

平成15年度 卒業論文

光3Rゲートの2次元マッピング解析とデジタル符号誤り率解析

0022022

永末 洋平

電子工学科 光エレクトロニクス講座

指導教官 上野芳康 助教授

提出日 平成15年2月5日

## 概要

現在、40 Gb/s 光信号伝送の最大伝送距離を拡大するために3R再生機能を備えた対称型マツエнда(Symmetric Mach-Zehnder, SMZ)3Rゲートの研究が進められている。近年、SMZ-3Rゲートの新たな解析方法が必要とされている。本研究では、2次元マッピングとデジタル符号誤り率(Bit Error Rate, BER)を利用した解析方法を開発し、SMZ-3Rゲート特性の初期解析を行った。

## 目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	本研究の背景	2
2.1	現在の超高速光通信システム	2
2.2	対称マッハツェンダ型(Symmetric Mach-Zehnder, SMZ)全光ロジックゲート	2
2.2.1	波長変換器(Delayed Interferometer Signal-Wavelength Converter, DISC)	2
2.2.2	SMZ-3R ゲート	2
2.2.3	SMZ-3R ゲートの基礎動作方程式	3
2.2.4	パターン効果	3
2.3	デジタル符号誤り率(Bit Error Rate, BER)理論	8
2.3.1	BER の基礎方程式	8
2.3.2	現在の BER 予測方法	8
第 3 章	本研究の目的と方法	10
3.1	本研究の目的	10
3.2	本研究の理論解析方法	10
3.2.1	従来の全光ロジックゲートシミュレータ	10
3.2.2	本研究で開発した 2 次元マッピング解析	10
3.2.3	本研究で開発したデジタル出力信号誤り率解析の方法	10
第 4 章	SMZ-3R ゲートの 2 次元マッピング解析	16
4.1	SMZ-3R ゲート内動作推定法開発	16
4.1.1	波長変換器の非線形光学位相シフト量推定	16
4.1.2	SMZ-3R ゲートの非線形光学位相シフト量推定	22
4.2	SMZ-3R ゲートの光強度抑制作用解析	30
4.2.1	入力パルスエネルギー依存性	30
4.2.2	光クロックパルスエネルギー依存性	30
4.2.3	最適な動作条件	31
第 5 章	Eye パターンの統計カラー表示方法の開発	34
5.1	統計カラー表示規則	34
5.2	カラー表示方法開発	34
第 6 章	SMZ 3R 再生 BER 解析	39
6.1	$10^{-6}$ 回 BER 計算解析シミュレータへの改造	39
6.1.1	Inner Loop の拡張	39

6.1.2	Outer Loop の挿入	39
6.1.3	入力信号擬似ランダム信号パターン(PRBS)の拡張	39
6.1.4	入力信号の Outer Loop 周回連続性の確保	40
6.1.5	入力信号の正規雑音分布	40
6.2	$10^{-6}$ 回 BER 計算時間見積り	47
6.2.1	ベンチマークテスト	47
6.2.2	$10^{-6}$ 回 BER 計算時間見積り	47
6.3	BER 計算 $10^{-6}$ 回への到達確認	49
6.4	BER を指標とする雑音耐性解析	51
6.4.1	BER 指標	51
6.4.2	SMZ-3R ゲートの雑音耐性	51
6.5	BER を指標とする光強度抑制作用解析	55
6.5.1	光入力信号パワー依存性	55
6.5.2	クロックパルスエネルギー依存性	62
第7章 結論		66
謝辞		67
参考文献		68
付録1 入出力強度頻度統計とカラー表示のためのサブルーチン		
付録2 正規分布の雑音を持った擬似ランダム入力信号のためのサブルーチン		

## 第1章 序論

超高速光通信システムでは光電変換の電気限界により、伝送速度が40 Gb/s以下に制限されている。また、ファイバ分散や強度雑音の蓄積により最大伝送距離が制限されている。そのため、光信号を3R再生する必要とされている。3R再生とは光信号を増幅、タイミング回復、整形することである。

これに対し現在までの研究では、対称マッハツェンダ型対称マッハツェンダ(Symmetric Mach-Zehnder, SMZ)3Rゲートによる42GHzの光3R再生が実証されている[1]。本研究では、比較的計算量の多い2次元マッピングと符号誤り率(Bit Error Rate, BER)を用いて、SMZ全光ロジックゲートの特性解析方法の開発と初期解析を行った。

## 第2章 本研究の背景

### 2.1 現在の超高速光通信システム

近年、インターネットなどの普及により通信ネットワークの高速化が求められている。現在の超高速光通信システムでは光電変換の電気限界により伝送速度が40 Gb/sに制限されている。また、ファイバ分散や強度雑音の蓄積により最大伝送距離も制限されている。40 Gb/sを超える超高速光通信システムでの超長距離伝送を実現させるためには光信号を光で3R再生する処理が求められている。

### 2.2 対称型マッハツェンダ(Symmetric Mach-Zehnder, SMZ)全光ロジックゲート

光信号を光のまま処理する全光処理はSMZ全光ロジックゲートにて実証されている。

#### 2.2.1 波長変換器(Delayed Interferometer Signal-wavelength Converter, DISC)

図2.1(a)に模式的なDISCの構造図を示した。

DISCはゲート窓を開かせるために光半導体アンプ(Semiconductor Optical Amplifier, SOA)を利用する。信号光をSOAに入力すると、SOA内のキャリア密度が急激に減少する(図2.2(a))、SOA内のキャリア密度が変化するとSOAの屈折率が変化し(図2.2(b))、SOAの利得変化(図2.2(c))と信号光の位相変調(位相シフト)が起きる。それから、SOAを通った信号光を二つの光導波路に通し時間差 $\Delta t$ を与える。一方の光導波路を通る信号光をphase shifterで位相をずらし(位相バイアス)、二つの信号を干渉させるとゲート窓が開きます(図2.3(a), (b))。ゲート窓に連続光を通すことによって出力を得られます(図2.3(c))。[2]

