

令和元年5月31日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04365

研究課題名(和文) 未開拓な時間-周波数中間領域での光信号処理に関する基礎研究

研究課題名(英文) Study on Optical Signal Processing in Time-Frequency intermediate domain

研究代表者

小西 毅 (KONISHI, Tsuyoshi)

大阪大学・工学研究科 准教授

研究者番号：90283720

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円

研究成果の概要(和文)：時間-周波数信号中間領域の理論検討を目的として、伝送信号品質を指標に、“時間領域”および“周波数領域”信号とみなせるパケット交換信号と回線交換信号の共存する中間領域の最適化を行った。その結果、フラクショナルパラメータの値として-0.9を用いた時、スペクトル利用効率の劣化を抑える条件で中間領域の優位性を示した。また、信号処理回路のシリコンフォトニクス集積化実現を目指して、数値解析・ファウンドリ試作素子による実験的検証を試み、8チャンネル仕様において800ps/nm以上の分散特性が得られ、集積化の一つの指針を示した。一連の成果が認められ、OFC2019において招待講演を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果の学術的意義や社会的意義について、それぞれ次の点があげられる。学術的意義は、これまで十分に検討がなされていない未踏の領域である中間領域に踏み込んだ点、社会的意義は、現在のネットワークが直面している信号品質と容量のトレードオフの課題に対する理論およびデバイス技術において有効な知見を抽出した点である。代表者らの提案してきた非整数次(フラクショナル)フーリエ変換を用いたアプローチは最適化さえ可能となれば、消費電力も低く現在の多重化技術の補完的な役割が期待できる。一連の成果の学術的意義や社会的意義が認められ、国際会議(OFC2019)において招待講演を行った。

研究成果の概要(英文)：To achieve a theoretical investigation regarding optical signal processing in time-frequency intermediate domain, we examine an appropriate time-frequency intermediate domain which can accommodate both a packet switching signal and a path switching signal by using a signal quality as an index for optimization. As a result, when a fractional parameter is -0.9, we successfully confirm that it is possible to get much better signal quality in time-frequency intermediate domain with keeping the same occupied bandwidth as that in frequency domain. In addition, we examine the usefulness of silicon photonics technology to realize the device in an intermediate domain, which requires an appropriate dispersion characteristic. A numerical analysis and a foundry experimental production device (8 channels) show the dispersion characteristic beyond 800ps/nm, which is sufficient for devices in an intermediate domain. The outcomes of these researches was presented as an invited paper in OFC2019.

研究分野：光信号処理

キーワード：光信号処理 多重化方式 シリコンフォトニクス 時間-周波数変換

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開発当初、直交周波数分割多重(Orthogonal Frequency Division Multiplexing : OFDM) [D. Hillerkuss, et al., Nat. Photon., vol. 5, pp. 364 (2011).]とナイキスト時分割多重 (Nyquist Time Division Multiplexing : N-OTDM) [M. Nakazawa et al., Opt. Express, vol. 20, pp.1129 (2012).]を基盤にしたエラスティックネットワーク (図1) を想定し、必要な帯域に合わせた OFDM と N-OTDM 間の相互交換技術を目指した類似の研究が多く活発に進められており、その状況は現在も大筋で変わっていない(図1)。主に四光波混合などを用いた非線形な信号処理によるアプローチ [P. Guan, et al., OFC2014, W4F.1] が精力的に検討されているが、非線形な信号処理を用いたアプローチは、消費電力やスペクトル利用効率の点で課題がある。一方で、代表者らの提案してきた非整数次(フラクショナル)フーリエ変換を用いたアプローチ (Fractional Orthogonal Frequency Division Multiplexing : Fr-OFDM) は線形な信号処理を用いているため、消費電力も低く、多重化技術自体を信号処理に用いるためにスペクトル利用効率も非常に高い。また、光回路による集積化が可能であるために実用性における優位性も非常に高い。このような時間 - 周波数中間領域における直交基底自体が全く新しいものであり、類似の研究が出てきているが、先駆性に関する状況は現在も大筋で変わっていない。

