

## 科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：1 4 4 0 1

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：2 3 6 5 6 2 5 4

研究課題名（和文） 光A/D変換における自己周波数シフトを用いた光量子化の6ビット化

研究課題名（英文） 6bit upgrade Optical Quantization for Photonic Analog-to-Digital Conversion using Self-frequency shift

## 研究代表者

小西 毅 (KONISHI TSUYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：9 0 2 8 3 7 2 0

研究成果の概要（和文）：自己周波数シフトを用いた光量子化の研究において、6ビットの分解能を目指した性能改善を目指した。自己周波数シフト現象の安定化の物理的な限界に対して、デバイスや現象依存の性能限界を打破するために、自己周波数シフト現象の安定化と併用可能なシステム構成方法の検討による解決を図った。その結果、目標値である光量子化の6ビット化に成功し、更に量子化誤差の低減への展開にも成功した。

研究成果の概要（英文）：The performance improvement toward 6-bit resolution was investigated for optical quantization using a self-frequency shift. In order to breakthrough performance limitations due to devices and physical phenomena, a different approach form system configuration viewpoint was examined in cooperation with stabilization of a self-frequency shift phenomenon. Consequently, reduction of a quantization error as well as 6bit optical quantization was succeeded.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,700,000	810,000	3,510,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 ・ 通信・ネットワーク工学

キーワード：信号処理, 光アナログ/デジタル変換

## 1. 研究開始当初の背景

光通信における多値信号の復調をはじめ衛星通信、リモートセンシング等の超高速・超広帯域な信号を扱う分野では、原信号と計測・処理間のインターフェースとして超高速A/D変換が必要不可欠である。A/D変換における電氣的な性能限界を解決するために、現在、A/D変換の光化が精力的に検討されている。[例えば、G. C. Valley, Opt. Express, 15, 1955 (2006)] A/D変換の主要な処理であるサンプリング、量子化、符号化のうち、特にサンプリングについては、既に光サンプリング技術が光計測機器の中に導入されてきている。そこで、光サンプリングの次に必要となる光量子化の高性能化が急務となる。研究代表者は、光サンプリング以降の光量子

化、光符号化までの一連の処理についての世界のトップレコードとなる4ビットの実証実験に成功している。[T. Nishitani, et al., IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron., 14, 724 (2008)] 光量子化のみの単一動作では、5ビットの分解能が世界のトップレコードである。[Y. Miyoshi, et al., Journal of Lightwave Technology, 28, 415 (2010)] そこで、6ビットの光量子化という本研究の目標が実現されれば世界のトップレコードを更新することとなり、光A/D変換の実現の前進に大きく寄与する研究と位置付けられる。現在、光量子化実現の試みでは、光ファイバや光スイッチなどの用いる光デバイスの入出力特性をそのまま活かしたアプローチが一般的である。一方、研究代表

者は、光サンプリング以降の一連の処理を統合して検討する過程で、自己周波数シフトという物理現象の光量子化における性能限界に対して、後段の光符号化と親和性の高いデュアルレール化というシステム構成による解決法を導入して、デバイスによる性能限界の打破を試みる本研究の着想に至った。応募者は、入力光強度に依存して周波数がシフトする光ファイバ内自己周波数シフトとスペクトル圧縮を用いた独自の光量子化方法による光A/D変換の研究をこれまで進めてきた。本研究では、この研究成果を発展させ、世界初の6ビットの光量子化の実現を目指した。

## 2. 研究の目的

本研究では、6ビットの光量子化の実現を目指し、これまでに提案してきている光量子化方法におけるさらなる高分解能化を目的とした。具体的には、次の二つの目標を掲げた。

- ・単一高非線形光ファイバを仮想的にデュアルレール化した自己周波数シフトの実現
- ・デュアルレール化の方法による6ビット光量子化の実現

本研究では、光量子化の性能限界の打破を試みるために、図1に示すように、これまで主流であったデバイスや物理現象の性能向上によるアプローチではなく、システム構成法による解決手法を新しく導入し、また、具体的な方法を提案し実証することをもう一つの目的とした。その有効性を実証する上で、高いチャレンジ性が必要であり、世界的に未踏の6ビットの光量子化を目指した。

