

平成 21 年 6 月 4 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2008

課題番号：17068004

研究課題名（和文）光位相情報の活用を目指した光複素振幅測定システムの構築

研究課題名（英文）Optical complex amplitude measurement system aiming at utilization of optical phase information

研究代表者

菊池 和朗 (KAZURO KIKUCHI)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：50134458

研究成果の概要：

本研究では、位相ダイバーシティ・ホモダイン検波とデジタル信号処理を組み合わせた新しい光受信器を提案した。この受信器は、ホモダイン検波方式において通常不可欠な光位相同期ループ(OPLL)を必要としないという特徴を持つ。OPLLに替わり、位相のトラックは高速デジタル信号処理により行なう。これにより、M相位相変調(PSK)信号、直交位相変調(QAM)信号がコヒーレントに復調することができ、非常に優れた受信感度を示すことが示された。この受信器を用いて、20Gbit/sQPSK伝送、40Gbit/s 16QAM伝送に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	23,200,000	0	23,200,000
2006年度	29,200,000	0	29,200,000
2007年度	23,200,000	0	23,200,000
2008年度	18,900,000	0	18,900,000
年度			
総計	94,500,000	0	94,500,000

研究分野：光エレクトロニクス

科研費の分科・細目：

キーワード：光ファイバ通信，多値変調，ホモダイン検波，デジタル信号処理

1. 研究開始当初の背景

光電界複素振幅の抽出を可能にするコヒーレント光通信技術は、1980年代に各国で盛んに研究された。コヒーレント光通信で用いられる受信器では、局発光(L0)を用いた信号光のホモダイン検波により、光電界複素振幅を電気帯域にダウンコンバートする。通常の直接検波が二乗検波であるのに対して、コヒーレント受信器は線形な検波を行い、光電界の位相情報が保持される。このようなコヒーレント受信器の実現には、光キャリアの位相ドリフトを補償するための光位相同期ループ(光PLL)が不可欠である。しかし、その

安定性の確保が技術的に極めて困難であったため、コヒーレント光通信は結局実用には至ることなく、20年にわたりその研究・開発が中断されていた。

筆者はこのような状況の下で、2005年3月に、コヒーレント検波と高速のデジタル信号処理とを組み合わせた“デジタル・コヒーレント光受信器”という新しいコンセプトを提案した。この方式では、位相ダイバーシティ・ホモダイン光受信器を用いて光電界複素振幅のIQ成分を電気信号として抽出し、これを高速AD変換によりデジタル信号に変換した後、キャリア位相ドリフトをディジ

タル領域で推定して4相位相変調(QPSK)信号を復調している。この方法によれば、これまでコヒーレント光通信技術の実用化を阻害してきた煩雑な光PLLを用いることなく、市販レベルの分布帰還型(DFB)半導体レーザを光源として、信号光複素振幅を完全に検出できる。研究開始当時、この研究は世界的に注目を集め、新しい研究の潮流が生まれつつあった。

2. 研究の目的

本研究は、光の高次機能として“光位相”に着目する。現在実用化されている光通信システムでは、光強度のみが変調パラメータとして利用されており、光位相情報は全く用いられていない。光通信システムのさらなる発展には、位相情報を駆使するための技術開発が不可欠である。本研究ではこのために、位相・偏波ダイバーシティ・ホモダイン受信器を中核とした光複素振幅測定システムを開発する。このシステムを用いて、(1)位相情報を用いた新しい光変復調方式の研究、(2)振幅・位相変調デバイスの試作と評価、(3)位相情報を用いた等化技術の研究を行う。最終的には、伝送システム上で、受信器の性能評価を行う。

3. 研究の方法

(1) 光受信器の試作

図1に、試作したデジタル・コヒーレント光受信器の全体構成の概要を示す。位相・偏波ダイバーシティ・ホモダイン光回路の4つの出力端子からは、光複素振幅および偏波状態(SOP)の情報が得られる。高速の4チャンネルAD変換器を用いて、これら4つの出力はデジタル領域に変換される。シンボル当たり2サンプル以上のサンプリングレートであれば、AD変換に伴う情報の欠落はない。しかし、10Gsymbol/sのシステムでは毎秒20Gサンプルのサンプリング速度が要求されるので、上記の機能を実時間で実現することは現状では困難である。本研究では、AD変換後、オフラインの処理によって信号処理の原理検証を行う。

