

博士学位論文要約（令和4年3月）

超高速・大容量コヒーレントナイキスト光パルス伝送に関する研究

木村 光佑

指導教員：廣岡 俊彦

Study on Ultrahigh-Speed and Large-Capacity Coherent Optical Nyquist Pulse Transmission

Kosuke KIMURA

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

Increasing the single-channel bit rate and spectral efficiency simultaneously has been an important research subject toward further expansion of the optical transmission capacity. To realize a transmission system with such demands, our laboratory proposed an OTDM (Optical Time Division Multiplexed) transmission using a coherent Nyquist pulse, whose waveform is given by a sinc function and the spectrum is confined in a finite bandwidth. In this work, I succeeded in an ultrahigh-speed single-channel transmission at 15.3 Tbit/s and a large-capacity, long-haul 1 Tbit/s/ch WDM transmission over 1120 km using coherent Nyquist pulse.

1. はじめに

国内のインターネットトラフィックは年率 40 %の勢いで増大を続けており、情報通信の基盤である光通信の大容量化は必須の課題となっている。今日の光通信システムでは、複数のチャネル(波長)の信号を多重して大容量化する波長分割多重(WDM: Wavelength Division Multiplexing)方式が用いられている。近年、限られた周波数帯域の中で伝送容量を拡大するために、多値変調方式を用いたデジタルコヒーレント技術による周波数利用効率(単位周波数当たりの伝送容量)の向上が進展している。それと同時にシステムの簡素化を目的として、1チャネル当たりの伝送速度の高速化も進んでいる。伝送速度の高速化により、同じ総伝送容量をより少ないチャネル数で実現することができ、システムが簡素化され経済性が高まる。しかしながら、一般的な光通信技術では、電子デバイスの動作速度の制限により、単一チャネルで 1 Tbit/s を超える高速化は困難である。このような課題に対して、本研究では、電子デバイスの動作速度の限界を超える超高速伝送と高い周波数利用効率を同時に実現可能なコヒーレント光ナイキストパルス伝送の基盤技術の確立を目的としている。光ナイキストパルスとは、波形が sinc 関数の形状を有する光パルスであり、パルス同士が重なり合っても符号間干渉が生じないことから、狭い帯域でも高速な時間多重が可能であるという特徴がある¹⁾。本研究では、コヒーレントナイキストパルスを用いて、従来方式では困難であった1波長で 10 Tbit/s を超える超高速単一チャネル伝送、および 1 Tbit/s/ch で 1000 km を超える大容量・長距離 WDM 伝送の実現に取り組んだ。

2. 単一チャネル 15.3 Tbit/s-150 km コヒーレントナイキストパルス伝送

はじめに、シンボルレート 1.28 Tbaud、偏波多重 64 QAM 方式による単一チャネル 15.3 Tbit/s 超高速伝送に取り組んだ。本研究で開発した伝送システムの構成を図 1 に示す。破線で囲んだ箇所は、シンボルレートを従来のコヒーレントナイキストパルスで用いてきた 640 Gbaud から 1.28 Tbaud へ高速化するための改良点に対応する。送信部ではモード同期レーザからの出力パルスを、高非線形ファイバ(HNLF: Highly Nonlinear Fiber)を用いてスペクトル拡大し、パルス整形器により光ナイキストパルスに波形整形している。ここで、1.28 Tbaud 用のナイキストパルスを生成するためには、640 Gbaud 時より 2 倍広い帯域にスペクトル拡大を行う必要がある。しかし、スペクトル拡大効果を高め

