

平成 22 年 6 月 17 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008 ～ 2009  
 課題番号：20760254  
 研究課題名（和文） 周波数スワッピングによる、光直交振幅変調と同等の単側波帯多値光振幅変調の実現  
 研究課題名（英文） An optical single-sideband multilevel modulation with an optical-frequency swapping technique for huge-capacity communication equivalent to optical quadrature amplitude modulation  
 研究代表者  
 千葉 明人（CHIBA AKITO）  
 独立行政法人行政法人情報通信研究機構・新世代ネットワーク研究センター先端 ICT デバイスグループ・専攻研究員  
 研究者番号：30435789

研究成果の概要（和文）：本研究では、大容量光通信技術への寄与を目指して、外部光源を用いることなく2つの光信号の光波長を入れ替える「周波数スワッピング」がrf信号により駆動されたニオブ酸リチウム光デバイスにより実現できることを理論・実験の両面から示した。また多値の単側波帯光変調において、光変調信号を生成する光変調器の構成要素である光分岐導波路の分岐比の非対称性が不要成分抑圧比の増大に有効であることを数値解析により示した。

研究成果の概要（英文）： For contribution to huge-capacity optical communication, “optical frequency swapping” is demonstrated by use of a Lithium-Niobate optical device driven by rf signals without use of any lightsources.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009 年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：光通信工学・応用光学

科研費の分科・細目：電気電子工学 ・ 通信・ネットワーク工学

キーワード：周波数スワッピング・光スイッチ・光ノード・単側波帯光変調・光周波数交換

## 1. 研究開始当初の背景

近年バックボーン光ネットワークにおける情報伝送量は莫大な増加を続けており、光の特長を総活用した光通信方式の提案が余儀なくされている。特に多値の信号を光波に重畳する技術(多値光変調)が注目を集めている。変調信号の電気帯域を低く抑えられることに加え、占有周波数帯域の狭窄化や分散耐性の向上も期待できるため、伝送容量増大の突破

口として有力視されている。周波数利用効率に着目すると、光の振幅・位相の両方に多値信号を重畳させる光直交振幅変調 (QAM)が秀でており、光QAMに関しても2006年以降の1、2年の間に国内の幾つかの研究機関が実験室レベルで実現に成功している[1 - 3]。しかし変調光に対して位相が同期した局部発振光が復調時に必要となり、光変調の場合は特に、局部発振光の位相同期の安定化が実用上の大

きな課題である。これを避けるための光信号検波後のデジタル信号処理法も提案されているが、デジタル信号処理装置の高速化が実用上の前提となっており技術的なハードルは依然として高い。これらの事から、光の位相同期や高速電気信号処理を要しない簡便な受信器構成で、伝送容量・周波数利用効率が高い光変復調方式は有用な技術となり得る。

一方、アナログ変調フォーマットに顧みると、簡便な復調が可能な変復調方式として単側波帯(Single Side Band:SSB)変調がよく知られている。搬送波(キャリア)の同時送信により直接検波で受信が可能という点に加えて占有周波数帯域が変調レートと同程度で済む特長がある。4値の振幅変調(4-ASK)信号に対する光SSB変調信号を例にとると、この周波数利用効率は16QAMと同じであり、周波数利用効率・復調の簡便性を兼ね備え上述の技術的課題を克服した方式となる可能性がある。従来の光SSB変復調により光QAMと同等の伝送容量を実現するためには2つの側帯波を要するため、搬送波・光変調器・受信器各二つが必要になる。一方、2つのデータ列を上側波帯・下側波帯の各々に重畳させると搬送波は1つで済み、また近年の光集積デバイス技術の進展に伴い従来の光SSB変調器2台の単一集積化が可能であることも示されている[3]。しかし上述のような信号に直接検波を施すと、各側帯波のスペクトル配置が搬送波に対して線対称であるため各データ列の混信が生じ、何らかの形で各データの分離を可能とする必要がある。一つの方法として、直接検波を施す前に上側波帯・下側波帯のいずれかに搬送波を重畳した上でスペクトル配置を交換(周波数スワップ)しておくことが考えられる。このような信号操作が可能となれば、搬送波に対する各側帯波の相対周波数のオーバーラップが生じないため、信号を一括で検波しても、各側帯波に重畳されたデータを分離して復調できる可能性がある。一方で、周波数スワップを施す光デバイスの提案は本補助金申請時に於いて皆無と言える状況であり、手法の開拓が実現の前提であった。それに加え、SSB変調を光波に対して適用するこれまでの試みは主に二値信号に対するものが主で多値信号に対して単側波帯光変調を施した場合の知見が十分に得られているとは言い難い状況にあったと言える。特に単側波帯光変調信号の多値化による高密度伝送を実現するためには、光信号に含まれる不要周波数成分(抑圧されるべき側帯波成分)の抑圧比が十分確保されている必要があり、多値の光SSB変調そのものに関しても、光信号生成の方法や不要側帯波抑圧比等の検討も必要となった。

[1] M. Nakazawa, *et al.* : Elec. Lett. **42**, pp.57-58 (2006). [2] A. Chiba, *et al.* : OECC/IOOC2007,

12B3-4, pp.342-343 (2007). [3] T. Sakamoto, *et al.* : ECOC2007, PD2.6 pp.1-2 (2007).