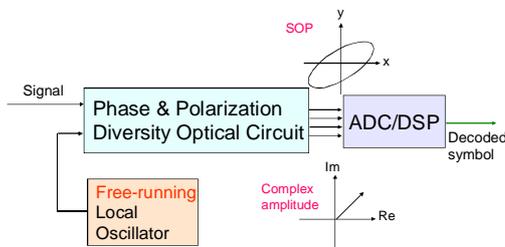


図1 デジタル・コヒーレント光受信器の全体構成

(2) 信号等化、復調アルゴリズムの実装

図2はデジタル信号処理に必要な機能と処理の流れを示す。偏波分散、波長分散など光ファイバに起因する信号劣化、光変調器や光フィルタの帯域制限など光回路に起因する信号劣化、変調器ドライバ、受信増幅器など電気回路の帯域制限に起因する信号劣化に対して、等化アルゴリズムを検討し、受信器に実装する。偏波変動などの時变的な信号劣化に対しては、適応等化アルゴリズムを導入する。このような信号等化以外にも、クロック抽出、偏波アラインメント、キャリア位相推定などを実装する必要がある。これらの信号処理の最適な順序や構成法など、デジタル信号処理回路全体の設計・試作を行う。

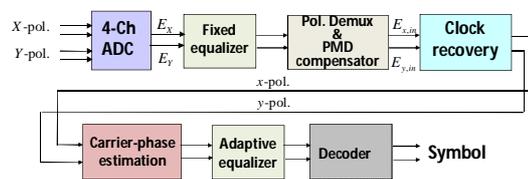


図2 デジタル信号処理回路

(3) 1,000km 光伝送システム実験

全長 1,000km の分散マネージメント(DM)伝送路を整備し、多値光変調信号の伝送実験を行う。

4. 研究成果

(1) 光受信器の試作と信号処理回路の実装

位相ダイバーシティ・ホモダイン検波とデジタル信号処理を組み合わせたデジタル・コヒーレント光受信器の試作に成功した。この受信器の光回路を図3に示す。この受信器は、光位相同期ループ(OPLL)を必要とせず、位相のトラックは高速デジタル信号処理により行なう。

20Gサンプル/sでのAD変換後、クロック抽出、キャリア位相推定、偏波アラインメント(偏波ダイバーシティ使用時)、分散補償、適応等化などのデジタル信号処理がオフラインで行われ、シンボルがデコードされた。これにより、M相位相変調(PSK)信号、直交振幅変調(QAM)信号がコヒーレントに復調することができ、非常に優れた受信感度を示すことが示された。

(2) QPSK 伝送実験

図4に QPSK 伝送システムの構成を示す。送信端では、4波長のDFBレーザ光が、光IQ変調器により20Gbit/sでQPSK変調される。波長間隔は12.5GHzとし、隣接チャンネルの偏波が直交する偏波インターリーブ構成を

とる。

伝送システムは40km伝送路25スパンからなる。各スパンは、コア拡大1.3 μm 零分散ファイバ ($D=21\text{ps/nm/km}$, $\gamma=0.8\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$) 28kmと分散補償ファイバ ($D=-53\text{ps/nm/km}$, $\gamma=3\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$) 12kmからなる。融着損を含めたスパンロス11dBは、0.98 μm 前方励起EDFAにより補償される。最終段には残留分散を等化するために、通常分散ファイバ74kmが挿入され、偏波を制御した後、デジタル・コヒーレント光受信器に導かれる。