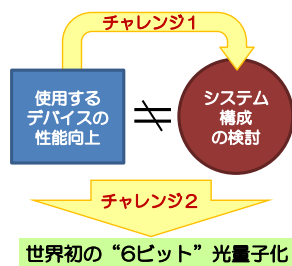


図1 本研究の目的とそのチャレンジ点

## 3. 研究の方法

(1)本研究は、応募者の提案する自己周波数シフトとスペクトル圧縮に基づく独自の光量子化方法の発展を目指す提案である。図2に自己周波数シフトによる光量子化の入出力特性の実験結果を示す。非常に広いダイナミックレンジと高い分解能を実現可能な潜

在能力を持つことが分かる。本研究では、入出力特性の一部に異なる傾きを持つ領域が存在することによる分解能低下の課題を解決し、本来の潜在能力を最大限に活用することによる新しい原理の発展を目指す。

提案する自己周波数シフトとスペクトル圧縮に基づく光量子化においては、入力強度を波長シフトに変換する際の入出力特性の一部に異なる傾きを持つ特性を示す領域の存在(図2参照)が、高分解能化の問題となっていた。

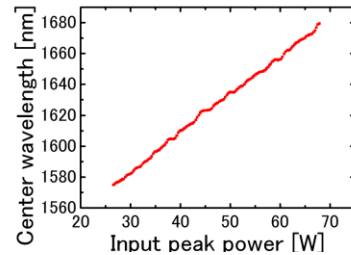


図2 自己周波数シフトによる光量子化の入出力特性

そこで、同じ光ファイバを双方向に用いたデュアルレール化の導入により、光ファイバをモノレールの使用した場合に問題の生じる入力強度領域について、全く同じ入出力特性を持つデュアルレール間でお互いに補完させ合うことにより、仮想的に全強度領域で同じ傾きを持つ入出力特性を実現し、課題を克服する斬新な方法論の提案を行った。(図3参照)

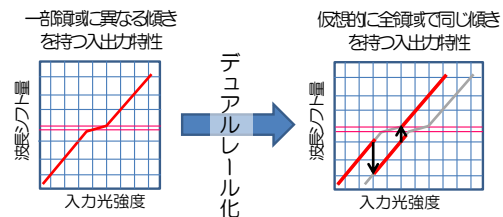


図3 デュアルレール化による課題の克服

自己周波数シフトを用いた光量子化では、単位強度レベルに対する周波数シフト量は、信号自身の持つ周波数帯域以上のシフト量が必要となる。[T. Konishi, et al., J. Opt. Soc. Am. B, 19, 2817(2002)] しかし、図3に示すように、実際には入出力特性の傾きは入力光強度の全領域で同じではない。特に入出力特性の傾きが極端に小さい領域では出力信号の周波数分解が不可能となるので、信号自身の周波数帯域以上のシフト量を得るのに隣接する強度レベルの差を大きくとる(間引く)必要があり分解能の低下を招く。(図4)このようなデバイスや現象依存の性能限界を打破するために、システム構成

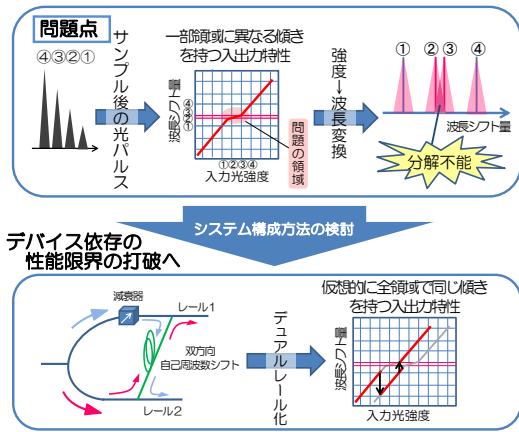


図4 研究のアプローチの概念図

方法の検討による解決を図る。具体的には、同一光ファイバへの双方向入射による自己周波数シフトの実験的な検討を通して、入力光強度の全領域で仮想的に同じ傾きを持つ自己周波数シフトの入出力特性の実現を試みた。(図4)

さらに、入力光強度の全領域で仮想的に同じ傾きを持つ自己周波数シフトの入出力特性をもとにデュアルレール間の連携をとることにより、図5に示すシステムを構成し、“6ビット”の光量子化を試みた。二つに分けた入力パルス的一方の強度を僅かに減衰させて強度シフトを与えた。その結果、一方のレールが問題のある強度領域にあるときに他方のレールが問題のない強度領域があるのでお互いに補完が可能となった。(図5)