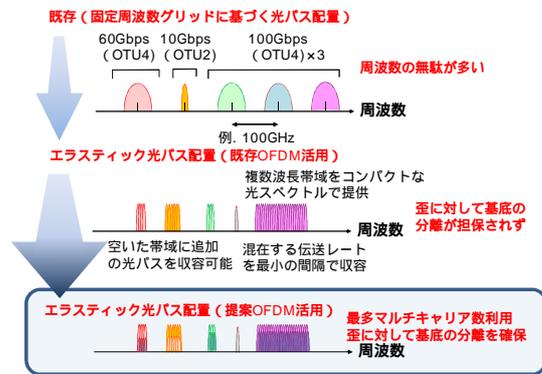


図1 エラスティックな帯域の利用

2. 研究の目的

本研究の全体構想の主眼は、フーリエ変換に基づく従来の“時間領域”と“周波数領域”における信号の取り扱いを、フーリエ変換の一般化を通して再構築することである。この構想の具体的な目的は、新たに定義した“中間領域”における二次元的な信号の取り扱いを軸にした革新的な光信号処理の創出である(図2)。時間と周波数の共存した“中間領域”に適した信号処理方法の確立により、例えば、時間領域と周波数領域で分けられているパケット・回線交換の処理の共通化等において新たな自由度の創出が期待できる。

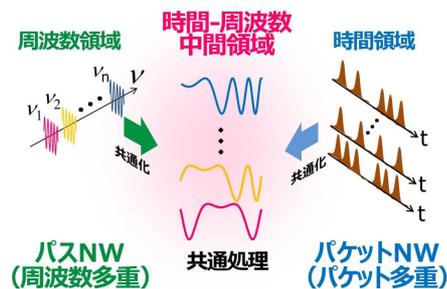


図2 目標とする新しい信号処理 (パケット・パス統合処理)

3. 研究の方法

当初の研究期間内の達成目標：期間内達成目標を以下に示す。

- (1)時間 - 周波数中間領域への変換原理の確立
- (2)時間 - 周波数中間領域への変換デバイス設計の確立
- (3)時間 - 周波数中間領域における新しい信号処理の検討
- (4)時間 - 周波数中間領域への変換デバイスの集積化の検討

- (1)の達成目標では、“時間領域”と“周波数領域”間の相互交換技術の交換過程を発展させて、時間 - 周波数中間領域への変換原理に昇華させることを試みた。
- (2)の達成目標では、時間 - 周波数中間領域での信号処理を周波数領域において用いる波形整形器などの既存のデバイスにおける信号処理に翻訳変換する設計方法の確立を目指した。
- (3)の達成目標では、“時間領域”および“周波数領域”における信号とみなせるパケット交換信号と回線(パス)交換信号を共存させて処理を行うことを目指した。
- (4)の達成目標では、集積化自体を主目的とはしないが、集積化技術の選択によって実現可能な信号処理の方向性にも影響があるために、集積化の検討も同時に進めた。

4. 研究成果

研究成果の概要として、時間 - 周波数中間領域における多重化方式変換を実現するための時間 - 周波数信号変換プラットフォームの構築の理論検討を行った。“時間領域”と“周波数領域”の交換過程を発展させて、“時間 - 周波数中間領域”への変換原理に昇華させることを目指して、時間 - 周波数信号変換の基礎となるフラクショナルフーリエ変換の信号品質を軸にした検討に注力し、信号間干渉に関する課題の抽出を行った。さらに、その具現化のためのデバイス設計・制御技術の確立を目指して、シリコンフォトニクス技術の導

入を検討した。実際に、10GHz サブチャネル間隔・4 サブチャネルの構成の設計を行い、位相変化量に対する分散波長特性について所望の結果を得た。また、抽出した信号間干渉の課題に対して、サブキャリアの周波数配列の最適化を提案し、その効果として信号品質劣化をビットエラー測定において一桁以上改善可能であることをシミュレーションによる確認に成功した。また、中間領域を活用することにより新しい機能創出が見込めるが、送受信のアプローチのみならず、送受信信号の計測装置、信号処理装置等への展開を念頭に、計測手法のスペクトル分解能の高精度化の検討や新しい技術の情報収集も積極的に行った。“時間・周波数中間領域”における信号処理の有効性の確認を進める取り組みの過程で、回線信号に相当するシンボルの境界での周波数が大きく変化しないようにすることによりシンボル間干渉の軽減による回線数と信号品質の向上を試み、QPSK 変調を加えたチャネル数4の並列回線の信号をパケット信号に相当する信号への変換において改善の効果を確認した。また、伝送信号品質を指標に、“時間領域”および“周波数領域”における信号とみなせるパケット交換信号と回線交換信号の共存する中間領域の二次元的な傾きを決定するフラクショナルパラメータの最適化を行い、中間領域の優位性を示した。さらに、これらの技術の具現化のためのデバイス設計・制御技術の確立を目指して、フラクショナル OFDM 信号処理回路のシリコンフォトニクス集積化を検討した。

