

クロストーク分析に基づき最適化されたマルチキャリアを収容可能な柔軟性のある全光 OFDM 技術の研究開発

Studies on all optical room-based OFDM by crosstalk analysis for realistic multi-carrier detection

研究代表者

小西 毅 大阪大学

Tsuyoshi KONISHI Osaka University

研究分担者

服部邦典[†] 奥野将之[†] 美野真司[†] 姫野明[†] 植之原裕行^{††}

Kunihiro Hattori[†] Masayuki Okuno[†] Shinji Mino[†] Akira Himeno[†] Hiroyuki Uenohara^{††}

[†]NTT エレクトロニクス株式会社 ^{††}東京工業大学

[†]NTT Electronics Co. Ltd. ^{††}Tokyo Institute of Technology

研究期間 平成 24 年度～平成 26 年度

概要

本研究では、クロストーク分析に基づく伝送路に最適なマルチキャリアの創出を欧州の研究者と協調して試みる。その具現化技術については、欧州の FP7 における ASTRON プロジェクトとの協調をとった光 FFT 回路を用いたアプローチと、現在の光 OFDM 技術のボトルネックとなっている A/D 変換部分の光化による二つの有望なアプローチの比較研究結果を通して、従来のマルチキャリアの限界を打破する機能の具現化に最適なアプローチの選択とその実現を目指す。

1. まえがき

ICT 分野において日本及び欧州に共通して社会的に重要度の増しているデータセンタの高速ユーザの需要の増大などから、通信容量は本研究課題の開始時の状況と変わらずに引き続き増加の見通しであり、2015 年には 400Gbps が必要といわれている。このような更なる通信容量の大容量化とともに、経済化の両立が求められており、ネットワークの物理限界も顕在化してきている[1]。最も電力を消費するスイッチング技術の低消費電力化のペースは鈍化してきており、増加してきているトラフィックによる消費電力の増加に対応ができない状況が大きな問題となっている。このような継続的な伝送容量拡大と低消費電力化への要求に応えるための伝送技術と光サブシステム技術の革新技術として、現在、等化処理や補償処理がデジタル技術で可能な自由度の高いデジタルコヒーレント技術や、自由度の高いネットワーク的なアプローチで前述の低消費電力化の課題の解決を試みるエラスティックネットワークが提案されている[2]。このような技術的背景の下、その具現化技術として、光領域での並列処理の導入が可能な物理基盤の重要性も注目され、高いスペクトル利用効率を実現できる All Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing(AO-OFDM)技術の導入が注目されており、活発な研究が推進されている[3-10]。

現在の大容量通信を支える基本技術として定着しているデジタルコヒーレント技術において、伝送時の非線形光学効果による信号歪の影響は、非線形シャノン限界と呼ばれる通信容量限界に大きく影響を及ぼす。非線形歪と直結する AO-OFDM の伝送時間信号のピーク対平均電力比(PAPR)の低減は伝送容量の向上および低消費電力化における重要な検討項目の一つである。PAPR の低減が期待で

きる AO-OFDM の方式として、時間一周波数平面上の直交軸回転効果に基づき、時間信号電力を周波数領域に拡散させる光フラクショナル OFDM(Fr-OFDM)が提案されている[3]。光 Fr-OFDM 信号は、AO-OFDM 同様に AWG に基づいた光 Fr-DFT 回路を用いて送受信が可能である[3, 4]。また、デジタルコヒーレント技術に求められる処理の高速化に伴う消費電力の増大は大きな課題となっている。特に、フロントエンド処理として必要不可欠なアナログ/デジタル変換(A/D変換)の性能向上は、後段での複雑な処理性能の負荷と直結するために非常に重要である。

本研究課題では、このような技術的課題の解決において、新しいサブキャリアの研究開発と A/D 変換の光化の検討を推進した。特に、前者については、求められる柔軟性を持つ技術として、光 OFDM 技術とその中心的な処理である FFT (fast Fourier transform)の光化を基本としたアプローチに着目し、マルチキャリアの自由度の拡大と伝送技術における有意な機能の創出を目的として、光 OFDM 技術のための光フラクショナル離散 FFT(FR-FFT)デバイスに関して検討を行った。本フォーラムでは、テストベッドを用いた試験を実施した前者を中心に講演を行う。

2. 研究開発内容及び成果

【新しいサブキャリアの開発】光 OFDM で用いる周波数直交基底に重畳された光信号は、東ねる周波数の数が増えてくると急峻なパルスを形成してしまうため、光ファイバ中の非線形光学効果の影響により多重化数が制限される。一方で、FT を拡張したフラクショナルフーリエ変換(FrFT: Fractional Fourier Transform)により実現される光フラクショナル OFDM(光 Fr-OFDM)では、図 1 (b)の

$u_1, u_2 \dots, u_N$ に示すような、時間軸上で歪んだ波形成分を直交基底として用いるため、パルス形成の問題を避けることができ、非線形光学効果による多重化数の制限が緩和される。

本研究では、FrFFTに基づく新規な直交基底多重化技術である光 Fr-OFDM の送受信方式を提案・検討した。また、その実用化を目指し、1)提案した光 Fr-OFDM 信号の送受信方式の検証、2)新世代通信網テストベッド“JGN-X” (情報通信研究機構—KDDI 間の地下に敷設された、往復 89.2 km の実用試験用伝送設備) の伝送による実用試験を行った。

光 OFDM 送信器では、図 1(a) に示すように、各ポートに入力された光信号は、それぞれ対応した周波数直交基底 f_1, f_2, \dots, f_N に重畳される。時間信号の周波数直交基底への重畳は、時間と周波数を軸に取った時間-周波数平面上で、定数 $\pi/2$ [rad]の軸の回転に対応する。光 OFDM 送受信系全体では合計 π [rad]だけ軸が回転することで、再び光信号が時間軸に戻り、受信が達成される。一方、光 Fr-OFDM 送信器では、Fig. 1(b)に示したように、各ポートに入力された光信号は、それぞれ対応した Fr 直交基底 u_1, u_2, \dots, u_N に時間信号が重畳される。Fr 直交基底への重畳は、時間-周波数平面上での、任意の回転量 $p \cdot \pi/2$ [rad]の軸の回転に対応する。ここで、 p は少数を含む 0 から 2 の任意数である。光 Fr-OFDM においても同様に、合計 π [rad]だけ軸が回転することで、再び光信号が時間軸に戻り、受信が達成される。以上、少数を含む 0 から 2 の任意の数 α を用いて、送信器側では $p=\alpha$ に対応する送信器を用い、受信器側では $p=(2-\alpha)$ に対応する受信器を用いることで送受信が実現できる。Fr-OFDM では、この p の値が少数をとった OFDM をより一般化した直交基底を用いることが可能であり、回転角度を自由に定めることによりキャリアの自由度の拡大が可能である。このような FT を拡張した新しい直交基底として Fr-FT を用いる提案が欧州側から提案されていたが、Fr-FT を用いた実際の送受信方法とクロストークを改善可能な伝送路