## 2. 研究の目的

本研究では、直接検波が可能で周波数利用効率・伝送容量の増大に繋がる単側波帯多値光変調を実現する要素技術の検討を通じてその有用性を示し、光通信技術の新たな礎を築くことを目的とした。まず周波数スワップに関するもので、申請時点で研究代表者により既に得られていた着想に基づいて、上述の信号スペクトル操作を光波に対して実現する手法に関する検討を理論・実験の両面から進めた。また光変調器の導波路構造の最適化による不要側帯波成分の抑圧に関する検討を進めた。

## 3. 研究の方法

まず周波数スワップの原理の概略を記す。用いる光デバイスは、図1に示す通り2つの方向性結合器で構成されたbalanced-bridge型の光スイッチの各アームにマッハツェンダー(MZ)構造を入れ子にしたもの[4]で、光信号に対して2入力2出力のポートを持つ。

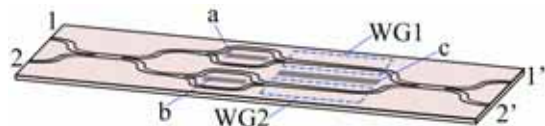


図1 周波数スワップ用光デバイス。a, b, c: 光路長制御・データの電気/光変換用電極; 1, 2: 光入力ポート; 1', 2': 光出力ポート。WG1, WG2: 光導波路。

各MZ構造のバイアス点をヌル点(光波の強度透過率が最小となる条件)にセットし、電極a, b それぞれに、位相を互いに直交させたrf信号(周波数:  $f_0$ )を入力する。この時、各MZ構造の光出力として、奇数次のサイドバンドが生成される。各MZ構造の光出力の位相を同次数のサイドバンド毎に比較すると、例えば+1次のサイドバンドが同相の場合、-1次のサイドバンドは逆相となる。この位相差を、電極cのバイアス電圧を介して調整することにより一方のサイドバンドのみを打ち消し、rf信号周波数に等しい光周波数シフトを発生させる。この周波数シフトの正負は光の入力ポート・出力ポートの組み合わせに依存し、方向性結合器における光位相シフトのポート依存性に起因するものである。即ちポート1・ポート1'をそれぞれ入力・出力ポートとした時に $+f_0$ の光周波数シフトが生じた場合、ポート2・ポート1'をそれぞれ入力・出力ポートとした時には $-f_0$ の光周波数シフトが生じる。上述の着想の裏づけとしてまず、理想的な特性を有する上述の光デバイスがrf信号により駆動された状態を数学的に記述し、光入出力の状態変化を理論的に解析した。

また理論的解析による結果に基づいて、ニオブ酸リチウム上に集積した上述の構造の光デバイスの各MZ構造をrf信号(周波数: 10GHz)により駆動させ、出力光のスペクトルを観測し、動作の裏づけを試みた。

続いて、多値の光SSB信号における不要側帯波の抑制に関する検討を進めた。単側波帯光変調の場合、もとの変調信号 $d(t)$ に加えてその共役信号 $h(t)$ が信号生成に必要となり、一般に $h(t)$ のピーク値は $d(t)$ に比べて高くなる。この大小関係に対応するものとして、分岐パワー比が非対称のY分岐導波路を用いて $h(t)$ を生成する導波路構造への入力光振幅を $d(t)$ に比べて強くした場合を想定し、Y分岐の分岐比と不要側帯波の抑圧比との関係を数値的に解析した。

[4] A. Chiba, *et al.*: IEEE Phot.Tech. Lett. **20**, 872 (2008).