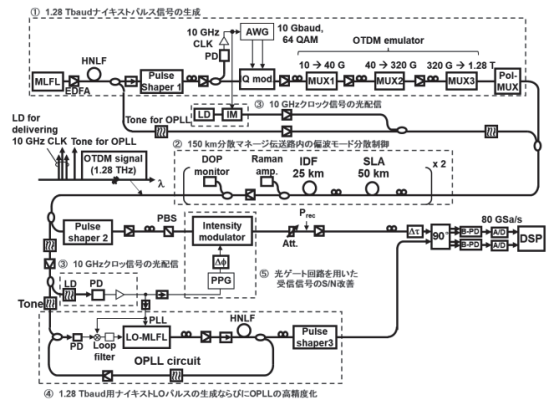


図 1 単一チャネル 15.3 Tbit/s 伝送システム

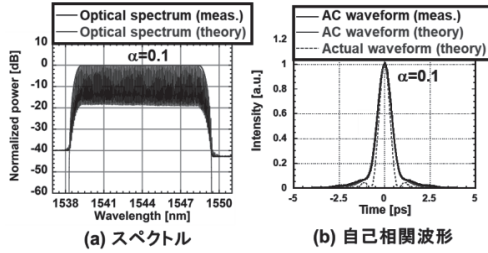


図2 1.28 Tbaud 用ナイキストパルス波形

るために HNLf を長くすると、信号光のコヒーレンスが低下することが知られている。そこで、HNLf へ入力する信号電力を 24 dBm まで高めることで、所望の信号の帯域を得るために必要な HNLf 長を 7 m まで短尺化し、信号光のコヒーレンスの劣化を抑制した。図 2(a) および(b)に生成したナイキストパルスのスペクトルと自己相関波形を示している。理想形状とよく一致した波形が得られていることがわかる。次にこの信号を IQ 変調器により 10 Gbaud, 64 QAM 信号で変調する。その後、OTDM 多重回路ならびに偏波多重回路により偏波多重 1.28 Tbaud, 64 QAM 信号(15.3 Tbit/s)を生成している。以上のコヒーレントナイキストパルス信号に加えて、LO 光源の位相同期用のパイロットトン信号、およびクロックの配信信号として半導体レーザーの CW 出力光を 10 GHz クロック信号で強度変調した信号を生成している。10 GHz クロック信号を光配信することで、従来のクロックリカバリ回路²⁾を用いて OTDM 信号からクロック信号を再生する場合に比べて、クロック信号の時間揺らぎを半分以下に低減している。これらの信号を SLAF(Super Large Area Fiber)と IDF(Inverse Dispersion Fiber)で構成される分散マネージ伝送路を伝搬させる。ここで、信号帯域の増大に伴って問題となる 2 次偏波モード分散(PMD: Polarization Mode Dispersion)を低減するため、偏光度(DOP: Degree of Polarization)モニタを設置し、SLAF と IDF のそれぞれに対して PC(Polarization Controller)を用いて、偏波主軸に信号の偏波を精度よく合わせている。これにより、伝送後の偏波消光比は 20 dB から 23 dB に増大した。

受信部は、LO(Local Oscillator)パルス光源、OPLL(Optical Phase Locked Loop)回路、光ゲート回路およびホモダイン検波回路から構成されている。LO パルス光源は送信部光源と同様の構成であり、OPLL 回路により OTDM 信号と LO パルス間の位相同期を実現している。、2 m の長さで 26.6 dBm の高い出力が得られる EDFA を作製し、これを用いることで OPLL 回路のループ長を 18 m に短尺化し、OPLL 回路内の IF 信号の位相雑音を 0.6 deg.に低減した。この位相雑音は、64 QAM の隣接シンボル間の位相差 ±4.7 deg.よりも十分小さく、高精度な位相同期を実現している。光ゲート回路では、復調対象となるトリビュータリの周辺のみを

抽出し、ホモダイン検波回路に入力する 1 トリビュータリ当たりの電力を増大している。従来は、ナイキストパルスの時間領域の直交性を用いて多重分離するために、全トリビュータリをホモダイン検波回路に入力していた。ホモダイン検波回路への入力電力は BPD によって制限されることから、シンボルレートの高速化に伴って 1 トリビュータリ当たりの検出電力が低下し復調特性が劣化していた。本光ゲート回路を用いることにより、BPD(Balanced Photodetector)に結合するトリビュータリ数を 1/3 に低減し、信号の受信レベルを 5 dB 改善した。

以上を組み合わせで行った単一チャネル 15.3 Tbit/s-150 km 伝送の全トリビュータリの符号誤り率(BER: Bit Error Rate)特性とコンステレーションの一例を図 3 に示す。全てのトリビュータリに対して、25.5%オーバーヘッドの誤り訂正符号(FEC: Forward Error Correction)の閾値である 3.8×10^{-2} 以下の BER を達成した。これにより、単一チャネルで世界最速となる 15.3 Tbit/s-150 km 伝送を 8.3 bit/s/Hz の高い周波数利用効率で実現した³⁾。