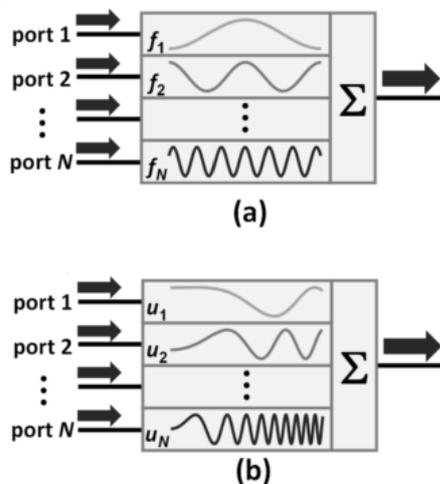


図1 サブキャリアを用いた送信の説明図 (a)光 OFDM 送信系 (b) 光 Fr-OFDM 送信系

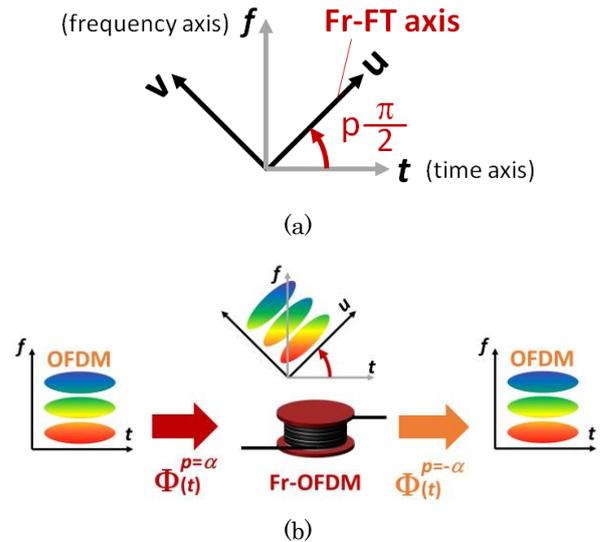


図2 確立したフラクショナルフーリエ変換を用いた伝送方式の説明図：(a)変換の様子、(b)伝送原理の様子。

に最適なマルチキャリアの創出については、十分に検討されていなかった。そこで、最終的に図 2 に示すような伝送方式を確立した。

送信前と受信後に光 FFT 回路を用いた場合と基本的には同じ信号状態となるような構成について検討を行った。送信信号の重畳された変調光パルス群を $p=\alpha$ ($|\alpha| \leq 1$) の光 FR-FFT デバイスの各ポートに入力すると、変調光パルス群がそれぞれ異なる FR-FFT ベースのサブキャリアに重畳された変調信号が合波されて出力される。伝送された信号は受信段において、 $p=2-\alpha$ ($|\alpha| \leq 1$) の光 FR-FFT デバイスと時間ゲートを用いて、元の信号状態に戻され、送信側の変調方式に対応した復調が施される。FR パラメータが送信側と合わせて 2 になるようにすることで、時間-周波数面上の回転が整数となり、信号を通常の FFT と同様に扱うことが可能となる。以上より、FR-FFT ベースのサブキャリアを用いた光 OFDM 伝送が実現される。

クロストーク分析に基づく最適化マルチキャリアの設計と最適化マルチキャリアを収容可能な柔軟性のあるサブシステムの設計を行った。本研究課題の中核となるフラクショナルフーリエ変換 (FrFFT変換) に基づくサブキャリアを用いる光フラクショナルOFDM (FrOFDM) 方式は、エラスティックネットワークの主要な多重化方式である従来のOFDMおよびナイキストOTDM(N-OTDM)方式の利点を柔軟に選択することにより PAPR を低減し、非線形シャノンリミットによる消費電力や伝送能力における制限の緩和に有効である。光FrOFDM 方式の送受信系における多値変調信号 (QPSK信号) に対する非線形光学効果の低減効果について、欧州側との連携を通してシミュレーションによる最適化を行った。フラクショナルパラメータ p の値を最適化することにより伝送路の任意の距離において PAPR を低下させることが可能となる。最適化されたマルチキャリアについて、図3に示すように低消費電力化に直結する PAPR を従来の FFT ベースのサブシステ

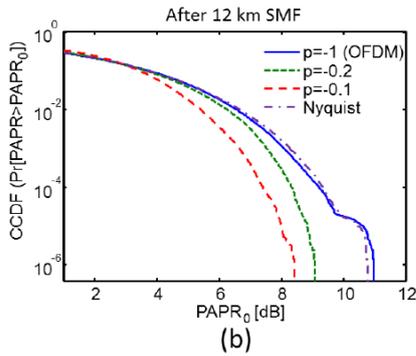


図3 PAPRを指標にしたマルチキャリアの最適化：12km-SMF 伝送時の相補累積分布関数(CCDF)と PAPR とキャリアパラメータ p の関係

ムと比較することにより、数値計算上で、約40% (2dB) 以上の低消費電力化を実現できることを確認、当初の目標を越える低減効果を確認した。

FrFFT に基づく新規な直交基底多重化技術である光 Fr-OFDM の送受信方式を提案し、その原理の実証を行った。また、FrOFDM のキャリア間のクロストーク分析として、 Q 値とコンスタレーションマップを使った信号品質評価を行い、伝送路においてより直交性を維持可能な最適化を目指したマルチキャリアの設計を行った。検討には、欧州側との連携を強化し行った。図4に全長1100kmで110kmごとにEDFAで損失補償が行われる伝送路を想定し、分散補償の間隔を変えて Q 値による信号品質計算を行なった結果の一部を示す。分散の間隔が変化すると Q 値が高くなるパラメータ p の値が変化していることがわかる。

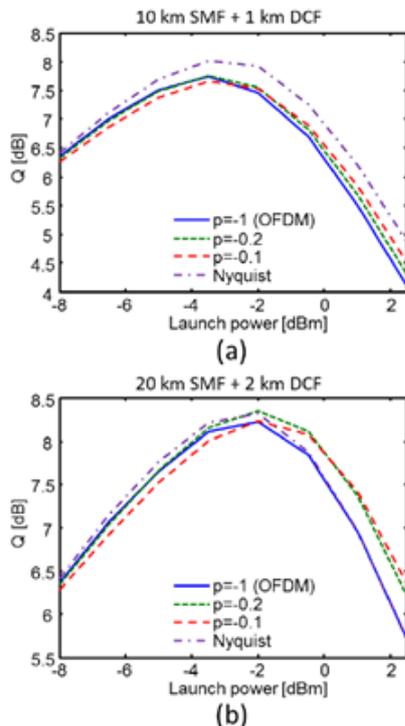


図4 分散補償間隔による信号品質:(a)10km,(b)20km.