研究成果の具体的な内容として、“時間領域”および“周波数領域”における信号とみなせるパケット交換信号と回線交換信号の共存する中間領域について、光信号処理に適した二次元的な傾きを決定するフラクショナルパラメータの最適化の内容を中心に取り上げて説明する。

時間と周波数の二次元性は、帯域の占有率と信号対雑音比(SNR)の向上率のトレードオフとして顕在化する。SNR 自体は処理や伝送中の非線形光学効果や増幅器により劣化するため、周波数利用効率が低下してしまう。高い周波数利用効率を維持するためには SNR の劣化を抑えなければならない。信号の多重化方式も SNR に大きな影響を与えている。周波数直交分割多重(OFDM)やナイキスト光時分割多重(N-OTDM)は最も高い周波数利用効率の多重化方式として知られている。OFDM 伝送においては、サブキャリアが同位相となることで生じる高いピーク対平均パワー比(PAPR)によって引き起こされる非線形歪みの結果として SNR が劣化する。ナイキストパルス列は時間領域に信号パワーを拡散できるため、N-OTDM では PAPR を抑制できる。時間周波数平面における中間の領域を扱うことができるフラクショナル OFDM(FrOFDM)によって時間・周波数領域での多重化を一般化することができる。これまでに、FrOFDM は N-OTDM よりも PAPR を抑制できることが示されている。本研究では、周波数利用効率 SE と帯域幅 B 、SNR の間の関係に留意して、パス交換を念頭に置いた OFDM における最も高い周波数利用効率を維持した状態で得られる、中間領域である FrOFDM を用いた場合のアドバンテージについてその伝送距離の延伸効果を評価指標に検討した。

FrOFDM のサブキャリアは p の値によって異なるスペクトルとなり、利用帯域幅も異なる。一例として、 $N=4$ のときの $p=-1$ 、 $p=-0.7$ 、 $p=-0.4$ 、 $p=-0.1$ でのスペクトルを図3に示す。 p の値が0に近づくほど利用帯域幅は広がっていくことがわかる。フラクショナルパラメータ p に応じて利用帯域幅は図4のような傾向を示す。一例として、スペクトルの大部分を含むように、全サブキャリアのスペクトルの最大値の $1/e$ 以上の範囲として利用帯域幅を定義し、 $N=32$ のときの利用帯域幅を評価した。 $p=-0.4$ 程度までは OFDM から緩やかに利用帯域幅が増加していくが、その後は急激に利用帯域幅が増大していくことがわかる。

周波数利用効率 SE と帯域幅 B 、SNR の間には以下の関係がある。

$$SE \propto \frac{\log_2(1 + SNR)}{B}$$

SE を低下させずに伝送距離を伸ばすには、伝送中の SNR 劣化を抑制することが必要となる。OFDM 方式では、多数のサブキャリアの位相が揃うことで PAPR が高くなり、信号劣化が起こる。一方で FrOFDM ではパワーを時間的に分散させることができるため PAPR の低減が可能となる。FrOFDM によるパワーの時間的な分散は2つに分けて考えることができる。1つは波長分散を与えることにより PAPR の低いナイキストパルス列に変換されること、もう1つは OFDM において

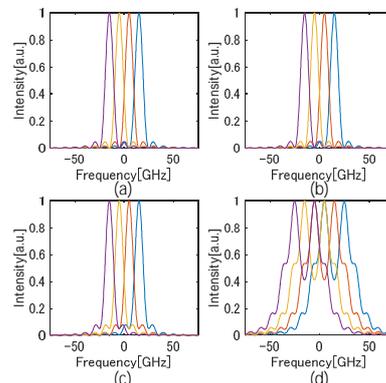


図3 $N=4$ のサブキャリアのスペクトル(a) $p=-1$ (OFDM), (b) $p=-0.7$, (c) $p=-0.4$, (d) $p=-0.1$.

