

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630168

研究課題名(和文) 広帯域光VCOによるコヒーレント光通信高精度光位相制御技術の確立

研究課題名(英文) Study on precise optical phase control technique by employing a wideband optical voltage controlled oscillator for coherent optical communication

研究代表者

葛西 恵介 (KASAI, KEISUKE)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80534495

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では超多値コヒーレント伝送への応用を目指し、狭線幅レーザとAOM (Acousto-Optic Modulator)を用いた広帯域狭線幅光VCO(Voltage Controlled Oscillator)の開発に取り組んだ。InPを媒質としたAOMを用いることにより、0.1 dB-応答帯域が ± 2.5 MHzの光VCOを実現した。本AOMとファイバレーザを組み合わせ、光VCO-PLL回路を開発し、これを用いて120 Gbit/s偏波多重64QAM信号を150 km伝送することに成功した。本成果はAOM型光VCO-PLLを用いて初めてコヒーレント伝送に成功したものである。

研究成果の概要(英文)：With the aim of applying to ultra-multilevel coherent optical communication, I have developed a wideband, narrow linewidth optical voltage controller (OVCO) by using an acousto-optic modulator (AOM) and a narrow linewidth laser. By employing a InP-based AOM, I have realized a wideband OVCO with a 0.1 dB-frequency response bandwidth of ± 2.5 MHz. With an optical phase-locked loop (PLL) circuit consisting of the present OVCO and a 1.5 μm narrow linewidth fiber laser, which enables us to realize carrier phase synchronization between the transmitted data and the LO signal, I have successfully transmitted a 120 Gbit/s 64 QAM data over 150 km. This is the first time coherent transmission with an AOM-based OVCO-PLL system.

研究分野：光通信工学

キーワード：信号処理 光PLL 音響光学変調器 コヒーレント光通信

1. 研究開始当初の背景

近年光通信の分野では光の振幅と位相に同時に情報を乗せる多値コヒーレント光伝送の研究が進展している。このような伝送システムでは、データ信号と局発信号との光位相同期技術が不可欠である。特に多値度の高い信号を正確に復調するためには光 PLL 回路が重要な役割を果たす。低雑音な光 PLL を実現するには、狭線幅で広帯域な FM 特性を有する局発光源が重要となる。しかしながら一般的な半導体レーザは FM 帯域が十分広くない。そのため広帯域な FM 特性を有する局発光源として光 VCO 方式が提案されている。本方式では変調によって光サイドバンドを生成し、変調器を駆動する RF-VCO によってこの位相を制御する。これによりレーザ自身の FM 帯域に依存しない光 PLL が可能となる。これまで、狭線幅レーザと LN(LiNbO₃)強度変調器または位相変調器を組み合わせた光 VCO による、光 PLL 回路が実現されている。光 VCO に用いる変調器としては、サイドバンドが複数生成される光強度または位相変調器より、一本のみ生成できる音響光学変調器(AOM: Acousto-Optic Modulator)のほうが所望の信号のパワー(光 S/N)を大きくできるため好適である。しかし AOM は変調周波数を変化させる出力信号の偏向角が変わるため、固定の空間結合系で出力を取り出す一般的な構造では周波数変化によって損失が増大し、広帯域な動作が困難である。そのためこれまで AOM を用いた光 PLL 回路は実現されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では超多値コヒーレント伝送への応用を目指し、狭線幅レーザと InP を材料とした高速 AOM (Acousto-Optic Modulator)を用いた広帯域光 VCO (Voltage Controlled Oscillator)を開発し、これを用いた高精度光 PLL 回路を実現する。

3. 研究の方法

(1) InP は一般的に AOM に用いられている材料、例えばカルコゲナイトガラス、二酸化テルル、熔融石英といった材料と比較して音響波の伝播速度が速いため、変調周波数を数 GHz まで高速化でき、これにより FM 特性の広帯域を期待することができる。本研究ではまず、InP を用いた広帯域 AOM を作製する。これと狭線幅ファイバレーザを組み合わせ構築する光 VCO を用いて光 PLL 実験を行い位相同期特性の評価を行う。

(2) 偏向角度に依存することなく出射点へ光波を反射できるキャッツアイ光学系を出力部に配置し、反射された回折光を入力端において偏波ビームスプリッタまたはサーキュレータで取り出す往復型の AOM を作製する。これにより出力強度の偏向角依存性の問題を解決し、広帯域化を図る。