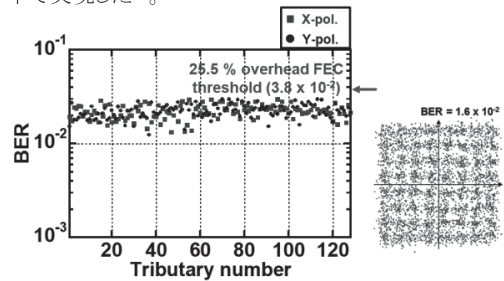


図3 単一チャネル 15.3 Tbit/s-150km 伝送の全トリビュータリの BER 特性とコンステレーションの一例

3. CFBG と LCoS を組み合わせた低非線形分散マネージ伝送路を用いた単一チャネル 15.3 Tbit/s 伝送特性の改善

前章で述べた伝送実験では、分散マネージ伝送路に使用していた IDF の有効コア断面積が $31 \mu\text{m}^2$ と小さく、その光学的非線形性が大きいことから、伝送後の BER 特性が制限されていた。そこで IDF に代わる分散補償素子として、CFBG(Chirped Fiber Bragg Grating)および LCoS(Liquid Crystal on Silicon)を組み合わせた光学的非線形性の低い分散マネージ伝送路を新たに構築した。CFBG は、グレーティングをその周期を変化させながら光ファイバに書き込んだ光学素子であり、分散補償素子としてよく知られている。近年長さ 10 m 以上の長尺な CFBG の製造技術が確立され、それを用いた 100 km 以上の光ファイバの分散補償が可能となった⁴⁾。光ファイバ長が IDF(数 10 km)に比べて十分短いため、CFBG 内で生じる非線形光学効果は無視でき

る。本研究では、長さ 20 m の CFBG を光ファイバ伝送路用の分散補償素子として応用し、それと有効コア断面積 $153 \mu\text{m}^2$ の Ultra Large Area Fiber (ULAF) を組み合わせ、図 4 に示す全長 160 km の低非線形分散マネージ伝送路を構築した。従来の分散マネージ伝送路と比較して、光ファイバ伝送路の光学的非線形性は半分以下に低減した。しかしながら、CFBG にはそのグレーティング周期の乱れに起因する群遅延特性の揺らぎがある。この群遅延特性の揺らぎは、1 GHz の周波数分解能で光の振幅および位相を制御できる LCoS 素子⁹⁾を用いて高精度に補償した。

図 5(a)および(b)に LCoS による補償前後の低非線形分散マネージ伝送路の群遅延特性を示す。1.28 Tbaud 伝送用 $\alpha=0.1$ ナイキストパルスの生成に必要な 11 nm の帯域における群遅延時間差は 30.5 ps から 1.42 ps まで低減した。この残留群遅延時間差はサンプリングオシロスコープの時間軸の測定精度 (> 1.0 ps) に起因する。この群遅延補償の効果を確認するために、1.28 Tbaud 伝送用ロールオフ率 $\alpha=0.1$ ナイキストパルスの伝搬特性を測定した。図 6(a)および(b)に時間分解能 500 fs の光サンプリングオシロスコープで測定した低非線形分散マネージ伝送路前後のナイキストパルスの強度波形を示す。伝送前後でいずれもパルス幅 0.87 ps のほぼ同一形状の波形が得られており、精度よ