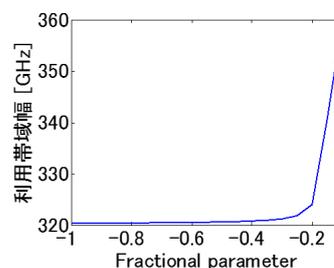


図4 $N=32$ のときのフラクショナルパラメータと利用帯域幅

周期的にあらわれる高いピークパワーを持ったパルスの生成抑制である。

OFDM 方式では、周期的にサブキャリアの位相が揃うことで強いピークが形成される。一方で、FrOFDM 方式ではサブキャリアごとに異なる位相オフセットが与えられる。そのため、ピークが形成されにくく、ファイバ内の非線形光学効果による信号劣化が抑制される。OFDM と FrOFDM の伝送距離ごとの時間波形を図 5 に示す。

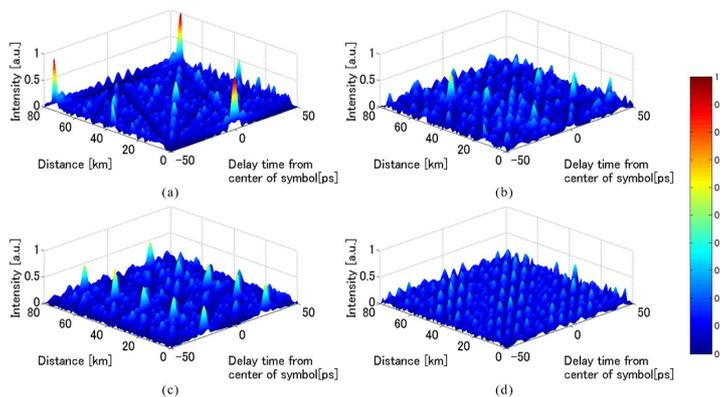


図 5 $N=16$ のときのファイバ伝搬距離ごとの時間波形の様子。(a) $p=-1$ (OFDM), (b) $p=-0.7$, (c) $p=-0.4$, (d) $p=-0.1$

伝送路として 100 km の SMF ($D=17\text{ps/nm/km}$) を使い、サブキャリア数は 16 に設定した。また、分散によるピークパワーの形成をみるため、伝送損失と非線形定数は 0 としてシミュレーションを行った。図 5 の(a)に示すように、OFDM では伝送直後である 0 km と、75 km 付近に位相の揃った非常に高いピークパワーを持ったパルスが形成されている。サブキャリア数が変わってもピークが形成されている位置は変わっておらず、一定の伝送距離ごとに周期的にピークが現れることがわかる。一方で、FrOFDM では図 5 の(b) ~ (d)に示すように、 p の値によって時間波形が変わるものの、サブキャリアごとに異なる位相がかかっているために、OFDM ほどの高いピークパワーを持ったパルスが形成されない。

最後に、OFDM において最も高い周波数利用効率を維持したままファイバスパンを 5 km 延伸できることを確かめるシミュレーションの結果を示す。図 6 に 1 スパン 88 km の伝送を OFDM により行った結果と、1 スパン 93 km の伝送を FrOFDM により行った結果を示す。図 6 のコンスタレーションマップに示すように、信号のばらつきにはほとんど違いがない。ここから算出された SNR はそれぞれ 25.46 dB と 25.47 dB であり、SNR を劣化させることなく伝送距離を延伸することができることを確認した。

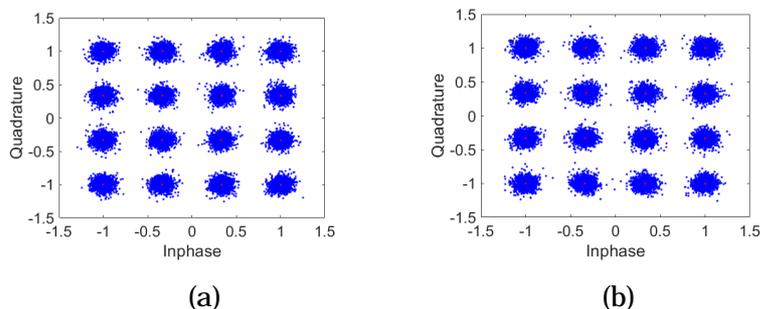


図 6 受信信号のコンスタレーションマップ。(a) 528 km 伝送後(1 スパン 88 km)の OFDM 信号, (b) 558 km 伝送後(1 スパン 93 km)の FrOFDM 信号