#### 4. 研究成果

まず、周波数スワップの動作に関する理論的解析の結果を記す。

入力/出力ポートの番号がそれぞれ $k/l'$  ( $k, l'$ ともに、1 または 2)のポート間の光透過率を $t_{kl'}$ とすると

$$t_{kl'} = \frac{E_0(t)}{2} \left[ \exp \left\{ -i\pi \frac{k+l}{kl} + i\frac{\theta}{2} \right\} \cos \left( \frac{\pi}{2} + A \cos(2\pi f_0 t) \right) - \exp \left\{ i\pi \frac{k+l}{kl'} - i\frac{\theta}{2} \right\} \cos \left( \frac{\pi}{2} + A \sin(2\pi f_0 t) \right) \right], \quad (1)$$

と記述できる。ここで $E_0(t)$ 、 $A$ はそれぞれ、入力光の複素振幅、入力rf信号の振幅を表す。 $\theta$ は各MZ構造後段の光導波路の光路長差で、電極 $c$ への入力電圧により制御する。(1)式の第一項目・第二項目はそれぞれ、図1の上部・下部のMZ構造を通過した光に対応する。光導波路の構造の対称性により、 $t_{12'}$  および  $t_{22'}$  はそれぞれ $t_{21'}$ 、 $-t_{11'}$  に等しくなる。 $t_{kl'}$  を級数展開すると、(1)式は次のようになる。

$$t_{kl'} = E_0 \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} [C_n(k, l', \theta) J_{2n+1}(A) \exp\{i(2n+1)2\pi f_0 t\}],$$

$$C_n(k, l', \theta) = \exp \left( -i\pi \frac{2 + (-1)^n}{4} \right) \times \cos \left( \frac{\theta}{2} - \frac{(-1)^n}{4} \pi - \frac{k+l'}{kl'} \pi \right). \quad (3)$$

$C_n(k, l', \theta)$  は展開係数で、 $n$ 次のサイドバンドの振幅に相当する。ここでrf信号振幅 $A$ が $0.12\pi$ 以下の場合、 $n > 3$ のベッセル関数 $J_n(A)$ の大きさが $J_1(A)$ に対して十分小さくなるため、 $\theta$ を $-\pi/2$ とした時の $t_{11'}$ および $t_{21'}$ は

$$t_{11'} = E_0 J_{-1}(A) \exp[i(-2\pi f_0 t - \pi/4)] \\ = -E_0 J_1(A) \exp[i(-2\pi f_0 t - \pi/4)], \quad (4)$$

$$t_{21'} = -E_0 J_1(A) \exp[i(2\pi f_0 t + \pi/4)], \quad (5)$$

のように近似できる。この結果から、ポート1・ポート2から入力した光の周波数シフトの符号が互いに逆となっている事が分かる。即ち、各ポートへの入力光の周波数差に等しいrf信号周波数として各MZ駆動を駆動することにより、各光信号の周波数が交換されてデバイスから出力される事になる。

この動作を確かめるために、ニオブ酸リチウム上に集積した上述の構造の光デバイスの各MZ構造をrf信号(周波数: 10GHz)により駆動させ、出力光のスペクトルを観測した。図2に、各ポートに同じ波長の光を入力した場合の、ポート1'からの出力光のスペクトルを示す。実線・点線はそれぞれ、光の入力ポートがそれぞれ1、2'の場合に対応している。rf周波数に等しい周波数シフトが得られていること、その正負が入力ポートに依存していることを実験的に示すことに成功した。別の光出力ポートに対しても同様の傾向を確認することができ、国内の研究会や国際会議での発表や特許出願に至っている。またこの実験は光デバイスのバイアス制御方法や立ち上がり時間の評価・クロストークの影響等各種基礎特性の評価の足がかりにもなり、派生的に得られた幾つかの研究成果も国際会議に採択され発表を行った。

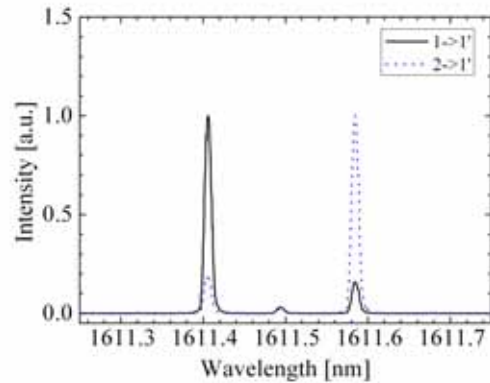


図2 光信号を入力した周波数スワップ用光デバイスからの出力信号の光スペクトル。

また、多値の光SSB信号における不要側帯波の抑制に関して、光共役信号を生成する側への光パワー分岐比をもとの光変調信号に対して約1.8倍にした場合に、分岐比が等しい場合と比べて3dB強の不要側帯波抑圧比の向上が得られることを確認し、単側波帯光変調における非対称導波路構造の有用性が示された。この過程を通じて、通常的光SSB変調器の構造により生成される光QAM信号に含まれる歪みに着目することができ、その対策手法の着想にも繋がった。多値光変調信号の歪みに対して順応的に設定した信号閾値を復調に用いるものであり、それに関しても論文の採択・公表に至った。