(3) InP AOM を用いた光 VCO-PLL 回路を用いて多値デジタルコヒーレント伝送を行い、本回路の有用性を実証する。

4. 研究成果

(1)InP-AOM の作製とこれを用いた光 VCO-PLL の評価

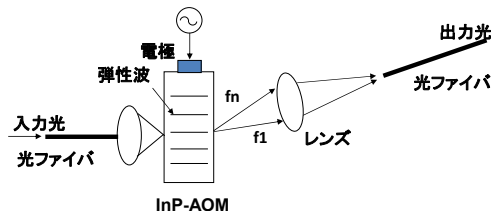


図 1. InP-AOM モジュールの構成

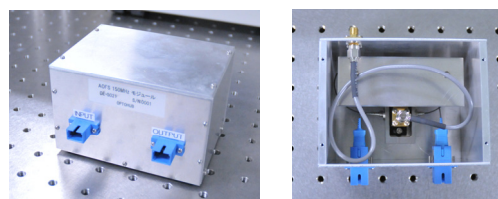


図 2. InP-AOM の外観

表 1. AOM の仕様

項目	仕様
中心周波数	150 MHz
材料	InP
Optical damage threshold	5 W/mm ²
Active aperture	0.5 mm
Blagg angle	23 mrad.
Optical transmission	95 %
Acoustic velocity	5100 m/s
Optical polarization	Linear
RF power	1.5 W

本研究では InP を材料とした AOM を用いて光ファイバ結合型のモジュールを作製した。図 1、2 はそれぞれ作製した AOM モジュールの構造、外観である。また表 1 には AOM の仕様を示す。用いた InP-AOM は動作中心周波数が 150 MHz、ブラッグ角が 23 mrad、音速 5100 m/s という特性を有している。一般的にブラッグ角 θ は媒質の屈折率 n 、光信号波長 λ 、音響速度 V_a 、変調周波数 f_m を用いて下記の式(1)で表すことが出来る。

$$\theta = (\lambda - f_m) / (2n \cdot V_a) \quad (1)$$

上式より音響速度 V_a が大きいほうがブラッグ角が小さくなるのがわかる。したがって固定のレンズで AOM への光入出力系を構築する場合、ブラッグ角度が小さいほど Δf_m に対する応答帯域が広がる。

図 3 は本 AOM の応答特性である。本特性は f_m を変化させて出力強度の変化を測定した。この図より本 AOM は ± 2.5 MHz の 0.1 dB-帯域を有していることがわかる。通常の AOM ではこの帯域が ± 100 kHz 程度である

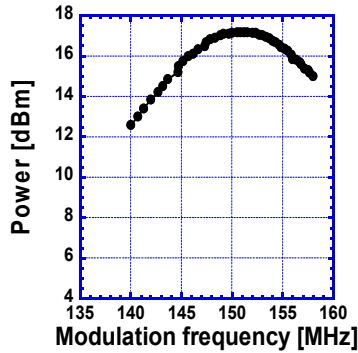


図 3. InP 応答特性

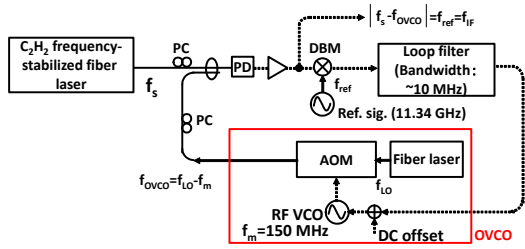


図 4. 光 PLL 実験系

ので、本 AOM は通常の AOM と比較して 25 倍程度広い応答特性を有している。

本 AOM とファイバレーザを用いて光 VCO を作製し、光 PLL 実験を行った。図 4 は実験系である。本光 PLL 回路は光 VCO、光検出器(PD)、Double Balanced Mixer (DBM)、シンセサイザおよび帯域 10 MHz のループフィルタから構成されている。光 VCO は線幅 4 kHz のファイバレーザ、InP-AOM、RF-VCO から成っている。送信用 CW 光源としては波長 1538.8 nm、線幅 4 kHz のアセチレン周波数安定化ファイバレーザを用いた。送信されてきた周波数安定化ファイバレーザの信号は LO 信号とヘテロダイン検出され、そのビート信号として IF 信号 (11.34 GHz) が得られる。IF 信号の位相は DBM において基準となるシンセサイザの信号の位相と比較され、その差は誤差電圧信号として検出される。本信号をループフィルタを介して RF-VCO へ帰還することにより、IF 信号は常に基準信号と同期した高安定な信号となる。