フラクショナル OFDM 信号処理回路のシリコンフォトニクス集積化実現を目指して、数値解析・ファウンダリ試作素子による実験的検証を試みた。シリコン細線導波路構造による小型集積化を考へて、入力等の分岐・チャンネル周波数間隔に対応する長さの遅延導波路・MMI 位相回転子と位相シフトの構成(図 7, 図 8)を採用した。遅延導波路間の位相シフト量をチャンネル間の直交条件から一定の差を付けることにより、10GHz 間隔 4 チャンネル仕様において $\pm 120\text{ps/nm}$ (図 9)、8 チャンネル仕様において 800ps/nm 以上の分散特性(図 10)が可能であること、位相シフト量との関係が線形で近似できる結果が数値解析的に得られた(図 11)。一方、チャンネル内での分散スロープも確認され、平坦化に課題が残った。試作した 4 チャンネル OFDM 信号処理回路の透過特性を評価し(図 12)、目標とする特性を得るためのポイントが出力部の MMI 位相回転子の位相特性であること、作製誤差を $\pm 0.2\mu\text{m}$ 程度に収める必要性がわかった。

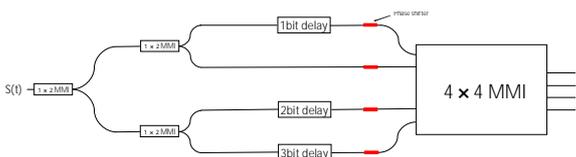


図 7 Si 細線フラクショナル OFDM 信号処理回路

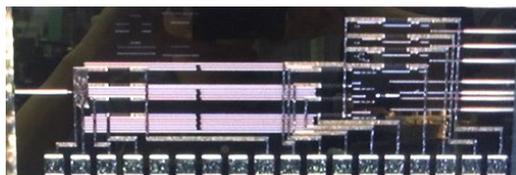


図 8 素子表面写真

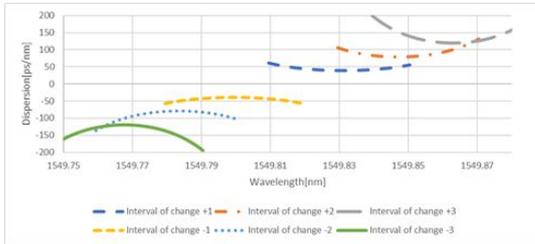


図9 4チャンネル仕様の分散特性

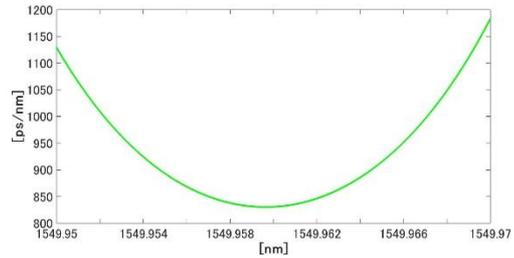


図10 8チャンネル仕様の分散特性

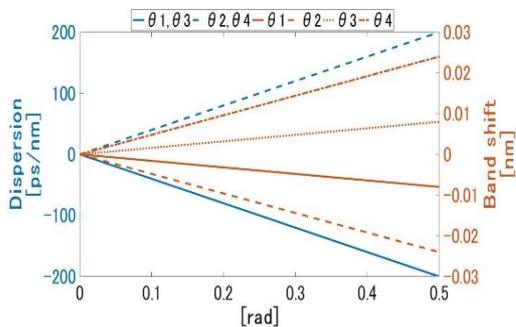


図11 分散特性の位相シフト量依存性

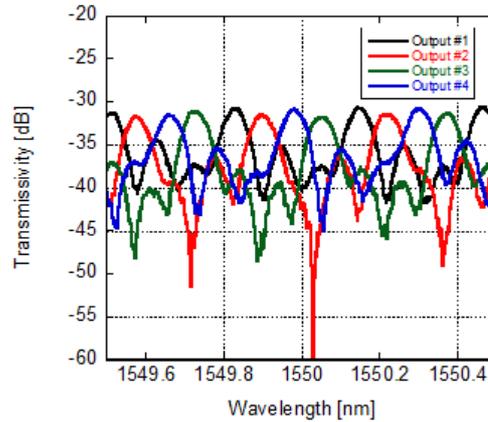


図12 光 OFDM チャンネル分離回路の透過スペクトル

以上、伝送信号品質を指標に、“時間領域”および“周波数領域”における信号とみなせるパケット交換信号と回線交換信号の共存する中間領域の二次的な傾きを決定するフラクショナルパラメータの最適化を行い、スペクトル利用効率を指標にした時間と周波数の共存空間（中間領域）の確保の指針が得られた。また、シリコンフォトニクス技術をベースとした集積化においてフラクショナル特性を実現するための分散特性の確保の指針が得られた。一連の成果が認められ、OFC2019において招待講演を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

- 1) Y. Yamasaki, T. Nagashima, G. Cincotti, S. Shimizu, N. Wada, H. Uenohara, T. Konishi, "Performance evaluation of fractional OFDM for extending transmission distance without reducing spectral efficiency," *Optics Communications*, 446, 1 April 2019, Pages 100-105. (査読有), DOI: 10.1016/j.optcom.2019.04.059
- 2) T. Nagashima, G. Cincotti, T. Murakawa, S. Shimizu, M. Hasegawa, K. Hattori, M. Okuno, S. Mino, A. Himeno, N. Wada, H. Uenohara, and T. Konishi, "Experimental demonstration of cyclic prefix insertion for all-optical fractional OFDM," *Optics Communications*, 396, 185-190, 2018. (査読有), DOI: 10.1016/j.optcom.2017.03.032

