

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成26年度採択分

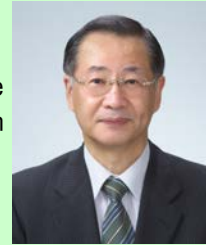
平成29年5月31日現在

研究課題名（和文）**多機能なコヒーレントナイキストパルスの提案  
とそれを用いた超高速・高効率光伝送技術**

研究課題名（英文）Proposal of multi-functional coherent Nyquist pulse  
and its ultrahigh-speed and highly-efficient optical transmission

課題番号：26000009

研究代表者 **中沢 正隆** (MASATAKA NAKAZAWA)  
東北大学・電気通信研究所・教授



**研究の概要：**光ネットワークの超大容量化に向けて、1波長あたりの伝送速度の高速化と周波数利用効率の向上が重要な課題となっている。しかしながら、これまでの光伝送方式では、超短光パルスは広い帯域を必要とするため、高速化と高効率化を同時に実現することは困難であった。本研究では、新たに「コヒーレントナイキストパルス」を提案し、その振幅と位相に独立に情報をのせることにより、超高速かつ高効率な光伝送システムの基盤技術の確立を目指す。

**研究分野：**工学

**キーワード：**通信方式(無線、有線、衛星、光、移動)、レーザー

### 1. 研究開始当初の背景

国内のネットワークを行き交う情報量は年率約40%の勢いで増加しており、ペタビット( $10^{15}$ ビット)級の基幹光伝送網の構築が急務となっている。そのため今日の光通信では、1波長あたりの伝送速度の高速化と同時に、限られた帯域の中で出来るだけ多くの信号を高密度に収容するために、無線通信に匹敵もしくは凌駕するような高い周波数利用効率の実現が喫緊の課題となっている。しかしながら、従来の高速伝送に用いていた光信号の超短パルス化は広い帯域を必要とするため、高速化と多値変調による周波数利用効率の拡大を同時に実現することが難しく、光が有する高速性とコヒーレンスという2つの潜在能力が活かしきれずにいた。

### 2. 研究の目的

本研究では、新たに「コヒーレントナイキストパルス」という光パルスを提案し、その振幅と位相に独立に情報をのせることにより、超高速かつ高効率な光伝送システムの基盤技術の確立することを目的としている。光ナイキストパルスは数あるパルスの中で、超高速光パルスでありながら最も狭い帯域を有するため、光伝送用パルスとしてその性能を最大限に引き出すことが出来る。さらにこの技術では、ナイキストパルスの時間軸上の直交性を取り入れて多重化・多重分離することが特徴である。ナイキストパルスは極めて多機能であるため、レーザー光源、多重化、伝送、多重分離、復調に亘る多くの技術分野への応用展開を図る。

### 3. 研究の方法

ナイキストパルスは sinc 関数( $\sin \alpha t / \alpha t$ )の形状を有し、その裾野は振動しながら減衰し、周期的に強度がゼロとなる。そのため、ナイキストパルスの時間多重は、隣接ビットとの重なりが生じるにもかかわらずデータ毎には干渉が生じない領域が存在する。即ち、幅が広く帯域の狭いパルスを用いても高速伝送が実現できるという優れた特徴を有する。この特徴を活かして超高速光伝送システムにおける周波数利用効率の飛躍的な増加を実証するために、コヒーレントナイキストパルス発生技術、超高速ナイキスト多重伝送技術、ナイキスト多重分離・復調技術の開発を進める。

### 4. これまでの成果

(1) **ノンコヒーレントナイキストパルス** (光の“位相差”で情報を伝送する方式)を用いて1チャンネルあたり伝送速度 2.56~5.12 Tbit/s への高速化とその伝送距離の拡大を実現した。具体的には、単一チャンネル 2.56 Tbit/s 伝送において、ナイキストパルスの狭い伝送帯域により波長分散・偏波分散への耐力が著しく向上し、従来のガウスパルスでは 300 km が限界であった伝送距離を 525 km まで拡大した。さらに、従来パルスでは困難であった単一チャンネル 5.12 Tbit/s 信号の 300 km 伝送に世界で初めて成功した。5.12 Tbit/s 伝送に用いたナイキストパルスの波形・スペクトル、ならびに 300 km 伝送特性を図 1(a), (b)にそれぞれ示す。図 1(b)の赤線に示すように、300 km 伝送後も誤り訂正閾値( $2 \times 10^{-3}$ )以下の誤り率が得られている。