デュアルレール間の連携をとるためには、自己周波数シフト後の出力に対する波長フィルタリングの最適化が必要となる。また、自己周波数シフト後の出力はガウス分布をしているため、光量子化の伝達関数の品質を確保するためにも自己周波数シフト後の出力に対する波長フィルタリングの最適化が必要となる。実際に得られる自己周波数シフトの入出力特性と光量子化の伝達関数をもとに波長フィルタリングの検討を通して、“6ビット”の光量子化を試みた。

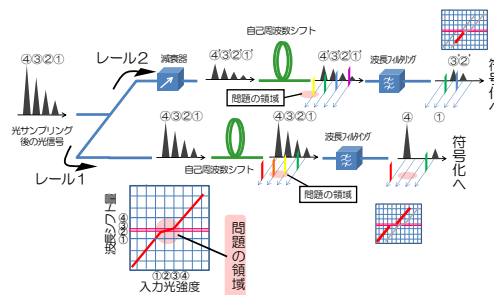


図5 デュアルレール光量子化概念図

#### 4. 研究成果

##### (1) シングルレール実験

デュアルレール光量子化を行う前に、シングルレールのみで調整を行い、最も良い条件でのデュアルレール光量子化の実現を試みた。図6にシングルレールでの実験システムの構成を示す。

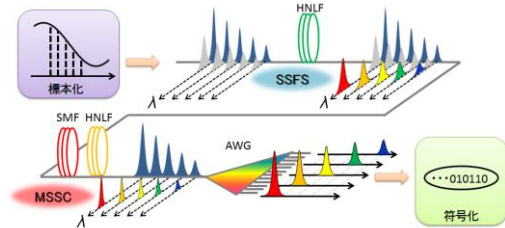


図6 シングルレール光量子化実験系

サンプリングされた入力アナログ信号がファイバー内を伝播すると、ソリトン自己周波数シフト (SSFS) によって入力強度に応じて中心波長がシフトする。波長シフトした信号を分散素子により波長ごとに分波することで、入力信号は強度ごとに異なるポートへ出力され、光量子化を実現できる。この際に、波長シフト信号のスペクトル幅を自己位相変調スペクトル圧縮 (SSC) を用いて狭くすることで、波長ごとに分波するときの分解能が向上する。SSC はファイバー内の異常分散によってパルスにダウンチャープを与え、次に別のファイバー内で SPM を誘起し、チャープ補償することで実現される。多段スペクトル圧縮 (MSSC) はこれを多段に用いたものである。

図7にシングルレール光量子化の実験系で得られた自己周波数シフトの結果を示す。各入力アナログ強度に対して64の異なる自己周波数シフト信号が得られており、6ビット光量子化に成功した。このように、本実験では、多段スペクトル圧縮 (MSSC) を新たに導入したことにより、デュアルレール光量子化を行う前段で6ビット光量子化を実現することができ、本研究課題の目標を達成することができた。しかし、入力アナログ強度を波長シフトに変換する際の入出力特性の一部に異なる傾きを持つ特性が以前存在しており、量子化の精度を表す微分非線形性誤差 (DNL) や

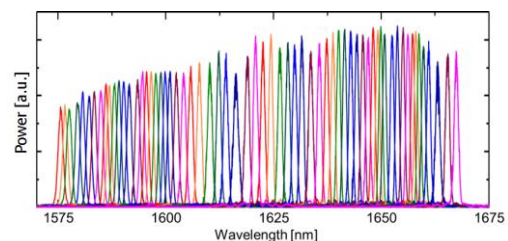
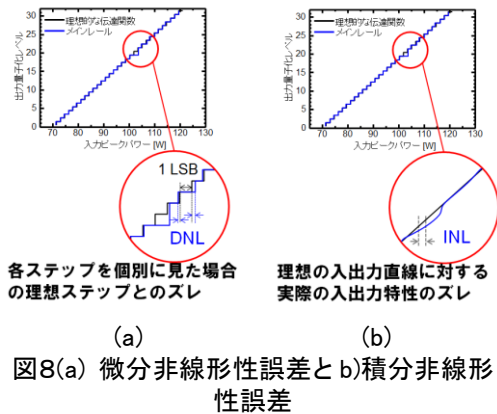


図7 6ビット用自己周波数シフト後の出力



積分非線形性誤差 (INL) に関して課題が残った。ここで、微分非線形性誤差 (DNL) は伝達関数の各ステップを個別に見た場合の理想ステップ 1LSB からのズレを表す。また、積分非線形性誤差 (INL) は伝達関数の各ステップの中点を結んだ理想の入出力直線に対する実際の入出力特性のズレを表す。(図 8)