図 5(a)、(b) は電気スペクトラムアナライザにて観測した位相同期前後の IF 信号スペクトルである。位相同期が起こっていないときは揺らぎのあるビートスペクトルが観測されるが(図 5(a))、同期が起こると Δ 関数的な線スペクトルを得ることが出来る(図 5(b))。図 6(a)、(b) は位相同期時の IF 信号スペクトル (2 MHz) とその single sideband (SSB) 位相雑音スペクトル (10 Hz ~ 1 MHz) である。SSB 雑音スペクトルを積分して評価される本 IF 信号の位相誤差 (RMS) はおよそ 10 度であった。

(2) 往復型 InP-AOM の作製とこれを用いた光 VCO-PLL の評価

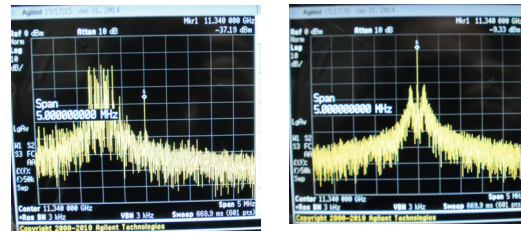


図 5. IF 信号スペクトル

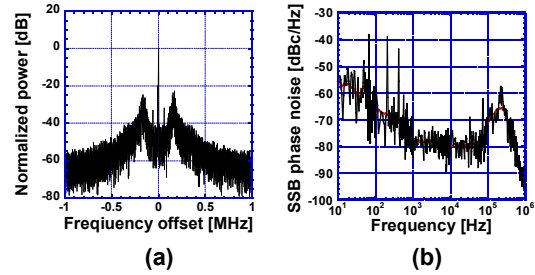


図 6. (a) IF 信号スペクトル (2 MHz span), (b) SSB 位相雑音スペクトル

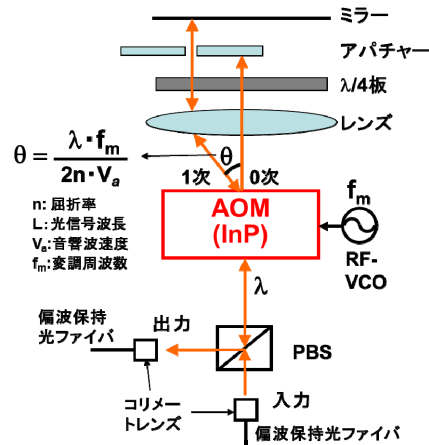


図 7. 往復型 AOM の構成

図 7 は往復型 InP-AOM の構成である。AOM の後段にキャッツアイとよばれる光学系を配置することで変調周波数が変化しても 1 次回折光はもとの位置に反射されて戻ってくる。アパチャーとレンズ間に $\lambda/4$ 板を挿入することで PBS (Polarization Beam Splitter) 用いて出力光を取り出すことができる。このような構成にすることで変調周波数の変化に対して損失が増大することなく広帯域な動作が可能となる。

本 AOM の応答帯域は ± 50 MHz 程度に広がったが、これを用いた光 VCO-PLL での位相雑音は逆に大きくなってしまった。この理由としては、光波と変調信号 (音響波) との相互作用が生じるまでの遅延時間が考えられる。本 AOM 素子では電極から印加された音響波が InP 中を伝搬し、光波と相互作用するまで $1 \mu s$ 程度時間がかかる。往復型の場合、単一

パス型に比べて 2 倍時間がかかるため、光 PLL における位相遅れが生じて制御帯域が狭くなり、その結果位相雑音が増大したと考えられる。単一パス AOM を用いた光 PLL においても、相互作用に係る遅延時間があるため、これ以上(図 6) 位相雑音特性を改善することが困難であった。

