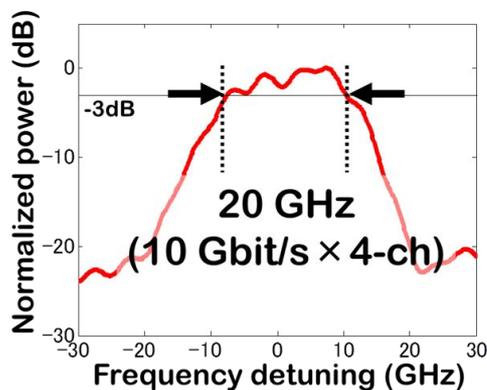
図 4 QPSK 変調した 2ch OCDM 信号のデジタル一括復号結果

図 4 は QPSK 変調した 2 チャンネル OCDM 信号をデジタル一括復号した結果である。(a) のコンスタレーションマップでは,チャンネル 1 (Ch.1) とチャンネル 2 (Ch.2) に QPSK の信号点を確認でき,Ch.3 と Ch.4 にはノイズのみで受信信号が現れていないことが確認できる。また(b)の光スペクトルでは光帯域幅が約 10GHz であることが確認でき,10Gbit/s の QPSK 信号を 2 チャンネル多重していることから,周波数利用効率がおよそ 2bit/s/Hz であることが確認できる。これは偏光多重などの他の多重技術を併用していない OCDM システム単体では最も高い周波数利用効率となっており,フーリエ符号化 OCDM と多値変調信号の組み合わせにより,目論見通り高

い伝送速度と高い周波数利用効率を実現できることが実証された。



(a) QPSK 信号のコンスタレーションマップ



(b) 光スペクトル

図 5 QPSK 変調した 4ch OCDM 信号のデジタル一括復号結果

図 5 は同じく QPSK 変調した 4 チャンネル OCDM 信号をデジタル一括復号した結果である。(a)のコンスタレーションマップでは全てのチャンネル QPSK の信号点を確認できるが、特に Ch.1 と Ch.4 において 2 チャンネルの場合と比べて信号点が広く拡散し、信号点劣化が著しい。これは、位相ダイバーシティ受信時の曲はつ光源の出力不足や FBG 型光相関器の位相誤差に起因しており、実験系のさらなる改善が必要である。

(b)の光スペクトルでは 2 チャンネルの場合と同じく約 20GHz の光帯域幅で 10Gbit/s の QPSK 信号を 4 チャンネル多重できており、周波数利用効率はおよそ 2bit/s/Hz である。

OCDM 方式では光源として短光パルス源が不可欠だが、PON システムの上り回線に適用するにあたっては、短光パルス源を ONU 側に設置しなければならない都合上、極力簡素で安価なものでなければならない。しかし一般的な OCDM システムではモードロックレーザーダイオードやファイバレーザなどの高価な短光パルス源が用いられているのが実情である。

我々は簡素で安価な短光パルス源として、レーザ利得媒質で発生される緩和振動の最初の発振を短光パルスとして用いる利得スイッチ短光パルス源を用いることを検討しているが、利得スイッチパルスは大きな周波数チャープとパルス発振タイミングのゆら

ぎ(ジッタ)を有しており、通信利用には適さないとされている。

野中らが提案したセルフシーディング法は、発振されたパルスの一部を利得媒質内に戻し強制的にパルス発振を起こさせることでタイミングジッタを低減する手法だが、この手法を用いた場合にも周波数チャープは低減されずに残り、位相変調には依然として適さないと考えられる。そこで(a)利得スイッチ短光パルスへの位相変調の適用可能性、(b)タイミングジッタと周波数チャープを同時に低減する方式、について検討を行った。

(a)については、セルフシーディングでタイミングジッタを低減した利得スイッチ短光パルスを光源として 5Gbit/s の 2 値位相シフトキーイング(BPSK)変調の予備実験を行い、利得スイッチ短光パルスのチャープの影響を調査した。紙面の都合により詳細は省略するが、差動 BPSK 変調と遅延検出を組み合わせることで、利得スイッチ短光パルスを光源とした 2 値の位相変調信号は時折復調できたが、安定した復調結果を得ることは出来なかった。また、4 値の差動 QPSK 信号の遅延検出はできなかった。このことは、時間的に隣接する利得スイッチ短光パルスはランダムに異なる周波数チャープを有していることを示していることから、周波数チャープの低減法に研究の軸足を変更した。