## (2) デュアルレール化の検討

今回提案したデュアルレール化というシステム構成による解決法は、理想的な入力アナログ強度を波長シフトに変換する際の入出力特性からのずれの指標である微分非線形性誤差や積分非線形性誤差の改善に直接関係する。そこで、研究の方向を 6 ビット量子化の実現からさらに進めて、6 ビット量子化の実現とその量子化誤差の改善へと展開した。

図 9 に提案するデュアルレール全光量子化のシステム構成図を示す。図 7 の系と同様に強度-波長変換のためのソリトン自己周波数シフト (SSFS) と波長領域における分解能向上のための多段スペクトル圧縮 (MSSC) で構成され、量子化誤差改善のためのデュアルレールの手法が用いられている。サンプリング後の入力アナログ信号は二つに分けられ、それぞれ、異なる Main rail と Sub rail の経路を伝搬する。Main rail では信号は光サーキュレーター 1 (OC1) によって図面上向きに SSFS 生成用高非線形ファイバー (HNLF) を伝搬して、入力ピーク強度に応じて中心波長がシフトする。しかし、特定の入力ピーク強度範囲において波長シフト量に停滞が発生するため、量子化誤差の原因となる。そこで、波

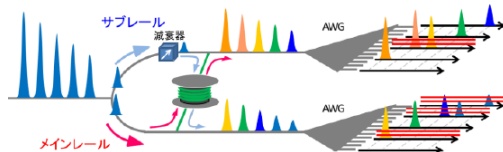


図9 デュアルレール光量子化の構成

長シフトの停滞する入力ピーク強度範囲の補償するために Sub rail の SSFS を利用する。

Sub rail では、信号はまずアッテネーター (ATT) によって強度をわずかに減衰された後に OC2 によって図面下向きに SSFS 生成用ファイバーを伝搬する。Sub rail の SSFS の入力ピーク強度-中心波長の関係は ATT により Main rail のそれとは異なるものになるため、Main rail で停滞する入力ピーク強度において Sub rail では停滞することなく波長がシフトする。その後、Main rail, Sub rail ともに MSSC によってスペクトル幅を狭め、AWG により波長ごとに 64 レベルに分けられ、異なるポートへ出力される。Main rail と Sub rail のそれぞれで波長シフトの停滞が発生しない強度の出力ポートを組み合わせることで量子化誤差の少ない全光量子化を実現できる。

## (3) デュアルレールのシミュレーション

6 bit 全光量子化におけるデュアルレールの手法の効果を確認するために、シミュレーションを行った。光源は中心波長 1550nm、パルス幅 0.5ps の MLLD を用い、ATT により強度を変化させることで、入力信号を作成した。SSFS を誘起させるための高非線形光ファイバには 1Km-HNLF ( $D=7$  [ps/nm/km],  $S=0.03$  [ps/nm<sup>2</sup>/km],  $\gamma=15$  [W/km]) を、MSSC 誘起用ファイバーには 4 対の SMF と HNLF、2m-SMF ( $D=17$  [ps/nm/km],  $S=0.06$  [ps/nm<sup>2</sup>/km],  $\gamma=1.5$  [W/km]), 92m-HNLF2 ( $D=-0.0185$  [ps/nm/km],  $S=0.0029$  [ps/nm<sup>2</sup>/km],  $\gamma=15$  [W/km]), 10m-SMF, 110m-HNLF3 ( $D=-0.266$  [ps/nm/km],  $S=0.0268$  [ps/nm<sup>2</sup>/km],  $\gamma=9.3$  [W/km]), 30m-SMF ( $D=17$  [ps/nm/km],  $S=0.06$  [ps/nm<sup>2</sup>/km],  $\gamma=1.5$  [W/km]), 400m-HNLF4 ( $D=0.044$  [ps/nm/km],  $S=0.029$  [ps/nm<sup>2</sup>/km],  $\gamma=20$  [W/km]), 100m-SMF, 521m-HNLF5 ( $D=0.055$  [ps/nm/km],  $S=0.029$  [ps/nm<sup>2</sup>/km],  $\gamma=16$  [W/km]) を用いた。サブレールは 1.0dB の減衰に設定した。図 10 メインレールの 64 レベルの強度に対応する各スペクトル波形を示す。一部の波長範囲でスペクトル波形に重なりが生じ、分離できていないことが分かる。

