

修士学位論文要約（令和4年3月）

光ナイキストパルス伝送の長距離化に関する研究

渡邊 碧

指導教員：廣岡 俊彦

Study on Transmission Distance Extension of Optical Nyquist Pulse Transmission

Aoi WATANABE

Supervisor: Toshihiko HIROOKA

Driven by the rapid growth of global data traffic, high-speed transmission at a single-channel bit rate beyond 1 Tbit/s/ch has become an important research target. Recently, wavelength-division multiplexed (WDM) transmission at > 1 Tbit/s/ch has been reported. However, the transmission distance is still limited to < 1000 km. On the other hand, optical time-division multiplexing (OTDM) can realize an ultrafast symbol rate that exceeds the bandwidth limitation of electrical devices. We have proposed optical Nyquist pulse OTDM transmission and reported ultrahigh-speed single-channel transmission at 10-15 Tbit/s. The superior performance of Nyquist pulses demonstrated in such an extremely high-speed transmission is expected to be highly beneficial for applications to lower bit rates such as 1 Tbit/s, especially in terms of extending the transmission distance. In this thesis, 12.8 Tbit/s -1500 km WDM transmission using optical Nyquist pulses with a roll-off factor $\alpha=0$ is first presented. Furthermore, by optimizing α to 0.5, the transmission distance was extended to 2100 km at a bit rate of 10.2 Tbit/s.

1. はじめに

近年、インターネットトラフィックは世界規模で拡大を続けている。このため、基幹網の高速化が急務となっており、1 Tbit/s/ch を超える高速・大容量伝送の実現に向けた研究開発が進展している。しかしながら、高速化に伴い伝送距離は制限され、1000 km を超える長距離伝送については報告がない。一方、我々は光ナイキストパルス伝送を用いた超高速伝送技術を提案しており¹⁾、これまでに10~15 Tbit/s の超高速単一チャンネル伝送を実現してきた^{2,3)}。このようなナイキストパルスの優れた伝送性能は、超高速単一チャンネル伝送だけでなく、1 Tbit/s/ch 級の WDM 伝送の長距離化においても有用であると考えられる。本研究では初めに 1.28 Tbit/s のナイキストパルスを 10 チャンネル波長多重した 12.8 Tbit/s WDM 伝送実験を行い、1500 km 伝送に成功した。さらに、ナイキストパルスの帯域幅を定めるロールオフ率 α を最適化することにより、10.2 Tbit/s の伝送容量で 2100 km への伝送距離拡大に成功した。

2. 1.28 Tbit/s/ch WDM ナイキストパルス伝送系

実験系を図1に示す。測定チャンネル光源としては繰り返し周波数 40 GHz の光コムジェネレータを用いている。その出力光を 40 Gbaud で DQPSK 変調した後に 320 Gbaud に時間多重し、さらに偏波多重することで 320 Gbaud OTDM 信号を生成する。本信号を LCoS 素子を用いた Pulse shaper (#2)を用いてナイキストパルスに整形する。ダミーチャンネル光源としてはモード同期ファイバレーザを用いており、高非線形ファイバを用

いて帯域幅約 3.5 THz にスペクトル拡大する。測定チャンネルと同様に時間多重、偏波多重をした後に、帯域全体にわたってスペクトルが平坦となるように Pulse shaper (#1)を用いて整形する。この時、測定チャンネルに対応する周波数にはガードバンドを形成する。その他のチャンネルについては、後段の Pulse shaper (#2)を用いてナイキストパルスに整形し、測定チャンネルと合波する。また、クロック配信用トーンとして CW 光をクロック信号で強度変調した信号を生成している。次に、これらを合波した WDM 信号を 1 周 150 km の周回伝送路に入射する。受信部では Pulse shaper (#3)により測定チャンネル信号を波長多重分離し、非線形光ループミラー⁴⁾を用いて 320 Gbaud から 40 Gbaud へ OTDM 多重分離した後には遅延干渉計と Balanced-PD を用いて平衡検波し、BER(Bit Error Rate)をオフラインで測定した。

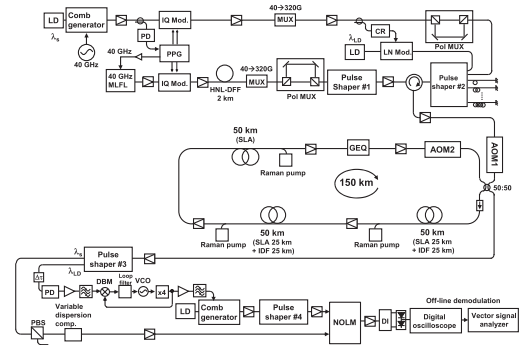


図1 1.28 Tbit/s/ch WDM ナイキストパルス伝送実験系

3. $\alpha=0$ のナイキストパルスを用いた 12.8 Tbit/s-1500 km 伝送実験結果

初めに、スペクトルが最も狭帯域となる $\alpha=0$ のナイキストパルスを 10 チャンネル波長多重し、WDM 伝送実験を行った。図2にWDM信号の光スペクトルを示す。図3(a)にWDM信号の中心に位置する Ch. 5 における BER の伝送距離依存性を示す。1800 km 伝送後においても 20%オーバーヘッド FEC(Forward Error Correction)閾値(2×10^{-2})を下回る BER が得られた。チャンネル間の BER のばらつきを考慮し、1500 km 伝送後において全チャンネルの BER 測定を行った。図3(b)に測定結果を示す。全 10 WDM チャンネルにおいて FEC 閾値を下回る BER が得られ、12.8 Tbit/s-1500 km 伝送に成功した。なお、この時の周波数利用効率は 3.0 bit/s/Hz であった。