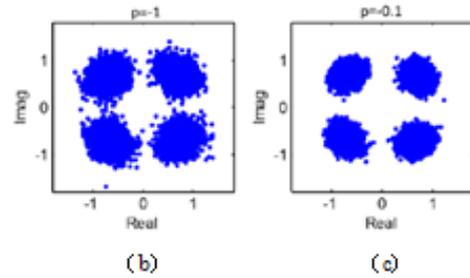


図5 最適なマルチキャリアの選択のためのクロストーク分析 QPSK 受信信号のコンスタレーションマップ (b) $p=1$, (c) $p=0.1$

また、FrOFDMによるPAPRを指標とした非線形光学効果由来のクロストークの低減効果の最適化について、シミュレーションによりその指針を確認した。図5に20 km SMF ごとに2 km DCFで分散補償される場合の、入力光パワー2.5 dBmにおける $p=1$ と $p=0.1$ で受信したQPSK信号のコンスタレーションマップを示す。 $p=1$ と比較して $p=0.1$ では4つの信号のばらつきが大幅に低減されている。この結果より伝送中にPAPRが低くなるようなFrFFTの p を選択することでクロストーク低減効果を最適化方針の確立に成功した。

【サブシステムの研究開発】実際に設計・試作するサブシステムにおいて正常にFr-FFTに基づくサブキャリアとクロストーク分析に基づくその最適化を具現化する光回

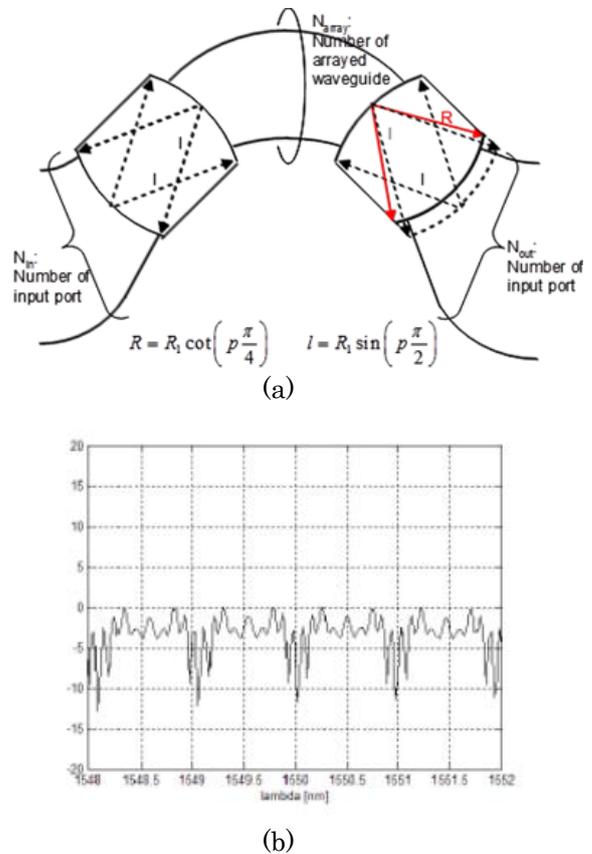


図6 (a)光Fr-FFT回路原理図、(b)変調されたスペクトルの設計計算結果

路の設計・試作を行った。図 6 に設計用の光回路のレイアウトと設計光回路の出力スペクトルの計算結果を示す。スペクトルから試作した Fr-FFT サブシステムの入出力特性を検証することにより、時間領域と周波数領域の中間領域を分波領域に使用している Fr-FFT の特徴を正しく有していることを確認した。欧州側との連携を通して、これまでの設計要件に加え、エラスティックネットワークにおける自由度を考慮し、周波数分割多重-時間分割多重変換の要素を加えることとした。サブシステムの設計・試作の観点からは、周波数分割多重-時間分割多重変換の要素を含めることは、パラメータ p の値の変更と等価であるため大きな変更とはならないと判断した。今回設計・試作した Fr-FFT サブシステムでは、周波数分割多重-時間分割多重変換の要素も含めるために、JGN-X の特性を考慮して p の値を 0.0592 に設定した。図 7 に FrFFT(Tx) デバイスの動作シミュレーション結果を示す。このシミュレーションでは試作デバイスと対応するよう、 $p=0.0529$ 、パルスシーケンス数 (アレイ導波路数) 12、遅延時間 100ps とした。パルス波形のシミュレーションにおいては、波長 1550nm において分散値 (D) -103.97ps/nm を有する分散補償ファイバを伝達させた。なお、これらの値は実験における実際の値となっている。また、分散を通した後の波形はパルス間隔 100ps、パルス幅 8.4ps である sinc 関数列形状の波形となった。また、異なる出力ポートの伝達関数は従来の OFDM の場合同様、時間差分シフトした性質をもつ。

本研究課題では、PAPR について 2dB の低減目標を上げているので、 p の値を 0.0592 に設定することは、この目標とも齟齬がないことを確認し、実際の設計・試作に進んだ。図 8 に試作した FFT サブシステムおよび Fr-FFT サブシステムの概観を示す。

次に、FrFFT(Tx)の動作検証結果について述べる。光源には繰り返し周波数 9.95328Ghz、パルス幅 3ps であるモードロックレーザーダイオード (MLLD) を用い、LN 強度変調器 (LN-IM) によりパルス間隔を 1.6ps とした。このパルス列を FrFFT-AWG デバイスのポート 6 に入力した。次に、65GHz のサンプリングレートを有するオシロスコープにより、通常の光ファイバ (SMF) と分散補償

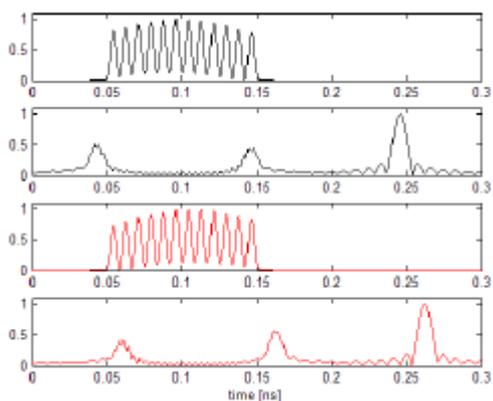
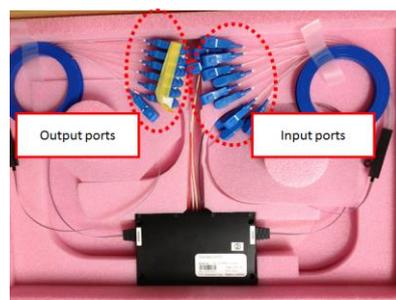
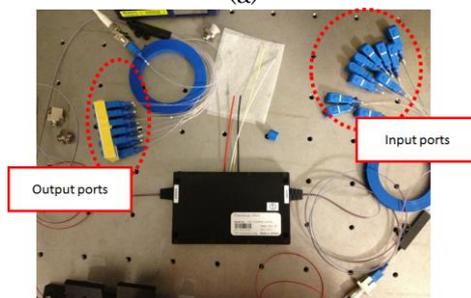