文献調査の結果、利得スイッチ短光パルスを適切に光フィルタリングすることでチャープを低減し、同時にパルス幅も低減できる可能性があることが判明した。そこで、セルフシーディングを適用した利得スイッチ短光パルス源に対して、レート方程式をベースにした数値解析を行い最適な利得スイッチパルス発振条件を調査した。この結果として 1GHz の繰り返し周波数においては従来と同等の約 1.3ps の RMS ジッタを維持しつつ、光フィルタリングを適切に適用することでチャープを低減し、短光パルスの時間半値全幅を約 40ps から 35ps に低減できることを確認した。また、所有していた光帯域通過フィルタを用いた予備的な実験を行い、数値解析と同様の傾向が見られることを実験的にも確認した。しかしこの方法で通信品質の短光パルスを生成する検討はまだ始まったばかりであり、今後さらなる検討が必要である。

FBG 型光相関器の構造同定アルゴリズムに、滑降シンプレックス法を採用するとともに、同定パラメータを厳選(例えば反射率誤差の同定は行わず、位相誤差の主要因となる FBG 間隔だけを同定する)ことによって、位相推定誤差が 0.05 に収まる割合を 100% とすることができた。また、この構造同定法を用いて位相誤差補正を行うことで、FBG 型符号器作成の歩留まりを大幅に改善した。さらに、このようにして作成した FBG 型符号器を用いて 8 チップ/16 チップの接続フーリ工符号器を構成して符号化/復号化を行い、理論波形とよく一致する高品質な復号化波形を得ることが出来た。

FFT による一括受信後のデジタル信号処理によって、FBG 型光相関器の誤差を低減する方法について、数値シミュレーションによって検討を行った。その結果、ゼロフォーシング法と平均自乗誤差最小化法による白色ガウス雑音下における FBG 型符号器の振幅/位相誤差が各々 0.5dB / 0.1 以内であれば、パワーペナルティを 1dB 以下に抑えられるこ

とを確認した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 11 件)

戴崧元, 塙雅典, “低時間ジッタ低周波数チャープの利得スイッチ短光パルス源,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2015 年 4 月 23 日, リゾーピア熱海(熱海市)

岡村康弘, 塙雅典, “Modified CMA の繰り返し適用によるフーリエ符号化同期 OCDM 信号のブラインド分散等化,” 電子情報通信学会光通信システム研究会, 2014 年 7 月 31 日, 東工大蔵前会館(目黒区)

萩原智哉, 塙雅典, “多変数構造同定法による低損失 SFBG の作成精度向上,” 電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会, 2014 年 1 月 24 日, 同志社大学(京都府)

飯島理, 岡村康弘, 塙雅典 “4 チャンネルフーリエ符号化同期 OCDM 信号に対する Modified CMA 適用によるチャンネル間干渉等化,” 電子情報通信学会第 27 回光通信システムシンポジウム, 2013 年 12 月 12 日, 東レ研修センター(三島市)

萩原智哉, 塙雅典, “光符号分割多重のための 8 チップ FBG 型符号器の作成,” 電子情報通信学会 第 27 回光通信システムシンポジウム, 2013 年 12 月 12 日, 東レ研修センター(三島市)

Tomoya Yagihara, Masanori Hanawa, “Multivariate identification of low-loss sampled fiber Bragg gratings by downhill simplex method,” 2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS2013), 2013 年 11 月 15 日, 沖縄自治会館(沖縄市)

Masanori Hanawa, Yasuhiro Okamura, Osamu Iijima, “DSP-based multi-channel simultaneous detection of 10-Gbit/s Fourier encoded-synchronous optical code division multiplexing signals,” International Workshop on Optical signal processing and Optical packet Switching (IWOO2013)(招待講演), 2013 年 9 月 29 日, Royal Society of Edinburgh(スコットランド・エジンバラ)

萩原智哉, 塙雅典, “滑降シンプレックス法を用いた低損失 4 チップ SFBG の FBG 間隔と反射率の一括同定,” 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2013 年 9 月 18 日, 福岡工業大学(福岡市)

Osamu Iijima, Yasuhiro Okamura, Masanori Hanawa, “Digital Compensation of Phase and Wavelength Errors in FBG Encoders for FE-SOCDM system,” The 18th IptoElectronics and Communications Conference (OECC2013), 2013 年 6 月 30 日~7 月 4 日, 京都国際会館(京都府)

飯島理, 塙雅典, “パイロットシンボル

挿入によるフーリエ符号化同期 OCDM 信号のファイバ伝送における波長分散補償,” 電子情報通信学会光通信システム研究会, 2013 年 6 月 20 日, 日本大学(福島市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塙 雅典 (HANAWA, Masanori)
山梨大学・大学院総合研究部・教授
研究者番号: 90273036

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者

岡村康弘 (OKAMURA, Yasuhiro)
徳島大学・ソシオサイエンス研究部・助教
研究者番号: 907069961