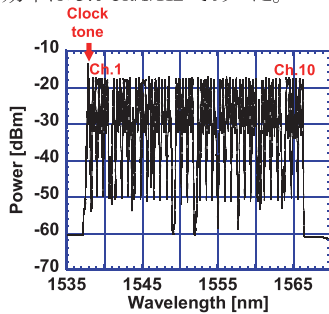


図2 WDM 信号の光スペクトル($\alpha=0$, 10 ch)

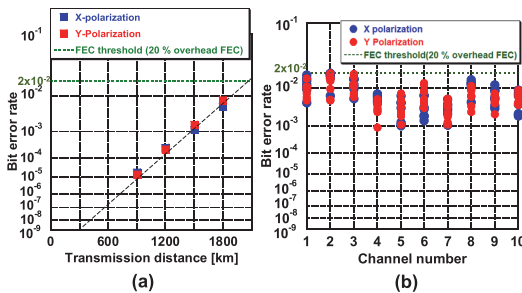


図3 BER の伝送距離依存性(a)及び 1500 km 伝送後における全チャンネルの BER(b)

4. ロールオフ率の最適化による 10.2 Tbit/s-2100 km 伝送実験結果

単一チャンネルのナイキストパルス伝送においては、伝送性能はナイキストパルスの帯域を定めるロールオフ率($0 \leq \alpha \leq 1$)に依存し、 $\alpha=0.5$ が最適であることが明らかになっている⁵⁾。先に取り組んだ 12.8 Tbit/s-1500 km 伝送では $\alpha=0$ に設定したが、チャンネル間相互位相変調の生じる WDM 伝送においても、ロールオフ率の最適化による伝送性能の向上が期待される。

そこで、初めに 1.28 Tbit/s/ch WDM 伝送において各ロールオフ率における BER の伝送距離依存

性を測定した。伝送後の OSNR が最も低い最短波長チャンネルにおいて全 OTDM トリビュータリの BER を測定し、その平均値とばらつきで評価した。図4(a)に測定結果を示す。平均値と比較すると、 $\alpha=0, 0.25, 0.75$ では 1800 km 伝送後においても FEC 閾値以下の BER が得られた。一方、 $\alpha=1$ では、これが 1500 km まで減少した。 $\alpha=0.5$ に設定することで 2100 km 伝送後においても FEC 閾値以下の BER が得られた。以上の結果より、WDM 伝送時においても単一チャンネル伝送と同様に $\alpha=0.5$ が最適値であった。

これを踏まえ、ロールオフ率を $\alpha=0.5$ に設定し、2100 km 伝送後において全 8WDM チャンネルの BER を測定した。図4(b)に測定結果を示す。全チャンネルにおいて FEC 閾値以下の BER が得られ、10.2 Tbit/s の伝送容量で 2100 km への伝送距離拡大に成功した。なお、周波数利用効率はロールオフ率を 0 から 0.5 に変更したため、2.1 bit/s/Hz となった。

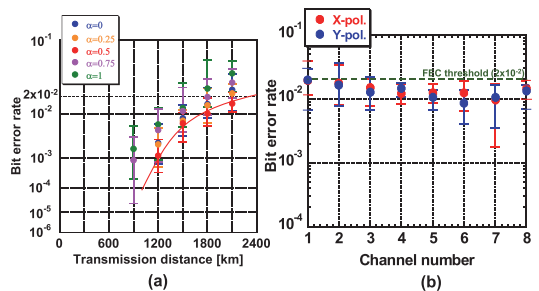


図4 各ロールオフ率における BER の伝送距離依存性(a)及び 2100 km 伝送後における全チャンネルの BER(b)

5. まとめ

本研究では 1.28 Tbit/s/ch WDM ナイキストパルス伝送実験系を構築し、ロールオフ率 $\alpha=0$ で 12.8 Tbit/s-1500 km 伝送に成功した。さらに、ロールオフ率を $\alpha=0.5$ に最適化することで、10.2 Tbit/s で 2100 km への伝送距離拡大に成功した。これは 1 チャンネルあたり 1 Tbit/s を超える WDM 伝送において世界最長となる伝送距離である。これらの結果より、1 チャンネルあたりの伝送速度が 1 Tbit/s を超える高速・大容量 WDM 伝送の長距離化における光ナイキストパルスの有用性を実証した。

文献

- 1) M. Nakazawa et al., Opt. Express **20**, 1129 (2012).
- 2) T. Hirooka et al., Opt. Express **26**, 27221 (2018).
- 3) M. Yoshida et al., Opt. Express **27**, 289532 (2019).
- 4) R. Hirata et al., IEICE Electron. Express, **16**, 20190664 (2019).
- 5) K. Harako et al., Opt. Express **24**, 21986 (2016).