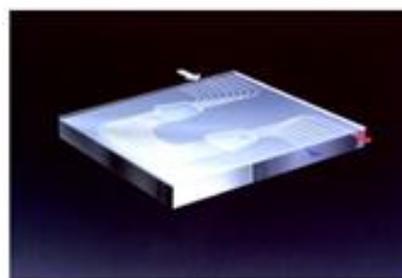
図 7 Fr-OFDM から N-OTDM 方式への変換のシミュレーション結果



(a)



(b)



(c)

図 8 試作サブシステムと設計 : (a)比較用 FFT サブシステム、(b)Fr-FFT サブシステム、(c) PLC 回路の概観図

ファイバ (DCF) の伝送前後のパルス波形を観測した。SMF と DCF の組み合わせを変えることにより、伝送路とし総分散量を $D=-88.14, -103.97, -118.0\text{ps/nm}$ とした。図 9 より、100ps 間隔、パルス幅約 10ps の 7 個のパルス列が観測された。これらのパルス列は MLLD で発生した入力パルスの時間領域の FT となっている。実験結果はシミュレーション結果と非常に良い一致を示しており、タイムレンズ効果とパルス圧縮を実証できた。同じ実験系を用いて、異なるサブキャリア間のパルス遅延時間を評価した。MLLD のパルス列を二つに分岐し、一方を FrFFT(Tx)のポート 6 に入力し、もう一方を他ポートに順次入力した。二つの入力されたパルス列は同期状態とし、遅延時間は設けない。パルス波形は FrFFT(Tx)の出力ポート 1 にて観測した。100ps のシンボル列にてチャープ特性 (QPM) を有することがわかった。

図 10 に分散量 $D=-103.97\text{ps/nm}$ である伝送路伝達後の波形を示す。図 10 より、8.4ps のパルス間隔を確認できた。これは遅延量 100ps、アレイ導波路本数 12 本より 100/12 と一致した結果となっている。

以上の実験結果より、試作した AWG デバイスは FrFFT

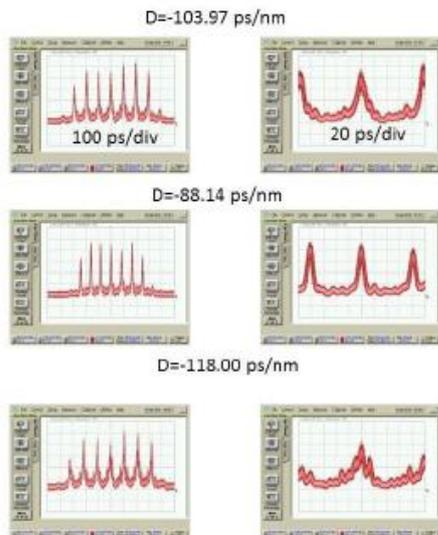


図9 分散補償ファイバ伝送前後のFrFFT-OFDMサブキャリア波形

によりOFDM-OTDM変換を行うFrFFTコーディング動作を実現できることがわかった。これは、デバイスに新たに導入したMMIカブラが設計通りタイムレンズ機能、FrFFT機能を実現できていることによる。

目標値として消費電力低減化だけでなく光部品の低廉化の可能性の検討必要性が指摘された点を考慮し、今回作製したFr-FFTサブシステムは波長多重通信におけるAWGと同様な回路要素（スラブ導波路/アレイ導波路）から構成される。PLC技術を用いたAWGは波長多重方式において世界中で使用される実績があり、これは、空間光学系を用いた合分波器に比べ量産性に優れ、その結果、低価格をサブシステム性能に関して、Fr-FFTサブシステムはAWGに比べアレイ導波路の数が少ないことからアレイ導波路間の遅延量はAWGに比べより精密に設定されなければならない。したがって、Fr-FFTサブシステムもAWG同様量産化による低価格化が期待できる。

また、PLC技術では光導波路を石英系ガラスで構成しており、石英系ガラスが屈折率の安定性に優れることから、コヒーレント通信の受信系に用いられる90度光ハイブリッド製品で実現しているように光位相の90°に対して±5

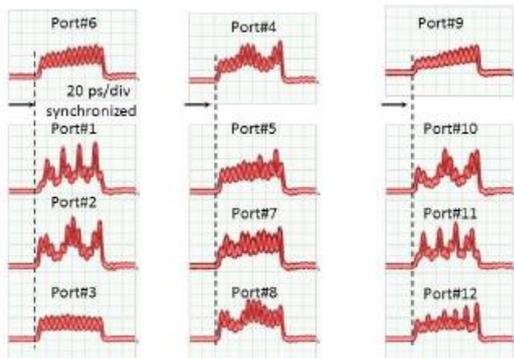


図10 分散補償ファイバ伝送後のFrFFT-OFDMサブキャリアの各波形

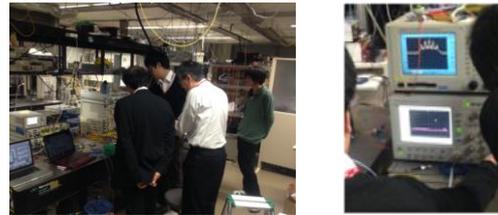


図11 “JGN-X”テストベッド試験状況

度の遅延量を精密に量産することが可能である。従って、アレイ導波路本数の少ないFr-FFTサブシステムであっても量産時に高い符号化性能を出すことが可能と考えられる。以上より、今回提案するFr-FFTは将来の量産化/低価格化が見込めるサブシステム構成であり、ビジネス化においてはAWG、90度光ハイブリッドに次いで将来の光通信のキーサブシステムとして期待される。

クロストーク分析に基づく最適なマルチキャリアによる光OFDM技術の研究結果を具現化する技術として、最終的により安定して高い性能が得られたサブシステムを用いた“JGN-X”の環境での実証・検証を行い(図11)、硬判定の誤り訂正技術を前提としたDPSK信号の89.2kmのエラーフリー伝送に成功した。確立した送受信方式を具現化する集積化サブシステムを実現するため、欧州と連携して設計を行い、送信側(Tx)及び受信側(Rx)でサブシステムの試作を行った。

