

Study on Laser-Diode Based Optical Phase-Locked Circuits and Their Application to Multi-Level Coherent Optical Transmission

著者	王 怡?
号	59
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5002号
URL	http://hdl.handle.net/10097/62841

氏名	おう いしん		
授与学位	王 怡昕 博士 (工学)		
学位授与年月日	平成26年9月24日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻		
学位論文題目	LD型光位相同期回路とその多値コヒーレント伝送への応用に関する研究		
指導教員	東北大学教授 中沢 正隆		
論文審査委員	主査	東北大学教授 中沢 正隆	東北大学教授 山田 博仁
		東北大学教授 八坂 洋	東北大学准教授 吉田 真人

論文内容要旨

Chapter 1 Introduction

To meet the rapidly growing demand for capacity in optical fiber networks, digital coherent optical quadrature amplitude modulation (QAM) transmission has been intensively investigated. Carrier-phase synchronization between transmitted data and a local oscillator (LO) is very important for this transmission. 2048 QAM transmission has been demonstrated by employing an erbium fiber laser (EFL)-based optical phase-locked loop (OPLL) circuit. By contrast, it has been difficult to realize a low phase noise OPLL circuit with a laser diode (LD) due to its broad linewidth, resulting in the need for an extremely wideband feedback circuit. Therefore, an LD-based OPLL system has not been applied to ultrahigh multi-level QAM transmission.

In this study, low phase noise LD-based optical phase-locked circuits are successfully developed by employing an optical voltage controller oscillator (OVCO) and an injection locking scheme which can realize a wideband feedback control. By applying these circuits to a multi-level QAM coherent transmission, the advantages of these schemes are demonstrated.

Chapter 2 QAM coherent optical transmission

This chapter describes the fundamental configuration and key components of a QAM coherent optical transmission system. Among them, highly precise carrier-phase synchronization is indispensable to realize an ultrahigh multi-level QAM coherent transmission. Here, particular attention is paid to the features and subjects of various optical carrier-phase synchronization technologies. In general, there are two kinds of carrier-phase synchronization technology, a carrier phase estimation method with digital signal processing (DSP) and LO feedback control system with an analog opto-electrical circuit.

Although carrier-phase estimation methods do not require an analog LO feedback system, a computational complexity becomes too high as the multiplicity of the data signal increases. As a result, precise demodulation of a high multiplicity signal

becomes difficult. In contrast, the precision of synchronization with analog systems does not depend on the data multiplicity, and therefore it is possible to realize extremely precise carrier-phase locking by expanding the feedback bandwidth.

Chapter 3 LD-based OPLL circuit

This chapter presents a low phase noise OPLL circuit with an OVCO consisting of a 4 kHz linewidth external cavity LD (ECLD), LiNbO₃ (LN) phase modulator, an RF-VCO. In a conventional OPLL circuit, where the LO phase was controlled by changing the LD injection current or the external cavity length with PZT, the feedback control bandwidth was limited to several hundred kHz due to the FM-bandwidth of the LD. On the other hand, that of the OVCO-OPLL circuit was independent of LD FM-bandwidth. With the OVCO scheme, the bandwidth was expanded over 4 MHz. As a result, an OPLL with a phase noise as low as 0.6 deg. was successfully realized.

Chapter 4 Optical phase-locked circuit with injection locking

This chapter shows further reduction of OPLL phase noise with an injection locking scheme. Here, it is newly found that there was an optimal value of the injection power to the slave laser which makes the phase noise minimum, and we realized the an extremely low phase noise carrier-phase synchronization.

Figure 1 shows a schematic diagram of injection locking. Two ECLDs are used both as a master laser and a slave laser. The injection seed from the master laser is injected into the slave laser via a circulator. Under a certain condition, the slave laser is

phase-locked to the master laser. The relationship between phase noise and injection power is shown in Fig. 2 (a). With an injection power from -30 dBm to 0 dBm, the phase noise is as low as 0.2 degrees. If the injection power is above 0 dBm or below -30 dBm, the locking becomes unstable. The locking range of the ECLD is expanded as the injection power increases as shown in Fig. 2 (b). From the two experiment results, it is found that the optimal injection power is 0 dBm, where an injection locking scheme with a locking range as wide as 1 GHz and an extremely low phase noise of 0.2 deg is realized.

Compared with an OVCO-based OPLL, the control

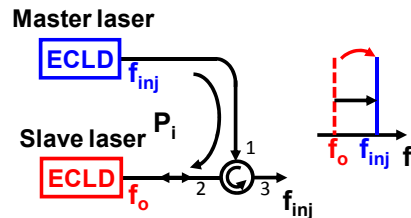


Fig. 1. Schematic diagram of injection locking.

