

修士学位論文要約（平成29年3月）

## マッハツエンダ変調器の高周波重畠変調による 光ナイキストパルス発生の研究

五十嵐 稔

指導教員：八坂 洋， 研究指導教員：横田 信英

## A Study on Optical Nyquist Pulse Generation by Harmonic Superposition of Mach-Zehnder Modulator

Ryo IGARASHI

Supervisor: Hiroshi YASAKA, Research Advisor: Nobuhide YOKOTA

Due to increasing demands of the large capacity optical communications, optical Nyquist pulses having improved dispersion tolerance and high efficiencies in time and frequency domains have been attracting attention. The optical Nyquist pulse has a raised-cosine-shaped spectrum and an arbitrary waveform shaper was used to generate such a spectrum. However, from the viewpoint of space saving, high efficiency, and low cost, a simpler method without an arbitrary waveform shaper is desirable. In this research, we propose and demonstrate a novel optical Nyquist pulse generation method by using a Mach-Zehnder modulator operated under fundamental and harmonic RF signals to satisfy a condition of time domain optical Fourier transform. It is found that the measured temporal waveform of generated optical Nyquist pulse agrees well with the theory.

### 1. はじめに

近年、スマートフォンなど通信機器の普及や大容量コンテンツの増加に伴ってデータ通信量は毎年増加しており、今後も著しい増加が見込まれている。これら著しい通信需要の増加に対応するため、現在、様々な通信容量増大の取り組みが研究されている。光通信の分野においては、これまでに時分割多重方式や波長分割多重方式による通信容量増大が研究、実用化されてきている。しかしながらこれらの方針によるさらなる容量増大ではファイバに入射する光の強度が強くなり、ファイバが損傷を受けるという問題がある。そこで近年、光の強度だけではなく位相の情報を活用するデジタルコヒーレント技術が注目されており、大きな成果を上げている。そしてこれら次世代の通信システムの光源として注目されているのが光ナイキストパルスと呼ばれる光パルスである[1]。光ナイキストパルスは従来のガウシアン型光パルスに比べ2倍以上の周波数利用効率を有しており、さらにシンボルレートあたりの占有周波数帯域幅が狭いことから光信号の伝送において高次の群速度分散による波形劣化が小さく、長距離伝送にも適している。これまでに光ナイキストパルスの発生技術はいくつか提案されているがそのほとんどはマッハツエンダ(MZ)変調器を用いて生成した種パルスを任意波形整形技術によって整形するというものである。これは任意のパルス波形を発生できるという点で柔軟であ

るが、制御が複雑であり高コスト化を招く。そこで本研究では、MZ変調器に印加する変調信号を工夫し、適切に制御することで、任意波形整形技術を用いることなく光ナイキストパルスを発生させる技術の実現を研究目的とした。

### 2. 光ナイキストパルス

光ナイキストパルスのスペクトル振幅  $R(f)$  と電界振幅  $r(t)$  はそれぞれ式(1),(2)で与えられその様子を図1に示す。

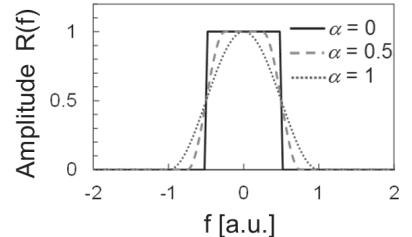
$$R(f) = \begin{cases} 1 & (0 \leq |f| \leq \frac{1-\alpha}{2T}) \\ \frac{1}{2} \left\{ 1 - \sin \left[ \frac{\pi}{2\alpha} (2T|f|-1) \right] \right\} & (\frac{1-\alpha}{2T} \leq |f| \leq \frac{1+\alpha}{2T}) \\ 0 & (|f| \geq \frac{1+\alpha}{2T}) \end{cases} \quad (1)$$

$$r(t) = \frac{\sin(\pi t/T)}{\pi t/T} \frac{\cos(\alpha\pi t/T)}{1 - (2\alpha t/T)^2} \quad (2)$$