【テストベッドによる試験】試作PLCデバイスを用いたN-OTDM変換の実験結果(図12)が示すように、ナイキストパルス生成の正確な動作確認に成功した。N-OTDM変換実験以外の“JGN-X”における実際の試験については、様々なパラメータ調整を伴うために固定化されたPLCデバイスではなくより自由度の高いパルス整形器を用いて実験を行った。参画四機関がインターネット会議等も併用しながら連携し提案・検討したFrFFTに基づく新規な直交基底多重化技術の送受信方式について、往復89.2kmの“JGN-X”の伝送による実用試験を情報通信研究機構の支援を受けて参画機関で共同して実施した。FrOFDM送信→N-OTDM受信実験では、試作したAWGデバイスをFrOFDM送信側に用いて試験に成功した。また、FrOFDM送受信試験実験においては、パルス整形を用いた最適化を施すことにより全受信信号のエラーフリー伝送を確認し、提案方式を実用化検討の段階まで進めることに成功した。“JGN-X”伝送実験の系を図13(a)に示す。図13(b)に、データの判別可能性の指標であるアイパタ

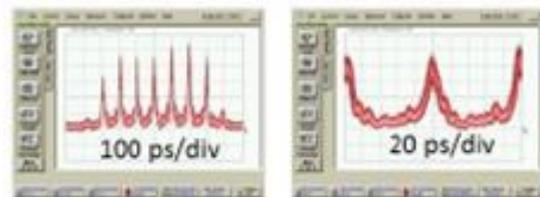


図12 N-OTDM変換結果

ーンを示す。

図13 (b) より、全ポートでの受信信号のアイパターンの中心が開いており、データの正確な判別が可能であることを確認した。また、図13 (c) に、データ判別の誤りの割合を表す符号誤り率 (BER: Bit-Error Rate) による評価結果を示す。前方誤り符号訂正 (FEC: Forward Error Correction) による硬判定でのエラーフリー伝送が可能な $BER=2 \times 10^{-3}$ を、全受信信号で大きく下回って達成していることがわかる。以上の結果より、提案した多重化伝送技術は実用環境下においてエラーフリー伝送が可能なことを確認した。

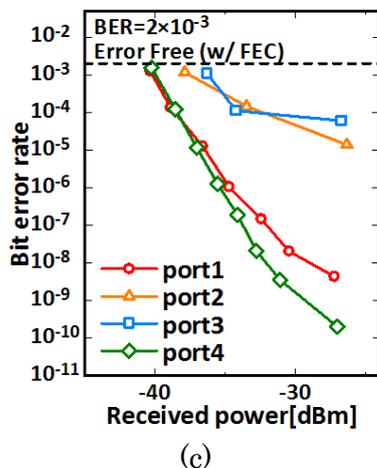
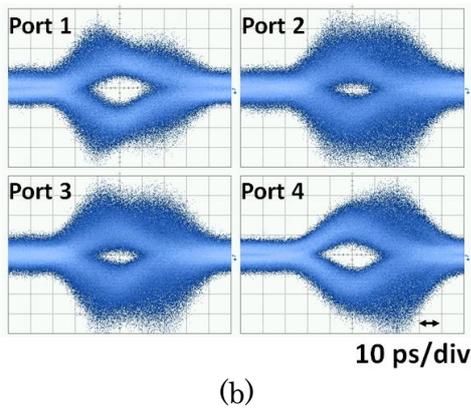
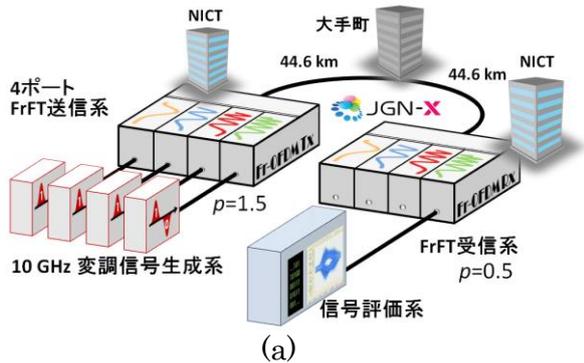


図 13 新世代通信網テストベッド JGN-X 伝送実験：(a) 実験系、(b) 受信信号のアイパターン、(c) ビットエラーレート測定結果

【A/D変換の光化】 A/D変換サブシステムの光化については、光Fr-OFDM伝送方式の品質および性能向上に重要となるが、安定化にはさらなる集積化が必要となると判断したため、個々の技術の性能向上に注力した。

図14に本研究で対象とした光A/D変換サブシステムの原理図を示す。光ADCでは、低時間ジッタ特性を持つ光パルス列を高繰り返し発振することが可能なモード同期レーザを光標本化用の信号源として用いる。強度変調器に入力された入力アナログ信号は、モード同期レーザから発振される光パルス列の各光パルスの変調強度として標本化される。次に、各光パルスが高非線形ファイバを通ることにより強度-波長変換され、光量子化が実現される。最後に、波長分散デバイスを用いた波長分散を行い、予め設計した符号化伝達関数を波長領域で掛けあわせることで、光符号化を実現する。波長分散デバイスから出力された符号化光パルスに対して、閾値処理を行うことで、デジタル信号を得ることができる。

研究開発では、システムの広帯域実信号を用いたデモンストレーションを中心とした完全一連動作実験を行った。また従来比で2dB以下の消費電力低減効果を実現する技術の確立にも成功した。さらに、全光A/D変換用インターリーブ技術として、構成の簡易化・消費電力低減の観点からインターリーブの設置方式ならびにゲート方式を検討した。特に、光ゲート方式として電気制御・光制御それぞれを検討した。電気制御方式としては、入力信号のサンプリング用パルス発生のために一定周波数の信号発生器を用いるため、10GHz正弦波信号から5GHz分周信号をDEMUX回路で生成後、LiNbO₃光スイッチを制御することで1入力2出力のインターリーブを対象とした。電気制御によるインターリーブ方式と、ソリトン自己周波数シフトを用いた短光パルス生成(光強度による中心周波数シフトも模擬)を連動させ、10Gbps繰り返しのパルス幅2.5ps信号を5Gbpsの二並列信号を生成することができた(図15)。最終的には、40GHz繰り返し信号の20Gbpsの二並列の1:2インターリーブ動作の検討を行った。また光量子化器の入力強度の変化に対して中心周波数の変化した信