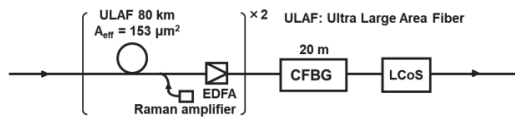


図 4 低非線形分散マネージ伝送路

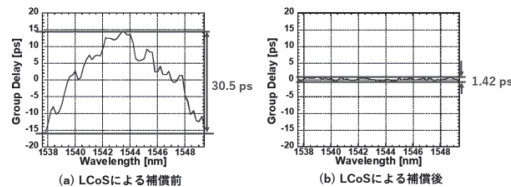


図 5 低非線形分散マネージ伝送路の群遅延特性の補償

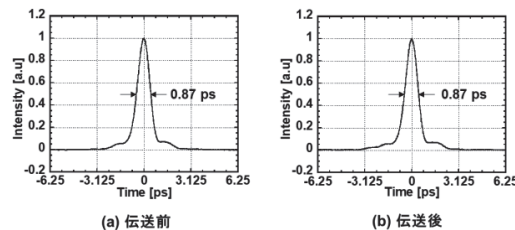


図 6 低非線形分散マネージ伝送路のパルス伝搬特性

く分散補償が実現できていることがわかる。

次に本伝送路を用いて行った伝送実験結果を示す。図 7 に伝送パワーに対する BER 特性を示す。三角が従来の伝送路、四角が新しい伝送路を用いた場合の特性に対応する。伝送路の低非線形化により、最適伝送パワーが 2 dB 増大し 7 dBm となった。これにより伝送後の信号の OSNR が 2 dB 増大し、BER は約 2/3 に低減した。図 8 に 160 km 伝送後の全トリビュタリの BER 特性を示す。全てのトリビュタリに対して、20 % オーバーヘッドの FEC の閾値である 2.0×10^{-2} 以下の BER を達成した。FEC のオーバーヘッドを 25.5 % から 20 % に低減したことにより、周波数利用効率を 8.3 から 8.7 bit/s/Hz に改善することに成功した⁶⁾。

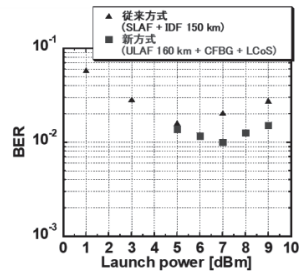


図 7 伝送パワーに対する BER 特性

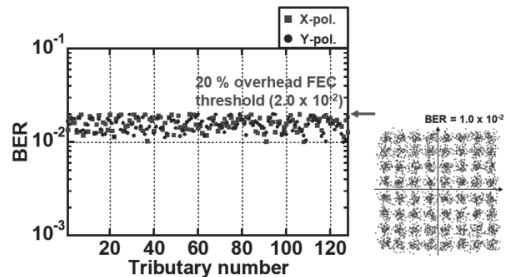


図 8 低非線形分散マネージ伝送路を用いた単一チャネル 15.3 Tbit/s-160 km 伝送の全トリビュタリの BER 特性とコンステレーションの一例

4. 超高速・大容量コヒーレントナイキストパルス長距離 WDM 伝送

次に、総伝送容量を単一チャネル伝送時から下げることなく伝送距離を拡大するために、シンボルレートを 1.28 Tbaud から 160 Gbaud に下げ、コヒーレントナイキストパルス WDM 伝送に新たに取り組んだ。シンボルレートは、1 チャネル当たりの伝送容量を 1 Tbit/s 以上に保つという指針に基づいて 160 Gbaud に設定した。1 チャネル当たりの伝送容量は、多値度が 64 QAM の場合は 1.92 Tbit/s/ch、32 QAM の場合は 1.60 Tbit/s/ch、16 QAM の場合は 1.28 Tbit/s/ch となる。

長距離 WDM 伝送の実現に向けて、多チャネルナ

イクストパルスの生成、長距離伝送用周回ループ伝送路の構築、周回ループ伝送路中の光増幅器の利得特性の高精度な平坦化(1周当たりの利得平坦性: < 0.1 dB)に取り組んだ。図9に多チャネルナイキストパルスの光スペクトルを示す。図9(a)、(b)および(c)はそれぞれ復調特性を評価するメインチャネル、ダミーチャネルおよびそれらを波長多重した OTDM-WDM 信号に対応する。ここで、1チャネルの信号帯域は160 GHz、ガードバンドは20 GHz に設定している。ダミーチャネルは22チャネル生成しており、メインチャネルを合わせた23チャネルの帯域は4.14 THzとなり、おおそC帯全域に対応する。図9(c)より、平坦性の高い信号が生成できていることがわかる。