図5は伝送前後の符号誤り率特性である。1,000km伝送後でも、エラーフリーの受信が可能であり、周波数利用効率1.6bit/s/Hzが達成されている。

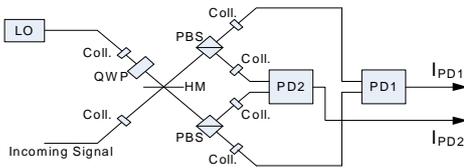


図3 位相ダイバーシティ光回路

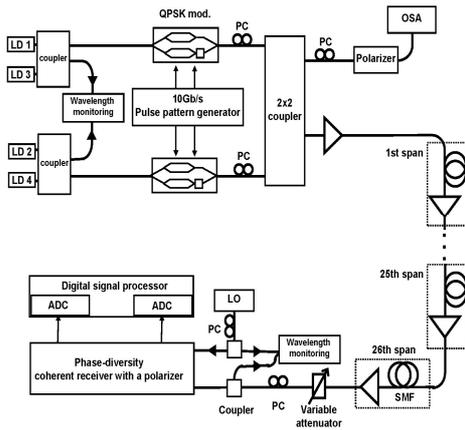


図4 QPSK 伝送システム

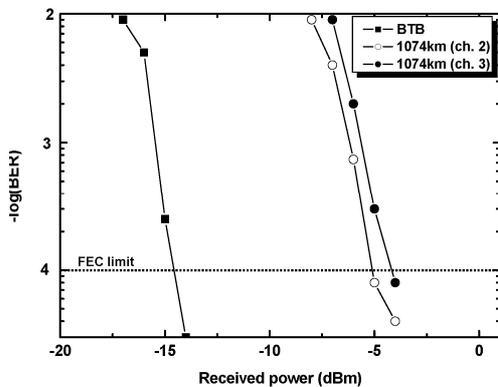


図5 QPSK 伝送特性

(3) 16QAM 送実験

16QAM 信号の伝送特性を測定するための実験を行った。

送信器にDFB-LDを用いた。DFB-LDの波長は1552nmであり、線幅はおよそ150kHzである。NRZの40Gbit/s, 16QAM信号はIQMによって生成される。IQMは、AWGの独立した2つのポートより発生する4値の電気信号により駆動される。電気信号は差動符号化されており、4系列の電気信号は復調後に 2^9-1 の擬似乱数列が得られるようになっている。このようにして得られた16QAM信号を200kmの大口径シングルモードファイバ(Single mode fiber: SMF)に入力する。SMFへの入力パワーは10dBmに保たれている。用いたSMFの特性は、分散 $D=20\text{ps/nm/km}$ 、非線形係数 $\gamma=0.75\text{/W/km}$ 、損失は0.2dB/kmである。200kmの伝送により蓄積されたGVDは4,000ps/nmで、総伝送損失は40dBである。

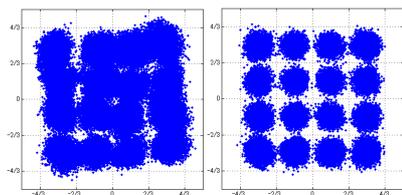
受信端では、光減衰器によって平均入力パワー P_{in} を調節する。その後、光信号はEDFAによって前置増幅され、位相ダイバーシティ・ホモダイン受信器によって検波される。送信用のDFB-LDと同じ特性を持つDFB-LDが局発光源として用いられている。受信器の出力は8ビットの分解能を持つADCによって20Gsamples/sの速度で非同期にサンプルされる。その後、サンプルされたデータはDSP回路によりオフライン処理される。これはクロック再生、固定型FIRフィルタリング、判定指向型搬送波位相推定、適応型FIRフィルタリング、シンボル判定により構成される。固定型FIRフィルタは伝送によって生じる4,000ps/nmのGVD補償のために用いた。適応型FIRフィルタは不完全なIQ変調とSPMの効果の一部を補償するために用いられている。

図6は伝送後の40Gbit/s, 16QAM信号の複素振幅分布である。(a)(b)はそれぞれ搬送波位相推定の前後のシンボル分布を示している。平均受信電力はいずれの場合も-30dBmである。

図6(a)より、200km伝送時はファイバへの入力パワーが10dBmと高いため、SPMの影響が観測できる。内4シンボル、中8シンボル、外4シンボルの位相回転角がそれぞれ異なることがわかる。適応フィルタによってシンボル配置は改善されているものの、非線形な歪みであるSPMの影響は、線形フィルタでは完全に除去できず、等化後のシンボル分布はかなり広がっている。しかし、等化により200km無中継伝送後に、FEC限界値を下回る $\text{BER} = 10^{-3.7}$ を得ることができた。

(4) まとめ

本研究によって、デジタル・コヒーレント光通信と呼ぶ新しい研究分野が創成された。申請者は本技術のパイオニアとして、その基礎の確立に貢献できたと考えている。



(a)等化前 (b)等化後

図6 200km 伝送後における適応フィルタリング前後の 40Gbit/s, 16QAM 信号の複素振幅分布

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 9 件)