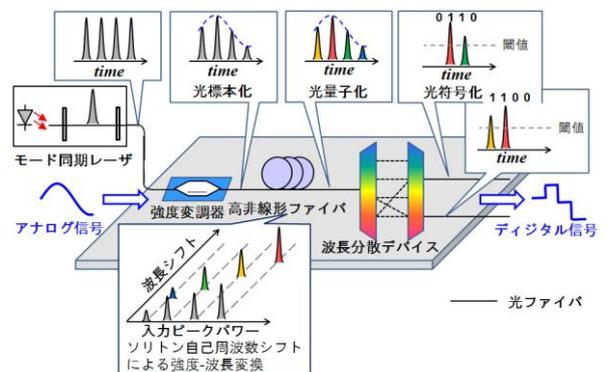


図 14 対象とする光 A/D 変換サブシステムの原理図

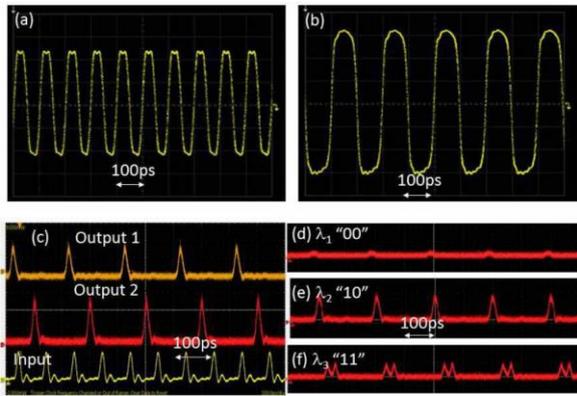


図 15 光インターリーバと光量子化・光符号化部分の接続実験結果: (a) クロック信号, (b) ハーフフレームクロック出力, (c) 入出力光波形, (d) 符号化後 λ_1 “00”, (e) 符号化後 λ_2 “10”, (f) 符号化後 λ_3 “11”

号 (波長差にして1.4nm) に対して、インターリーバ出力信号から符号化ができることも確認した (図15)。さらに、

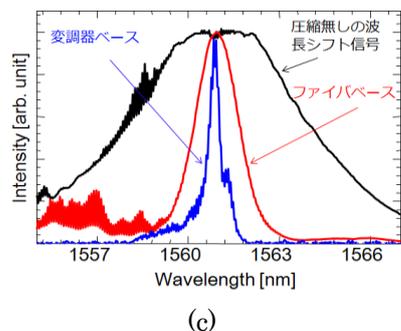
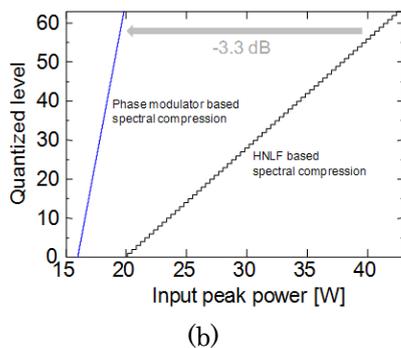
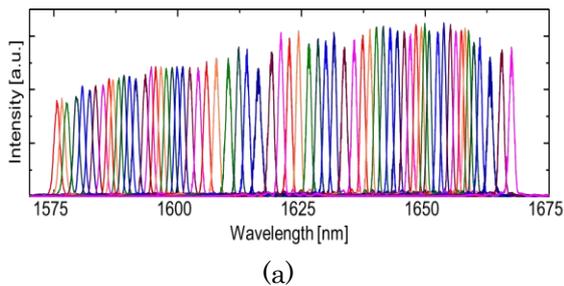


図 16 光量子化の低消費電力化: (a) 自己周波数シフトの実験例 (6 ビット) (b) スペクトル圧縮による伝達関数、(c) スペクトル圧縮比較実験結果

光サンプリングと光量子化部の接続確認実験も行い、基本動作の確認に成功した。

さらに、スペクトル圧縮技術を中心とする分解能向上技術の検討も進めた。本研究課題で検討している光量子化の手法は同じ分解能で比較すると、スペクトル圧縮比が大きい程、自己周波数シフトの最大シフト量を減らすことが可能なため、高い圧縮比をもつスペクトル圧縮技術を用いることにより低消費電力化が可能である。評価のために、スペクトル圧縮率毎の伝達関数 (図 16 (b)) とスペクトル圧縮比較実験結果 (図 16(c)) を示す。図 16(b)より、従来の手法では 19.91 W~42.59 W までの入力光パルスのピークパワーが必要であるのに対し、スペクトル圧縮技術を用いることにより 16.0 W~19.78 W で処理が実現できるため、約 3.3 dB の入力光パルスのピークパワーの削減が実現可能であることを確認した。以上の結果より、光量子化に位相変調器内スペクトル圧縮を導入することにより、分解能向上だけでなく、従来の方法に比較して必要な帯域を 3 倍以下に圧縮できたことは、理想的には増幅器などの消費電力を 5dB 以下に低減したことに等価であり、実際の計算結果においても約 3.3 dB 以上の低消費電力化が期待できることが確認され、2dB 以下とした目標値以上の成果を得た。図 15 (b)から、スペクトル圧縮の手法を用いることで、約 3.3 dB の入力パワーの削減が実現可能であることを確認した。これらの結果より、光量子化に位相変調器内スペクトル圧縮を導入することにより、分解能向上だけでなく、低消費電力にも貢献できることを確認した。この結果より、ファイバベースの従来の方法と比較して約 3.4 倍の圧縮率向上が実現され、目標である 2dB 以上の消費電力低減に相当する目標達成に十分な性能の確認に成功し

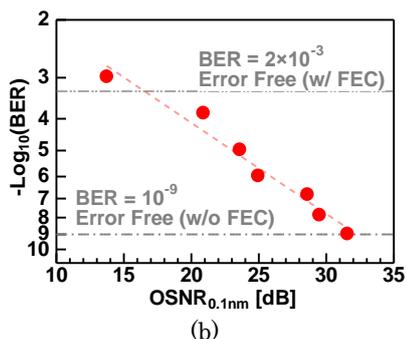
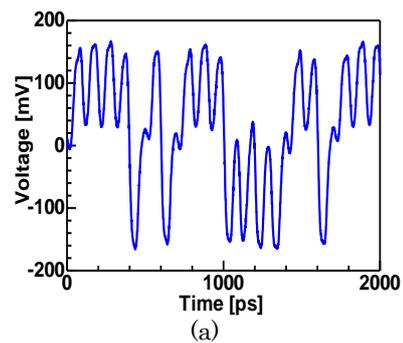


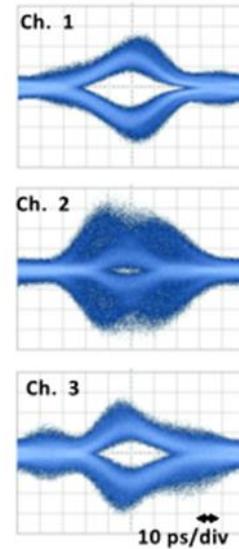
図 17 DPSK 信号の A/D 変換実験結果: (a) DPSK 信号, (b) 光 A/D 変換後の BER 測定結果