#### 2.2.2 SMZ-3Rゲート

図2.2(b)にSMZ-3Rゲートの構造を示した。

SMZ-3Rゲートの信号光は分光され長さの異なる光導波路を通り時間差 $\Delta t$ を与えられる。次に異なったSOAに入力され、信号光の位相が変調される。その後、一方の信号光にphase shifterで光位相がずらし、干渉したときにゲート窓が開く。ゲート窓が開いたときにクロックパルスを通すことで光信号の3R再生を行うことができる[2]。

## 第7章 結論

全光ロジックゲートの動作特性を網羅的に2次元マッピングする解析方法、及び、ゲート出力のデジタル符号誤り率を解析する方法を開発し、それぞれの実例を示した。これらの方法は今後、強力な光ロジックゲート解析方法として役立つと考えられる。本研究の解析対象には、主にSMZ型ロジックゲートの3R再生動作(増幅、整形、タイミング回復)を選んだ。波形劣化した高速光通信信号を光のまま3R再生する全光ゲート機能である。

2次元マッピング解析では、ゲート内部の非線形位相シフト量推定方法とゲート動作条件探索方法の開発を試みた。ゲート内部の非線形位相シフト量推定方法については、ゲート出力波形の位相バイアス依存性を2次元マッピングすることにより、 $0.30\pi\sim 0.60\pi$ の範囲で $\pm 15\%$ の確度で推定可能と考えられる。ゲート動作条件探索法については、SMZ-3RゲートQ値の入力パルスエネルギーとクロックパルスエネルギー依存性を2次元マッピングすることにより、入力パルスエネルギーとクロックパルスエネルギーの比が10~20であるとき、ゲート動作が最適となると考えられる。

一方、デジタル符号誤り率解析では、 $3\times 10^6$ 回のゲート出力波形計算によるゲート動作条件探索方法の開発を試みた。雑音抑制作用については、本3Rゲートが許容できる光信号雑音量の最大値、および、雑音分布圧縮度を解析した。解析の結果、まず、本3Rゲートが許容できる光信号雑音量の最大値は光信号Q値換算で6.0dBであった(許容条件: 符号誤り率=  $1e5$ )。この許容雑音量は、デジタル受信の理論限界値と同一である。従って本3Rゲートによる3R処理の価値は、光増幅中継等による雑音の蓄積(つまり雑音分布の拡大)を回復する点にある。本3Rゲートによる雑音分布圧縮度を系統的に解析した結果、無エラーデジタル判定閾値範囲が1.30~3.85倍に拡大することが明らかになった。ゲートの光強度抑制については、ゲート動作の許容範囲として、

(1)入力信号パルスと入力クロックパルスのパルスエネルギー  $> 6.25 f J$

(2)入力クロックパルスエネルギー  $>$  入力信号パルスエネルギー

などを導き出した。

本研究では、以上述べた網羅的解析手法や大容量計算解析手段を開拓し、かつ、初期的な解析結果を生み出した。いずれも、当技術分野の従来研究で行われたことの無い、新しい研究手法である。今後の全光ロジックゲートの研究開発にとって有効な研究手法と考えられる。

<謝辞>

本研究を含む様々な面でのご指導をいただきました上野芳康助教授に深く感謝をいたします。  
また、上野研究室の大学院生、学部生の方々には大変多くの助言、助力をいただき感謝をいたします。

[参考文献]

- [1] H. J. Thiele, A. D. Ellis and I. D. Phillips, 'Recirculating loop demonstration of 40Gb/s all-optical 3R data regeneration using semiconductor nonlinear interferometer,' *Electronics Letters*, Vol. 35, No. 3, 4th February 1999
- [2] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima, 'Nonlinear phase shifts induced by semiconductor optical amplifiers with control pulses at repetition frequencies in the 40-160 GHz range for use in ultrahigh-speed all-optical signal processing,' *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol. 19, no. 11, pp. 2573-2589, Nov. 2002.
- [3] Y. Ueno, "Theoretically predicted performance and frequency-scaling rule of a symmetric Mach-Zehnder optical 3R gating," submitted to *Opt. Comm.* [with jitter tolerance]
- [4] B. Lavigne, E. Balmefrezol, P. Brindel, L. Pierre, B. Dagens, R. Brenot, B. Thedrez, M. Tenaud and O. Leclerc, "Operation Margens Of A SOA-Based 3R Regenerator For 42.66Gbit/s ULH Transmission Systems"
- [5] Nakamura, S.; Ueno, Y.; Tajima, K.; Sasaki, J.; Sugimoto, T.; Kato, T.; Shimoda, t.; Itoh, M.; Hatakeyama, H.; Tamanuki et al. , "Demultiplexing of 168-Gb/s data pulses with a hybrid-integrated symmetric Mach-Zehnder all-optical switches," *IEEE Photonics Technology Letters*, Volume 12, Issue 4, 2000, Pages 425-527