〔学会発表〕(計 5件)

- 1) T. Konishi, T. Murakawa, T. Nagashima, S. Shimizu, M. Hasegawa, K. Hattori, M. Okuno, S. Mino, A. Himeno, N. Wada, H. Uenohara, T. Kodama, G. Cincotti, "Enhanced Optical Communications through Joint Time-frequency Multiplexing Strategies" OFC2019 Invited paper, W3I.1, 2019.
- 2) 山崎佑, 永島知貴, Gabriella Cincotti, 清水智, 和田尚也, 植之原裕行, 小西 毅, "光フラクショナル OFDM 方式における周波数利用効率の検討," 電子情報通信学会フォトニックネットワーク研究会, vol. 118, PN2018-81, pp. 271-275, 2019.
- 3) T. Naganuma, and H. Uenohara, "Analytical Investigation of Generic Form Expressing Adaptive Dispersion of Optical Fractional Fourier Transform Circuit," 2018 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC2018), 3E2-4, 2018.
- 4) T. Konishi, Y. Yamasaki, S. Shimizu, G. Cincotti, N. Wada, H. Uenohara, "Inter-symbol interference suppression for a hybrid use of OFDM and N-OTDM based on Fr-OFDM," 2018

Photonics in Switching and Computing(PSC2018), Th3C.3, Cyprus, Sep. 2018.

5) 永沼友浩, 植之原裕行, "光フラクショナル OFDM 回路の位相シフトによる分散制御特性の解析的検討," 電子情報通信学会総合大会, C-3-3, 2017.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

該当なし

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 植之原 裕行

ローマ字氏名: (UENOHARA, Hiroyuki)

所属研究機関名: 東京工業大学

部局名: 科学技術創成研究院

職名: 教授

研究者番号(8桁): 20334526

研究分担者氏名: 和田 尚也

ローマ字氏名: (WADA, Naoya)

所属研究機関名: 国立研究開発法人情報通信研究機構

部局名: ネットワークシステム研究所

職名: 研究所長

研究者番号(8桁): 20358873

研究分担者氏名: 清水 智

ローマ字氏名: (SHIMIZU, Satoshi)

所属研究機関名: 国立研究開発法人情報通信研究機構

部局名: ネットワークシステム研究所フォトニックネットワーク研究室

職名: 主任研究員

研究者番号(8桁): 10533440

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: CINCOTTI Gabriella

ローマ字氏名: (CINCOTTI, Gabriella)

研究協力者氏名: 永島 知貴

ローマ字氏名: (NAGASHIMA, Tomotaka)

研究協力者氏名: 永沼 友浩

ローマ字氏名: (NAGANUMA, Tomohiro)

研究協力者氏名: 山崎 佑

ローマ字氏名: (YAMASAKI, Yu)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。