た。また、光 A/D 変換サブシステムの今後の課題として抽出された集積化による安定化について、Si 細線導波路による更なる高速化・小型化についても検討を進めた。

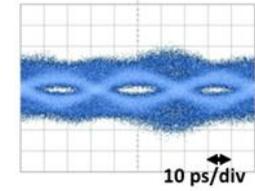
さらに、光 A/D 変換への実信号入力の場合として、現在の光通信システムで用いられている光パルスの位相に情報を付加する位相変調信号の変換を検討した。位相変調信号の一種である DPSK 信号に対する光 A/D 変換の BER 測定による動作信頼性の確認を行った (図 17)。信頼性の高い基準となる $BER = 10^{-9}$ を達成し、これまでに報告例のない量子化ビット数 3bit、サンプリングレート 10GSps の DPSK 信号に対する光 A/D 変換の動作を確認した。さらに、全光 A/D 変換技術として、非線形現象への依存度を極力低減することにより、さらに低消費電力化が可能な新しいアプローチを創出し、特許出願を行った。

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

現在、主要な国際会議において多重化技術の柔軟性に関する国際的な議論の枠組み形成が活発化している。特に今回取り上げた光 OFDM 方式と光 N-OTDM 方式の間の交換技術は、震災などによるネットワークの状態の変化に応じて多重化方式を柔軟に使い分けていくための重要な機能と考えられており、国民生活や社会経済の安全性・信頼性の向上等に直結する技術として位置付けられる。本研究開発で得られた成果は、まさにこの中核を担う技術の一つと評価されており、本研究期間終了後も、各種国際会議からの招待講演の依頼を受けている。今後も本研究開発で得られた成果の展開を進めるべく、参画機関の連携を継続しており、既に新しい成果の創出も得られている。本研究課題で開発された Fr-OFDM 技術を介することにより、光 OFDM 方式と光 N-OTDM 方式の間の交換技術を提案していく予定である。図 19 にその基本機能の実験結果を示す。光 Fr-OFDM の 3 つの異なるサブキャリアを用いて伝送された信号を光 OFDM 方式 (図 19(a)) と光 N-OTDM 方式 (図 19(b)) のそれぞれ異なる方式で受信した結果である。それぞれの方式で 3 つの信号が正しく受信されていることが確認できる。これまで提案されている光 OFDM



(a)



(b)

図 19 光 OFDM—光 N-OTDM 方式の間の交換技術の実験結果:(a) 光 OFDM 方式による 3 つのサブキャリアの受信結果, (b) 光 N-OTDM 方式による 3 つのサブキャリアの受信結果。

方式と光 N-OTDM 方式の間の交換技術が、消費電力の高い非線形光学効果の使用を前提としているのと比較して、光 FFT 回路による信号処理により実現可能な交換技術は、消費電力削減においても非常に有望であり、今後、得られた成果と国際的な連携の更なる効果的な展開を図っていく計画である。

今回研究開発を行った Fr-OFDM 方式に用いる送受信サブシステムは、分散補償機能を付与することが可能である。図 20 に Fr-OFDM 方式による時間一周波数面での信号分布の回転と分散による回転の比較を示す。図 20 (a) の OFDM サブキャリアの時間一周波数分布の例と図 20 (b) の Fr-OFDM サブキャリアの時間一周波数分布の例を比較すると、分布に傾きが生じていることがわかる。Fr-OFDM では、その原理から時間一周波数面での信号の回転変換機能を持っている。また、図 20 (c) の光パルスの時間一周波数分布の例と図 20 (d) の分散の影響を受けた光パルスの時間一周波数分布の例を比較すると信号の分布が同様の傾きを持って回転していることが分かる。このように Fr-OFDM における信号の時間一周波数分布回転機能は、分散との等価性を示唆するものであり、実際に光 FR-FFT 回路は、分散による光パルスの時間幅の伸長を補償する一種の潜在的な分散補償機能を持つ。そこで、今後、サブキャリアの設定と同時に分散補償機能を併せ持

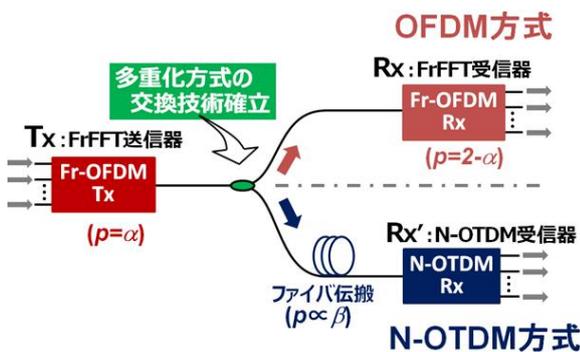


図 18 光 OFDM—光 N-OTDM 方式の間の交換技術

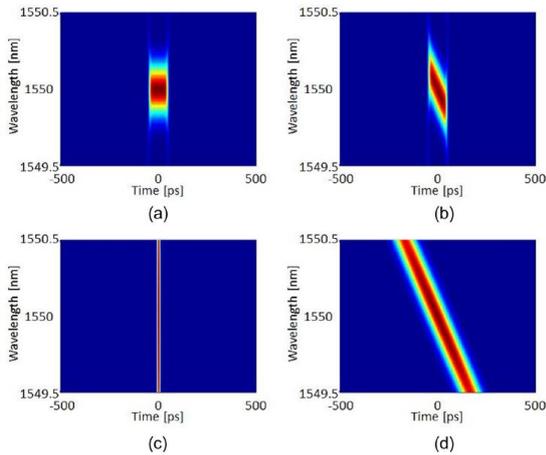


図 20 Fr-OFDM 方式による時間一周波数面での信号分布の回転と分散による回転の比較：(a) OFDM サブキャリアの時間一周波数分布の例、(b) Fr-OFDM サブキャリアの時間一周波数分布の例、(c) 光パルスの時間一周波数分布の例、(d) 分散の影響を受けた光パルスの時間一周波数分布の例。

つ受信器の開発への展開も検討する。

特許戦略およびビジネス展開の積極的な推進を目指して、既有特許全般に対して本研究開発の成果を契機にその活用意義を積極的に広報し、国際特許化を推進することによる周辺派生技術からの展開をはかっている。特に、光 Fr-OFDM 方式や光 N-OFDM 方式の研究開発には、フラクショナルパラメータに正確に対応したサブキャリアが生成されていないと、クロストークを軽減する特徴が軽減されるなど、信号光パルスの波形の状態把握が重要となる。さらに前述の分散補償機能等の効果の検証にも光パルス波形の状態把握が重要となる。また、光 A/D 変換においても、ソリトン状態を用いた信号処理を利用しているために、用いるサンプリングパルスの波形の状態把握が重要となる。そこで、図 18 に示すように、光信号のモニタリング技術について企業とのライセンス契約と商品化に成功し、2015 年 3 月の OFC2015 に併催の国際展示会に於いてリリースされた。今後、白書 (ITU-D) などを通じた計測器における標準化の推進も検討している。