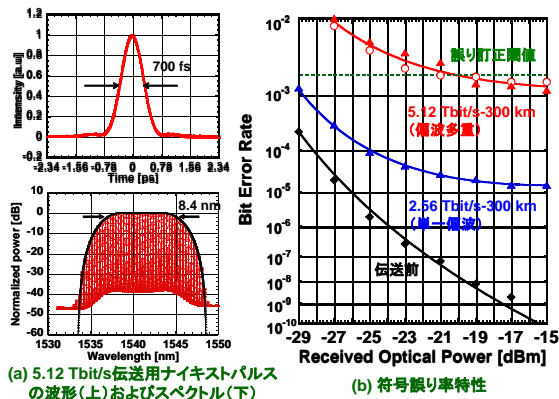


図1 5.12 Tbit/s/ch-300 km 伝送結果

(2) コヒーレントナイキストパルス（振幅と位相の両方に情報を乗せる方式）を用いて、単一チャネル 1.92~3.84 Tbit/s, 64 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)伝送を実現し、1 Tbit/s を上回る伝送速度でありながらその周波数利用効率を 10 bit/s/Hz まで引き上げることに世界で初めて成功した。具体的には、まずコヒーレントナイキストパルスの時間領域での直交性に着目し、ナイキストパルスを伝送用信号ばかりでなく局発光にも用いることにより、多重分離とホモダイン検波を同時に実現する簡便な手法を新たに提案した。また、コヒーレントナイキストパルス伝送に適した高い SN 比を有する周波数安定化モード同期ピコ秒パルス光源を新たに開発した。これらの技術を用いて、伝送速度を 3.84 Tbit/s へと高速化させ、150 km 伝送を実現した。このときの周波数利用効率は 10.6 bit/s/Hz に達している。従来技術では 4 Tbit/s 近い伝送速度と 10 bit/s/Hz を上回る周波数利用効率を同時に実現することは不可能であったが、コヒーレントナイキストパルスにより世界で初めて実現した。

(3) ナイキストパルスを直接出力できる新たなモード同期レーザ「ナイキストレーザ」を提案した。作製した 40 GHz ナイキストレーザの共振器構成とその出力特性を図 2 に示す。両端にピークを有する矩形型の光フィルタを共振器内に用いることにより、共振器を周回する光パルスのスペクトルをナイキストパルスの特徴であるフラットトップ形状にすることができる。その結果、図 2(b)に示すようにパルス幅 3 ps のナイキストパルスを 12 dBm のパワーで発生させることに成功した。この結果、従来のようにレーザ外部で波形整形用光フィルタを用いる方法と比べ 10 dB 高い SN 比を実現し、高品質なナイキストパルスを生成することが出来た。

## 5. 今後の計画

ノンコヒーレントナイキストパルスに関しては、伝送速度をさらに倍増させ 10 Tbit/s への高速化に着手する。これはこれまでに前

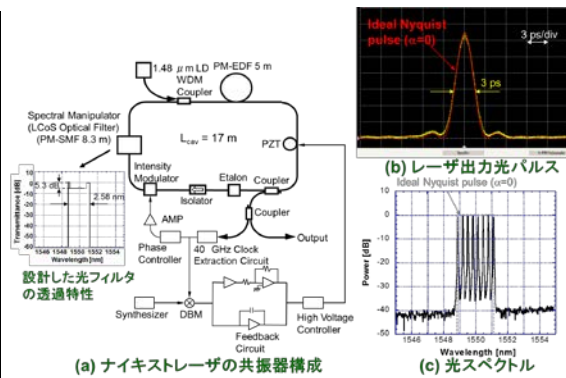


図2 ナイキストレーザの共振器構成と出力特性

例のない高速化であるが、従来パルスではスペクトルの占有帯域が広過ぎるため、ナイキストパルスでしか実現が不可能な領域である。コヒーレントナイキスト伝送に関しては、受信部における局発光源の高性能化により、高速化と周波数利用効率のさらなる拡大に取り組む。今後、モード同期レーザ用の光位相同期技術を開発し、ナイキスト局発光パルスをより簡便で且つ高い SN 比で生成する技術を創出していく。

さらに、ナイキストパルスの有する高い周波数利用効率の特徴を波長多重(WDM)伝送において実証するために、多波長ナイキストパルスの発生技術の開発に着手し、大容量伝送系の構築を進める。従来の WDM では 1 チャネルあたりの伝送容量が低いため、波長数が数 100 チャネルと複雑なシステムになっていた。ナイキストパルスの導入により、波長多重数と時分割多重数とを最適化した光伝送システムの実現を目指す。

## 6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

（研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線）

(1) M. Nakazawa, M. Yoshida, and T. Hirooka, "The Nyquist laser," *Optica* vol. 1, no. 1, pp. 15-22, July (2014).

(2) D. O. Otuya, K. Kasai, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Single-channel 1.92 Tbit/s, 64 QAM coherent Nyquist orthogonal TDM transmission with a spectral efficiency of 10.6 bit/s/Hz," *J. Lightwave Technol.* vol. 34, no. 2, pp. 768-775, January (2016).

(3) D. Suzuki, K. Harako, T. Hirooka, and M. Nakazawa, "Single-channel 5.12 Tbit/s (1.28 Tbaud) DQPSK transmission over 300 km using non-coherent Nyquist pulses," *Opt. Express*, vol. 24, no. 26, pp. 29682-29690, December (2016).

他 10 件

受賞：Charles Hard Townes Award（米国光学会）、河北文化賞、藤原賞、電子情報通信学会学術奨励賞など

ホームページ等

<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp/>