図 11 にメインレール、サブレールのそれ

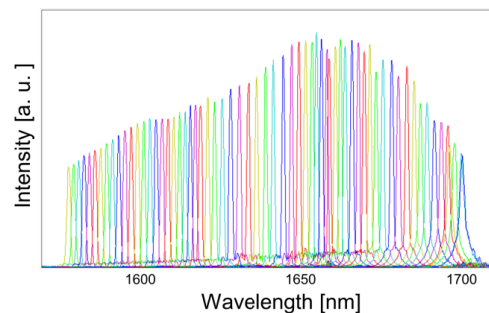


図10 6ビット用メインレールの自己周波数シフト後の出力

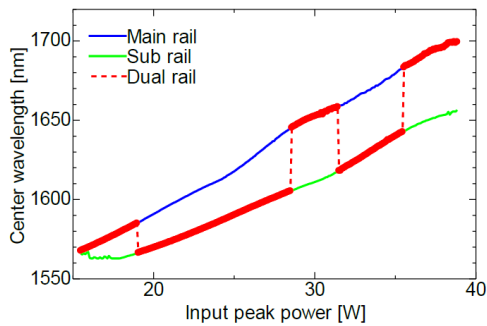


図11 6ビット用メインレールとサブレールの入力ピーク強度と出力中心波長の関係

それぞれの経路における入力ピーク強度と出力中心波長の関係を示す。青線で示されているメインレールと緑線で示されているサブレールで波長シフトに停滞が起こる場所が異なることがわかる。したがって、例えば、赤線で示すようなメインレールとサブレールの条件の良い領域を組み合わせることで、周波数シフトに関して停滞のない入出力特性が実現されることが確認できる。

図12に6 bit 全光量子化の理想的な伝達関数と、メインレールのみ、デュアルレールそれぞれの伝達関数を示す。メインレールの場合において、理想的な伝達関数からの

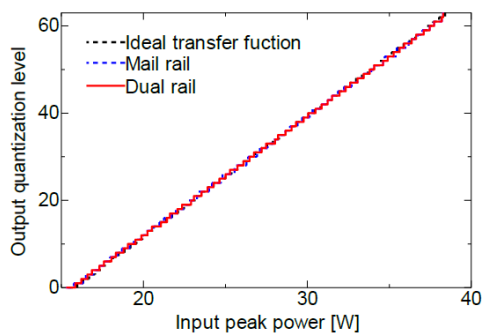


図12 6ビット用メインレールとサブレールの入力ピーク強度と出力中心波長の関係

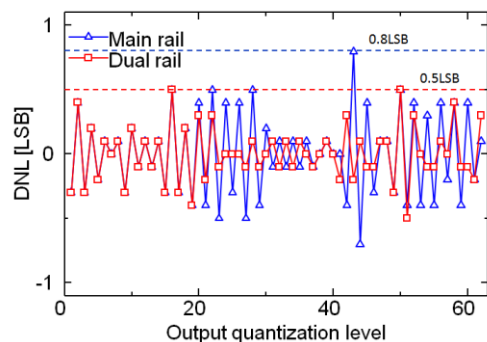


図13 メインレールとデュアルレールのDNLのシミュレーション結果

ずれが、デュアルレールを用いることで軽減できていることが分かる。本量子化システムの性能を確かめるために、伝達関数から計算される、微分非直線誤差 (DNL), 積分非直線誤差 (INL) を求めた。図13にメインレールとデュアルレールそれぞれのDNLの結果を示す。メインレールの場合、DNLのピークは0.8LSBであるが、デュアルレールの場合、DNLのピークは0.5であった。よってデュアルレールを用いることで大幅に誤差を減らすことができたことが分かる。

#### (4) デュアルレールの実験

最後に6 bit 全光量子化におけるデュアルレールの手法の効果を確認するために、実験を行った。図14に実験系を示す。光源とSSFS, MSSC 誘起用ファイバーにはシミュレーションと同じ物を用い、パルスのピーク強度を増幅するためMLLDの後にEDFAを用いた。この時、より多くの増幅を得るため、SMF, 分散補償ファイバー (DCF) によるチャープパルス増幅 (CPA) を用いた。HNLfの前に何も付けなかった場合をメインレール, ATTを挿入した場合をサブレールとして分けて測定を行った。サブレールは1.0dBの減衰に設定した。