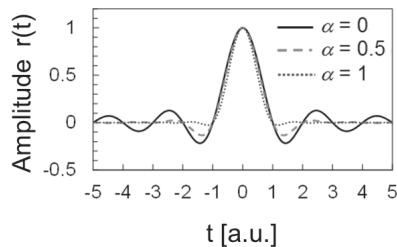
時間波形は周期的に強度が0になるという特徴を有しており、スペクトルは Raised-cosine 関数で表される。ここで  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) は Roll-off 率と呼ばれる定数であり  $T$  はゼロクロス周期である。

### 3. MZ変調器の高調波重畠変調による光ナイキストパルス発生

MZ変調器は外部から印加する変調信号によって入射光の強度を変調可能なデバイスである。ここで



(a) スペクトル振幅 (Raised-cosine 関数)



(b) 電界振幅

図1 光ナイキストパルスの特性

は、時間領域光フーリエ変換[2][3]の効果に基づく考察から、従来の変調信号に対して高調波を重畠する高調波重畠変調が光ナイキストパルス発生に有効であることを明らかにする。まず、高調波重畠変調において MZ 変調器に与える変調信号  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  を式(3)(4)に示す。

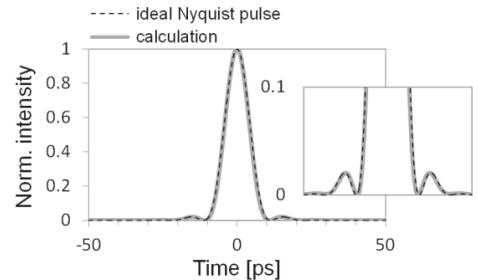
$$\phi_1 = A_1 \sin \omega_m t + \varphi_1 + A'_1 \cos 2\omega_m t \quad (3)$$

$$\phi_2 = A_2 \sin \omega_m t + \varphi_2 + A'_2 \cos 2\omega_m t \quad (4)$$

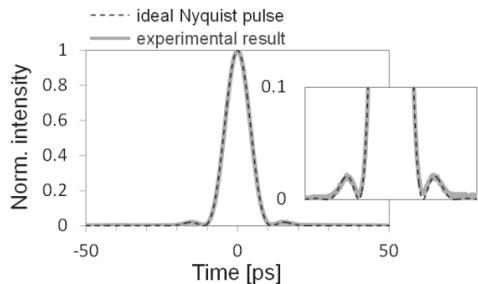
これは従来の基本波成分(正弦波)と直流成分に対して周波数が基本波の2倍である高調波を重畠する形となっている。変調信号の基本波、高調波それぞれの振幅と直流成分を適切に制御することで、Raised-cosine 型強度変調が施されたパルス幅を短縮し、2 次閾数型位相変調の成り立つ時間幅を拡張する。これらによって時間領域光フーリエ変換が適用可能な時間領域が拡張され、理想的なパルス変換が実現される。本手法で生成される光ナイキストパルスの強度波形の計算結果を図2 (a)に示す。ここで理想的な光ナイキストパルスの強度波形を破線で表しており、これらは概ね一致することが分かる。

#### 4. 光ナイキストパルス発生実験

以上の考察より光ナイキストパルス発生実験を試みた。実験は CW 光を MZ 変調器で適切に変調し、



(a) 数値計算結果



(b) 実験結果

図2 本手法によって発生する  
ナイキスト型パルス

さらに MZ 変調器の出力光を適切な長さのシングルモードファイバ(SMF)中で伝搬させ、スペクトル領域における位相の補償を行い、ナイキスト型パルスを発生させるという構成となっている。このときパルスの繰り返し周波数は 6GHz, SMF の長さは 6km となっており、これらに合わせて MZ 変調器に与える変調信号の基本波振幅、高調波振幅ならびに直流バイアスを数値計算から適切に設定した。強度波形の測定結果を図2 (b)に示す。実線が測定結果であり、破線で示す理想的な光ナイキストパルス形状 (Roll-off 率 0.46) に概ね一致することを確認した。

#### 5. まとめ

本研究では MZ 変調器に対して高調波重畠変調を行い、適切な条件下において制御することで、任意波形整形技術を用いることなく非常に簡便な構成で光ナイキストパルスが発生可能であることを数値計算、実験によって明らかにした。

#### 文献

- 1) D. O. Otuya et al, Opt.Exp.**22**, (2014) 23776 .
- 2) J. Azana Opt. Commun, **217**, (2003) 205.
- 3) T. Hirooka et al, IEEE Photonic Tech L.**16**, (2004) 2371.