図10に新たに構築した周回伝送系を示す。本周回伝送系では、前章で述べた低非線形分散マネージ伝送路を用いている。伝送路の入力部および出力部にはAOM(Acousto-Optic Modulator)スイッチ1および2を挿入しており、これによって信号の入出力を制御し周回伝送実験を行っている。また、図10の下部には1120 km(7周)伝送後の多チャネルナイキストパルスの光スペクトルを示している。Gain equalizer を用いて周回伝送系で使用しているラマン光増幅器および EDFA の利得特性を精度よく平坦化することにより、7周回伝送後にも平坦性の高いスペクトルが得られている。

図11に偏波多重160 Gbaud23チャネル WDM コヒーレントナイキストパルス信号の伝送距離に対する BER 特性を示す。丸が64 QAM、三角が32 QAM、四角が16 QAM の場合の特性に対応する。25.5%オーバーヘッド FEC 閾値である 3.8×10^{-2} 以下の BER が達成可能な最大伝送距離は64 QAM の場合160 km、

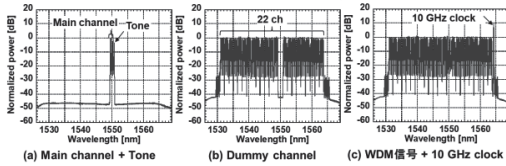


図9 多チャネルナイキストパルスの生成

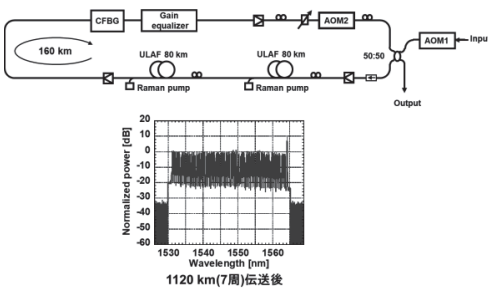


図10 周回伝送系と1120 km 伝送後の多チャネルナイキストパルスの光スペクトル

32 QAM の場合 640 km、16 QAM の場合 1120 km であった。16 QAM の場合に、1 Tbit/s/ch を超える高速なデジタルコヒーレント WDM 伝送の中で伝送距離が最長の1120 km 伝送を5.6 bit/s/Hz の周波数利用効率で達成した。

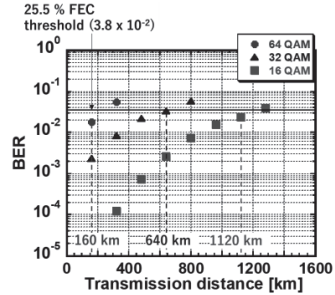


図11 偏波多重160 Gbaud23チャネル WDM コヒーレントナイキストパルス伝送における伝送距離に対する BER 特性

5. まとめ

コヒーレントナイキストパルス伝送技術により、世界最速の単一チャネル超高速伝送および1 Tbit/s/ch 以上の高速なデジタルコヒーレント伝送の中で伝送距離が世界最長の大容量 WDM 伝送を実現した。これらの成果を通じて、コヒーレントナイキストパルス伝送方式は、高い周波数利用効率を維持したまま高速化が可能であること、ならびに達成したい伝送距離に応じて Baud rate と多値度を最適化することで1~数 Tbit/s/ch の高速・大容量伝送システムを実現することができるという優れた特徴を明らかにした。一方で、ナイキストパルス伝送技術の課題としてはパルス光源や分散補償器(ハードウェア)、タイミング制御回路などを必要とすることによる回路の複雑さやコストの増大などが挙げられる。本伝送技術の実用性の向上に向けては、電子デバイスの改良が進み高分解能を有する高速 A/D が開発され、それを用いた DSP による多重分離(LO パルス不要)ならびに分散補償の実現が期待される。

文献

- 1) M. Nakazawa et al., Opt. Express, 20, 1129 (2012).
- 2) C. Boerner et al., OFC2005, OTuO3.
- 3) M. Yoshida, K. Kimura et al., Opt. Express, 27, 28952 (2019).
- 4) Proximion, <https://www.proximion.com/dispersion-compensation/>
- 5) G. Baxter et al., OFC 2006, OTuF2.
- 6) K. Kimura et al., ICETC2020, C2-4.