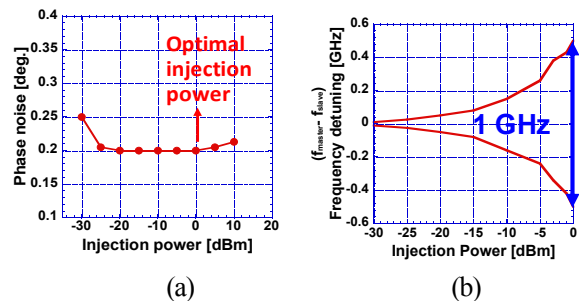


Fig. 2. (a) Phase noise and (b) locking range as a function of injection power.

bandwidth is largely increased from 4 MHz to 1 GHz, and the phase noise is reduced from 0.6 deg. to 0.2 deg. The present phase synchronization scheme also features a simple and compact configuration, which is attractive for application to coherent transmission.

Chapter 5 Application of LD-based optical phase-locked circuits to multi-level QAM coherent optical transmission

By employing the OVCO-OPLL circuit and the injection locking circuit, 64 and 128 QAM coherent transmissions were successfully demonstrated. This chapter shows their transmission results and clarified the advantages of the analog phase synchronization circuits.

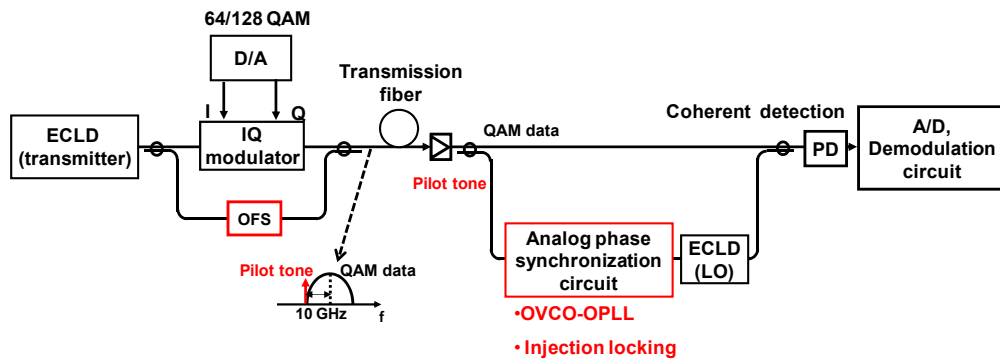
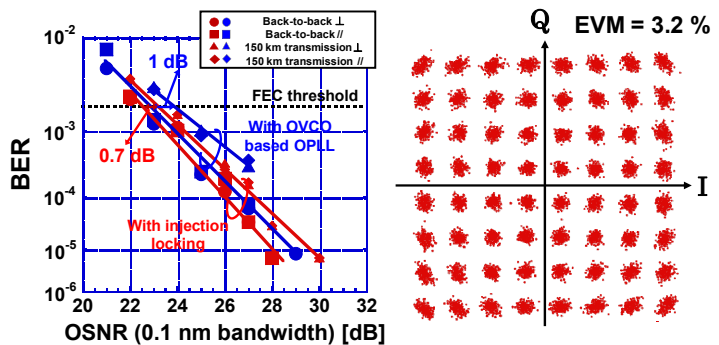


Fig. 3. Configuration of coherent transmission system with analog phase synchronization circuit.

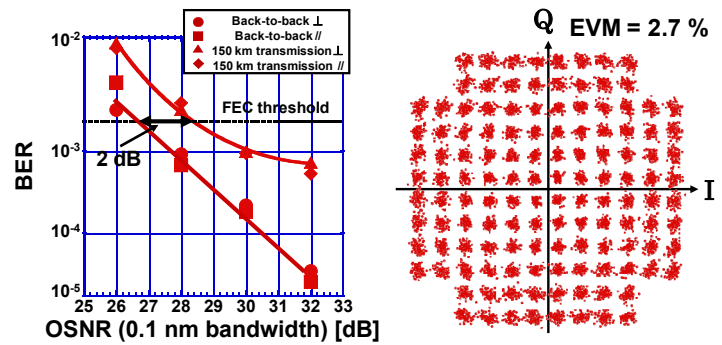
Figure 3 shows a fundamental configuration of QAM coherent transmission. Here, 4 kHz linewidth ECLDs are used both as a transmitter and an LO. At a transmitter part, a polarization-multiplexed 10 Gsymbol/s, 64 or 128 QAM data signal and a pilot tone signal are generated simultaneously. After transmission, the LO is phase-locked to the transmitted QAM data with the tone signal by using the analog phase synchronization circuit. After that, the QAM data signal is homodyne-detected with the LO, and then demodulated with DSP in an offline condition followed by A/D conversion.