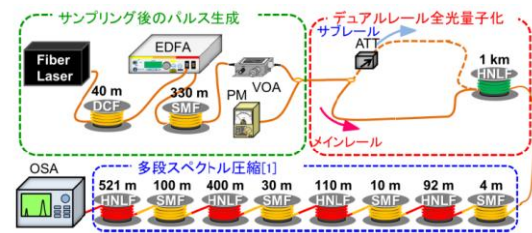


図14 6ビット用デュアルレールの実験系

図15にメインレール, サブレールのそれぞれの経路における入力ピーク強度と出力中心波長の関係を示す。黒いグラフが理想的な量子化伝達関数, 青いグラフがメインレールのみを用いた場合の量子化伝達関数, 赤いグラフがデュアルレールによる量子化伝達

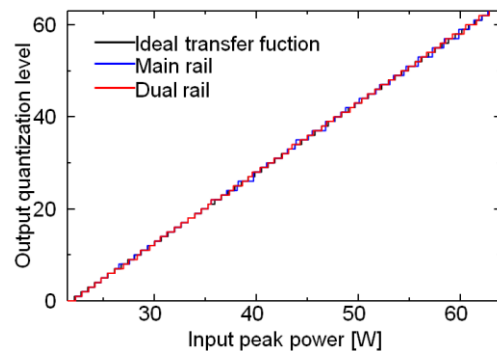


図15 6ビット用メインレールとサブレールの入力ピーク強度と出力中心波長の関係

関数である。停滞が発生し、スペクトルに重なりが見られた範囲では、メインレールのみ  
の量子化伝達関数では理想のものから大き  
くずれているのがわかるが、デュアルレール  
では大きくずれている部分は改善されてい  
ることがわかる。

図 16 にメインレールとデュアルレール  
それぞれの DNL の結果を示す。メインレール  
の場合では -1LSB となっているレベルが数箇  
所ある。これは量子化伝達関数においてミッ  
シングコードが発生していることを示して  
いる。しかし、デュアルレールでは最大でも  
0.7LSB であり、ミッシングコードは発生して  
いないことがわかる。よってメインレールと  
比較して微分非線形性誤差を軽減すること  
ができていることが実験的にも確認できた。

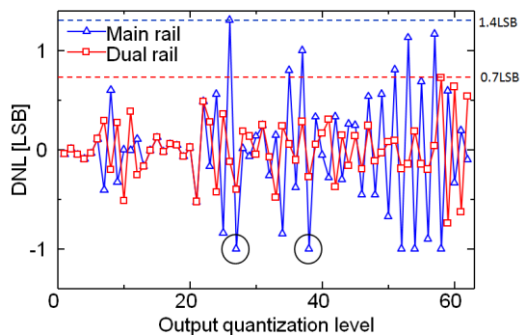


図16 メインレールとデュアルレールの DNL の  
実験結果

以上より、本研究により 6 bit 全光量子化  
の実現とデュアルレールを用いた量子化誤  
差軽減の方法についてシミュレーション、実  
験を通してその効果を確認した。また、デュ  
アルレールを用いることで、分解能の向上が  
期待できることに加えて、光量子化における  
量子化誤差を軽減し、より高精度な量子化を  
実現する効果を示した。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5 件)

① T. Satoh, K. Itoh, and T. Konishi, "100-GS/s 5-Bit Real-Time Optical Quantization for Photonic Analog-to-Digital Conversion," IEICE Trans. Electron., vol. E96-C, No. 2, pp. 223-226, February 2013.

② T. Satoh, K. Takahashi, H. Matsui, K. Itoh and T. Konishi, "10-GS/s 5-bit Real-Time Optical Quantization for Photonic Analog-to-Digital Conversion," IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 24, No. 10, 830 - 832 (2012).

③ T. Konishi, K. Takahashi, H. Matsui, T.

Satoh, K. Itoh, "Five-bit parallel operation of optical quantization and coding for photonic analog-to-digital conversion," Optics Express, Vol. 19 16106-16114 (2011).

他 2 件

〔学会発表〕(計 26 件)

① T. Konishi, K. Takahashi, H. Matsui, and T. Satoh, "Optical quantization for 6 bit photonic A/D conversion," 14th International Conference on Transparent Optical Networks, Tu.C1.1 (Coventry, July 2012). (招待講演)

② K. Takahashi, H. Matsui, K. Itoh and T. Konishi, "Quantization Error Improvement of All-Optical Quantization Using Dual Rail Generation of SSFS in a fiber," 7th Asia-Pacific Microwave Photonics Conference (APMP 2012), Kyoto, Japan, April 26, 2012.

他 24 件

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)  
特になし。

○取得状況 (計 件)  
特になし。

〔その他〕

ホームページ等  
特になし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

小西 毅 (KONISHI TSUYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：9 0 2 8 3 7 2 0