5. 主な発表論文等  
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

1. A. Chiba, T. Sakamoto and T. Kawanishi: Adaptive threshold adjustment for signal-distortion-free digital-coherent optical demodulation system, Optics Express **16**, 21647 (2008). (査読有)

[学会発表](計8件)

1. 千葉明人、坂本高秀、川西哲也、日隈薫、須藤正明、市川潤一郎: モノリシック4並列光変調器により生成した16値光直交振幅変調信号の75kmシングルモードファイバ伝送、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、2009年7月29日発表予定(掲載決定済)、北海道大学学術交流会館、北海道札幌市

2. 千葉明人、坂本高秀、川西哲也、日隈薫、井筒雅之: 干渉型2x2光スイッチに集積化されたマッハツェンダー構造の光路長差制御、2010年秋季第71回応用物理学会学術講演会、2009年9月14日発表予定(掲載決定済)、長崎大学文教キャンパス、長崎県長崎市

3. A. Chiba, T. Sakamoto, T. Kawanishi, K. Higuma, M. Sudou and J. Ichikawa: 16-level Optical Quadrature Amplitude Modulation using Monolithic Quad-Parallel Mach-Zehnder Optical Modulator and Signal Transmission over 75-km Single-Mode Fiber, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2010, CThC1, presented at May 20<sup>th</sup>, 2010, The Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, U.S.A.

4. 千葉明人、坂本高秀、川西哲也、日隈薫、井筒雅之: 光強度トリマを備えた干渉型光スイッチにおける光側帯波生成を利用した光信号波長交換手法、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、OPE2009-63(vol. 109, No.159, p.181)、2009年7月31日発表、旭川市民文化会館、北海道旭川市

5. A. Chiba, T. Sakamoto, T. Kawanishi, K. Higuma and M. Izutsu: Frequency Swapping Using an Optical Switch with Embedded Mach-Zehnder Structures for Wavelength-Converted Optical Signal Routing Without Lightsources, The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) 2009, CMJJ5, presented at June 1st, 2009, The Baltimore Convention Center, Baltimore, Maryland, U.S.A.

6. A. Chiba, T. Kawanishi, T. Sakamoto, K. Higuma and M. Izutsu: Guard-Time-Free Port

Selection by a LiNbO<sub>3</sub> Optical Switch Embedded Intensity Trimmers for Optical Packet Switching, Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) 2009, JThA35, presented at Mar. 26th, 2009, San Diego Convention Center, San Diego, CA, U.S.A.

7. A. Chiba, T. Sakamoto, T. Kawanishi, K. Higuma and M. Izutsu: Analysis of Crosstalk Impact on Optical Packet Signals in an Optical Cross-Bar Switch by Intensity-Trimming Method, Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and the National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) 2009, JWA19, presented at Mar. 25th, 2009, San Diego Convention Center, San Diego, CA, U.S.A.

8. 千葉明人、川西哲也、坂本高秀、日隈薫、井筒雅之: 光強度トリマを有するLiNbO<sub>3</sub>光スイッチによるガードタイムフリーの光信号経路制御、電子情報通信学会2009年総合大会、2009年3月18日発表、愛媛大学(愛媛県松山市)

[産業財産権]

出願状況(計3件)

1. 名称: バイアス点調整機能を有する光変調器及びスイッチ  
発明者: 千葉明人・坂本高秀・川西哲也  
権利者: 独立行政法人情報通信研究機構  
種類: 特許  
番号: 特願2009-043106  
出願年月日: 2009年2月25日  
国内外の別: 国内

2. 名称: 光信号波長変換方法および光信号波長変換装置  
発明者: 千葉明人・坂本高秀・川西哲也  
権利者: 独立行政法人情報通信研究機構  
種類: 特許  
番号: 特願2009-043146  
出願年月日: 2009年2月25日  
国内外の別: 国内

3. 名称: バイアス点調整が可能な複数のマッハツェンダー構造を有する光変調器  
発明者: 千葉明人・坂本高秀・土屋佑太・川西哲也  
権利者: 独立行政法人情報通信研究機構  
種類: 特許  
番号: 特願2009-042975  
出願年月日: 2010年2月26日  
国内外の別: 国内

取得状況(計0件)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

千葉 明人 (CHIBA AKITO) 独立行政法人  
情報通信研究機構・新世代ネットワーク  
研究センター先端 ICT デバイスグループ・  
専攻研究員  
研究者番号 : 30435789

(2)研究分担者

( )

研究者番号 :

(3)連携研究者

( )

研究者番号 :