図 19 光信号モニタリング技術の商品化 (於 OFC2015 国際展示会)

4. むすび

継続的な伝送容量拡大と低消費電力化への要求に応えるための伝送技術と光サブシステム技術の革新技術として、クロストーク分析に基づき最適化が可能な自由度の高いフラクショナルフーリエ変換を用いた多重化伝送方式を開発することにより、低消費電力化に直結するピーク対平均パワー比 (PAPR) について約 40% (2dB) 以上の低減化が可能なサブキャリアの効果を確認した。“JGN-X”の環境での実証・検証を行い、硬判定の誤り訂正技術を前提とした差動位相変調 (DPSK) 信号の 89.2 km のエラーフリー伝送に成功した。さらに、デジタルコヒーレント技術による信号の復調時の負荷と直結するフロントエンド処理として必要不可欠なアナログ/デジタル変換の性能向上を検討した。また、特許戦略とそのビジネス展開について、特許群に含まれる特許全般に対して本研究開発の成果を契機に周辺派生技術からの展開を積極的にはかり、光信号のモニタリング技術について企業とのライセンス契約と商品化に成功した。

参考文献

- [1] 盛岡 敏夫、神野 正彦、高良 秀彦、久保田 寛和、"将来の革新的光トランスポートネットワーク技術、" NIT 技術ジャーナル pp.32-36 (2011.3).
- [2] M. Jinno, et. al., "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," Communications Magazine IEEE, Vol.47, Issue: 11, pp.66 - 73(2009).
- [3] W. Shieh, et. al., "Coherent optical OFDM: theory and design," Opt. Express, vol. 16, no. 2, pp. 841-859, 2008.
- [4] S.L. Jansen, et. al., "Coherent Optical 25.8-Gb/s OFDM Transmission Over 4160-km SSMF," J. Lightw. Technol., vol. 26, no. 1, pp. 6-15, 2008.
- [5] H. Sanjoh et al., "Optical orthogonal frequency division multiplexing using frequency/time domain filtering for high Spectral efficiency up to 1 bit/s/Hz," Proc. OFC'02, ThD1, 2002.
- [6] A.J. Lowery, "Design of arrayed-waveguide grating routers for use as optical OFDM demultiplexers," Opt. Express, vol. 18, no. 13, pp. 14129-14143, 2010.
- [7] K. Takiguchi, et. al., "Integrated-optic demultiplexers for optical OFDM signals," OFC'11, OWM4, 2011.
- [8] S. Shimizu, et. al., "Demonstration and performance investigation of all-optical OFDM systems based on arrayed waveguide gratings," Opt. Express, vol. 20, no. 26, pp. B525-B534, 2012.
- [9] J.K.K. Rhee, et. al., "Optical orthogonal frequency division multiplexed transmission using all-optical discrete Fourier transform," Laser Photon. Rev., vol. 7, no. 4, pp. 539-553, 2013.
- [10] D. Hillerkuss, et. al., "26 Tbit s⁻¹ line-rate super-channel transmission utilizing all-optical fast Fourier transform processing," Nature Photonics, vol.5, pp364, 2011.

【誌上发表リスト】

- [1] Takuya Murakawa, Gabriella Cincotti, Satoshi Shimizu, Tomotaka Nagashima, Makoto Hasegawa, Kunihiro Hattori, Masayuki Okuno, Shinji Mino, Akira Himeno, Naoya Wada, Hiroyuki Uenohara, and Tsuyoshi Konishi, "Fractional OFDM based Transmitter and Receiver for Time/Frequency

Multiplexing in Gridless, Elastic Networks,” Optical Fiber Communication Conference (Los Angeles, California United States) (March 22-26 2015).

- [2] Gabriella Cincotti, Satoshi Shimizu, Takuya Murakawa, Takahiro Kodama, Kunihiro Hattori, Masayuki Okuno, Shinji Mino, Akira Himeno, Tomotaka Nagashima, Makoto Hasegawa, Naoya Wada, Hiroyuki Uenohara, and Tsuyoshi Konishi, “Flexible Power-efficient Nyquist-OTDM transmitter, using a WSS and time-lens effect,” Optical Fiber Communication Conference (Los Angeles, California United States) (March 22-26 2015).
- [3] T. Konishi, T. Murakawa, T. Nagashima, M. Hasegawa, S. Shimizu, K. Hattori, M. Okuno, S. Mino, A. Himeno, H. Uenohara, N. Wada, G. Cincotti, “Flexible OFDM-based access systems with intrinsic function of chromatic dispersion compensation,” Optical Fiber Technology, (in press).

【申請特許リスト】

- [1] 小西毅、光波長測定方法および光波長測定装置、日本、平成 25 年 3 月申請。
- [2] 小西毅他、スペクトル圧縮装置、光アナログ/デジタル変換システム、およびスペクトル圧縮方法、日本、平成 25 年 10 月。
- [3] 小西毅他、光波長測定方法および光波長測定装置、米国、平成 25 年 12 月。

【登録特許リスト】

- [1] 小西毅他、光物性定数計測方法および光物性定数推定装置、国際特許 WO2014/112020、2014/7/24
- [2] 小西毅他、光物性定数計測方法および光物性定数推定装置、国際特許 WO2014/141666、2014/9/18

【受賞リスト】

- [1] T. Satoh, T. Nagashima, K. Itoh and T. Konishi, IEEE CLEO-PR & OECC/PS 2013 Best Paper Awards, “Power-Saving Approach Toward 7-bit Optical Quantization for Photonic Analog-to-Digital Conversion”, 2013 年 07 月 04 日
- [2] 永島知貴、フォトリックネットワーク若手研究者賞、“光フラクショナル OFDM 方式におけるピーク強度対平均強度比の低減効果についての評価”、2015 年 3 月 18 日。
- [3] 小西毅、平成 26 年度大阪大学総長顕彰 研究部門

【報道掲載リスト】

- [1] “通信速度 2 倍に 変換技術改良”、日本経済新聞、2013 年 07 月 02 日 16 面。
- [2] “パルス光の質簡単検査 通信やレーザー 持ち運べる装置 阪大などが開発”、日経産業新聞、2015 年 04 月 23 日 10 面。
- [3] “光パルスの形状計測 阪大が装置 大容量通信を円滑化”、日刊工業新聞、2015 年 04 月 27 日 15 面

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www-photonics.mls.eng.osaka-u.ac.jp/>