Figure 4 (a) shows the bit error rate (BER) characteristics of the 120 Gbit/s, 64 QAM 150 km transmission using the OVCO-OPLL circuit and the injection locking circuit. The demodulation performance was successfully improved with the injection locking circuit compared with that obtained with the OVCO-OPLL circuit. This is attributed to its wider locking



(a) BER characteristics (b) Constellation map after transmission with injection locking.
 Fig. 4. Transmission results of 64 QAM coherent transmission.

bandwidth resulting in a low phase noise synchronization operation. Figure 4 (b) shows the constellation map of 64 QAM coherent transmission with an injection locking scheme. The error vector magnitude (EVM) is 2.7 %, and an error free transmission is realized. Furthermore, the injection locking scheme made it possible to increase the QAM multiplicity to the 128



(a) BER characteristics (b) Constellation map after transmission
 Fig.5. Transmission results of 128 QAM coherent transmission.

QAM, and a 140 Gbit/s signal was transmitted over 150 km. The BER characteristics and the constellation map of the 128 QAM coherent transmission are shown in Fig. 5. This is the highest multiplicity and bit rate yet obtained with an injection-locked coherent transmission using an LD.

Chapter 6 Conclusion

This chapter summarizes the experimental results obtained in this study including two types of analog phase synchronization circuits and their application to coherent transmission. Finally, this chapter discusses future perspective for QAM coherent transmission with higher multiplicity by employing an injection locking circuit.

論文審査結果の要旨

近年光通信分野では、通信容量の急激な増大に対応するために、周波数利用効率の向上が喫緊の課題となっている。そこで、光の振幅のみならず位相にも情報を乗せる多値コヒーレント光 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 伝送に関する研究が急速に進展している。光 QAM 信号を正確に復調するためには、データ信号と局発レーザとの高精度な光位相同期技術が不可欠となる。これまで狭線幅ファイバレーザを用いて位相雑音の極めて小さい光位相同期ループ(OPLL: Optical Phase-Locked Loop)回路が開発されており、これにより 2048 値に及ぶ超多値コヒーレント QAM 伝送が実現されている。一方半導体レーザは一般にその発振スペクトル線幅が広く、広帯域な位相制御を必要とするため、位相雑音の小さい光位相同期の実現が困難であり、これまで超多値コヒーレント光伝送への適用はなされていなかった。著者は、光 VCO (Voltage-Controlled Oscillator)方式を用いた OPLL 回路、及び光注入同期法を半導体レーザに適用することによって、位相雑音を大幅に抑制した高精度光位相同期回路を実現している。さらに、これらをコヒーレント QAM 伝送に適用することによりその有用性を実証している。本論文はこれらの成果をまとめたもので、全編 6 章より成る。

第 1 章は序論であり、光位相同期技術とそのコヒーレント伝送への応用に関する研究動向について述べ、本研究の目的と論文構成を示している。

第 2 章では、コヒーレント光伝送に用いる各種光位相同期技術の特徴と課題について述べている。光位相同期法にはデジタル信号処理を用いた位相推定法と、アナログ光・電気回路による位相同期法の 2 つがあるが、多値度の拡大には後者による位相制御の高精度化が非常に重要であることを示している。

第 3 章では、外部共振器型狭線幅半導体レーザを用いて構築した OPLL 回路について述べている。半導体レーザの外部で光位相変調器と RF-VCO を組み合わせて光 VCO を構築することによって、従来半導体レーザの FM (Frequency Modulation) 帯域で制限されていた OPLL の制御帯域を 0.7 MHz から 4 MHz に拡大し、これにより位相雑音を 5 度から 0.6 度へ低減することに成功している。

第 4 章では、外部共振器型半導体レーザを用いた光注入同期法による位相雑音のさらなる低減について述べている。位相雑音の低減には最適な注入光パワーが存在することを見出し、その結果 1 GHz に達する広い制御帯域および 0.2 度の極めて低い位相雑音特性を同時に実現している。この結果は半導体レーザを用いて高精度な位相同期を小型且つ簡便な構成で実現できることを示したものであり、極めて重要な成果である。

第 5 章では、これらの位相同期法を導入したコヒーレント QAM 伝送実験について述べている。半導体レーザを送受信光源として使い、パイロットトーン信号を注入光として用いた注入同期型コヒーレント伝送系を新たに構築し、これにより 140 Gbit/s、128 QAM 信号の 150 km 伝送に世界で初めて成功している。これはコヒーレント伝送における光注入同期法の有用性ならびにさらなる多値度増大の可能性を示した大変有益な成果である。

第 6 章は結論であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、OPLL および光注入同期法を用いて位相雑音の極めて小さい半導体レーザ型光位相同期回路を実現し、さらにこれらを用いてコヒーレント QAM 伝送の多値度が拡大できることを示したものである。これらの成果は超多値コヒーレント光伝送による大容量・高効率伝送システムの実現に有益な知見を与えるもので、光通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。