(3)InP AOM を用いた光 VCO 型 PLL 回路を用いた多値デジタルコヒーレント伝送

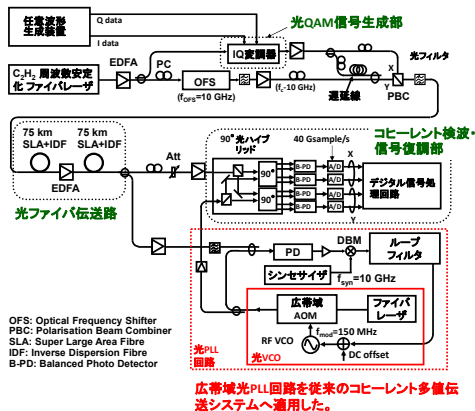


図 8. 多値コヒーレント伝送実験系

(1)で述べた InP-AOM 光 VCO 型 PLL 回路を用いて多値デジタルコヒーレント伝送実験に取り組んだ。図 8 は実験系である。送信光源としては周波数安定化ファイバレーザを用いた。本レーザの出力を増幅後に 2 分岐し、一方は AWG で駆動されている IQ 変調器へ入力され、10 GHz のシンボルレートで 64 QAM データ変調される。その後本データ信号は光カプラと偏波ビームコンバイナで構成される偏波多重回路へ入力され、直行する 2 つの偏波(X、Y)のデータ信号に多重化される。分岐されたもう一方の安定化レーザの出力光は LN 強度変調器と光フィルタで構成される光周波数シフタ回路へ入力され、キャリア周波数から 10 GHz ダウンシフトしたパイロットトーン信号が生成される。パイロットトーン信号は 2 つの偏波のデータ信号と合波され、ファイバ伝送路へ送出される。伝送路は SLA(Super Large Area)ファイバ 50 km と IDF(Inverse Dispersion Fibre)25km を組み合わせた 1 スパン 75 km の分散マネージ伝送路を 2 スパン(150 km)用いた。ここに -1 dBm(X、Y 偏波データ：-4 dBm/pol、パイロット：-12 dBm)のパワーで信号を伝送させた。

伝送後受信部においてはパイロットトーン信号を用いて光 VCO 信号とデータ信号の光位同期を行っている。位同期された光 VCO 信号は伝送されてきたデータ信号とともに $2 \times 8-90$ 度光ハイブリッド、差動 PD からなるコヒーレントホモダイン検波回路へ入力される。検波後、ベースバンド信号へ変換されたデータ信号は A/D 変換された後、DSP によってオフラインで復調される。

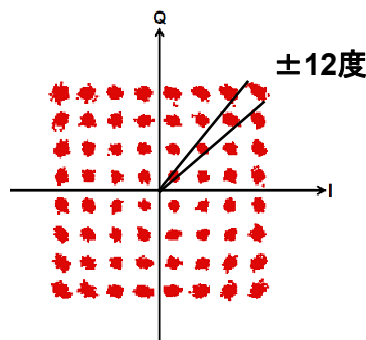


図 9. 非伝送時における復調後の 64 QAM 信号のコンスタレーション

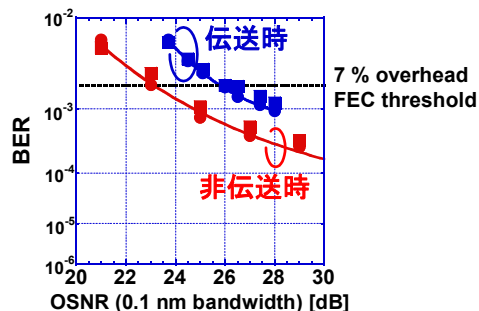


図 10. 120 Gbit/s, 64 QAM 偏波多重信号の符号誤り率特性

図 9 は非伝送時における復調後の 64 QAM 信号のコンスタレーションである。光 PLL の位相雑音が 10 度と大きいことからコンスタレーションにおよそ ± 12 度の位相回転が見られるが、すべてのシンボル点が明確に分離されており、復調することが出来ている。図 10 は光 S/N に対する符号誤り率特性である。光位同期回路における位相雑音が大きいため、非伝送時においてもエラーフリー復調は実現できておらずエラーフロアが見られるものの、7% over head FEC 閾値(2×10^{-3})以下の誤り率で 120 Gbit/s、64 QAM 信号を 150 km 伝送することに成功している。本成果は AOM 型光 VCO-PLL システムを用いて初めて多値 QAM デジタルコヒーレント伝送に成功したものである。

本研究では QAM 多値度のさらなる増大を目標としていたが、光 PLL の位相雑音が大きいため、符号誤り少なく復調することが困難であった。これを改善するためには AOM に入射する音響波と光信号の相互作用にかかる遅延時間の抑制が重要である。今後、AOM 素子の小型化やフィードフォワード制御方式の採用によって遅延の抑制を図ることで光 PLL の性能改善が期待される。光 PLL の性能が改善されれば、コヒーレント光伝送の多値度を増大することが可能になる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 0 件)

〔学会発表〕（計 0 件）

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nakazawa.riec.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

葛西 恵介 (KASAI, Keisuke)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：80534495