- [1] 菊池和朗, “デジタル信号処理を駆使した新しいコヒーレント光通信技術,” レーザー研究, 37 巻 3 号, pp.164-170, 2009. (査読有)
- [2] C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Ultrafast operation of digital coherent receivers using their time-division demultiplexing function,” J. Lightwave Technol., vol.27, no.3, pp.224-23, 2009. (査読有)
- [3] Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Unrepeated 200-km transmission of 40-Gbit/s 16-QAM signals using digital coherent receiver,” Optics Express, vol. 17 Issue 3, pp.1435-1441, 2009. (査読有)
- [4] K. Kikuchi and S. Tsukamoto, “Evaluation of sensitivity of the digital coherent receiver,” J. Lightwave Technol., vol. 26, no. 13, pp.1817-1822, 2008. (査読有)
- [5] K. Kikuchi, “Electronic post-compensation for nonlinear phase fluctuations in a 1000-km 20-Gbit/s optical quadrature phase-shift keying transmission system using the digital coherent receiver,” Optics Express, vol.16, no.2, pp.889-896, 2008. (査読有)
- [6] K. Kikuchi, “Phase-diversity homodyne detection of multi-level optical modulation with digital carrier phase estimation,” IEEE J. Selected Topics on Quantum Electron., vol.12, no.4, pp.563-570, 2006. (査読有)
- [7] S. Tsukamoto, K. Katoh and K. Kikuchi, “Coherent demodulation of optical multilevel phase shift-keying signals using homodyne detection and digital signal processing,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol.18, no.10, pp.1131-1133, 2006. (査読有)
- [8] S. Tsukamoto, K. Katoh and K. Kikuchi, “Unrepeated transmission of 20-Gbit/s optical quadrature phase-shift keying signal over 200-km standard single-mode fiber based on digital processing of homodyne-detected signal for group-velocity dispersion compensation,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol.18, no.9, pp.1016-1018, 2006. (査読有)
- [9] D.-S. Ly-Gagnon, S. Tsukamoto, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Coherent detection of optical quadrature phase-shift keying signals with carrier phase estimation,” J. of Lightwave Technol., vol.24, no.1, pp.12- 21, 2006. (査読有)

〔学会発表〕(計 27 件)

- [1] C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Demodulation of 1.28-Tbit/s polarization-multiplexed 16-QAM signals on a single carrier with digital coherent receiver,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2009), OTuG3, San Diego, CA, U.S.A. (22-26 Feb. 2009).
- [2] Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Phase-noise tolerance of optical 16-QAM signals demodulated with decision-directed carrier-phase estimation,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2009), OWG7, San Diego, CA, U.S.A. (22-26 Feb. 2009).
- [3] C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Demodulation of 480-Gbit/s 8PSK OTDM signal with digital coherent receiver,” European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), Paper Mo.4.D.6, Brussels, Belgium (21-25 Sept. 2008).
- [4] K. Kikuchi, “Coherent transmission systems,” Tutorials, European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), Brussels, Belgium (21-25 Sept. 2008).
- [5] Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Transmission of 40-Gbit/s 16-QAM signal over 100-km standard single-mode fiber using digital coherent optical receiver,” European Conference on Optical Communication (ECOC 2008), Tu.1.E.4, Belgium, Brussels (21-25 Sept. 2008).
- [6] K. Kikuchi, “Polarization-demultiplexing algorithm in the digital coherent receiver,” LEOS Summer Topicals, TuC1.1, Acapulco,

- Mexico (21-23 July 2008).
- [7] K. Kikuchi and S.-Y. Kim, "Investigation of nonlinear impairment effects on optical quadrature phase-shift keying signals transmitted through a long-haul system," LEOS Summer Topicals, WC2.2, Acapulco, Mexico (21-23 July 2008).
- [8] K. Kikuchi, "History of coherent optical communication and challenges for the future," LEOS Summer Topicals, TuC1.1, Acapulco, Mexico (21-23 July 2008).
- [9] Y. Mori, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Decision-feedback carrier-phase estimation for digital coherent optical receivers," Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2008), WeF-4, Sydney, Australia (7-10 July 2008).
- [10] Y. Mori, C. Zhang, K. Igarashi, K. Katoh, and K. Kikuchi, "Unrepeated 200-km transmission of 40-Gbit 16-QAM signals using digital coherent optical receiver," Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2008), PDP-4, Sydney, Australia (7-10 July 2008).
- [11] K. Kikuchi, "Coherent optical communications," Optoelectronics and Communications Conference (OECC 2008), WeF-1, Sydney, Australia (7-10 July 2008).
- [12] C. Zhang, Y. Mori, K. Igarashi, and K. Kikuchi, "Demodulation of 640-Gbit/s polarization-multiplexed OTDM QPSK signals using a digital coherent receiver," in Optical Fiber Communication Conference, OFC 2008, PDP6, San Diego, CA, U.S.A. (24-28 Feb. 2008).
- [13] K. Kikuchi, K. Igarashi, Y. Mori, and Chao Zhang, "Demodulation of 320-Gbit/s optical quadrature phase-shift keying signal with digital coherent receiver having time-division demultiplexing function," Optical Fiber Communication Conference (OFC 2008), OTuO4, San Diego, CA, U.S.A. (24-28 Feb. 2008).
- [14] S.-Y. Kim and K. Kikuchi, "1,000-km polarization-interleaved WDM transmission of 20-Gbit/s QPSK signals on the frequency grid with 12.5-GHz channel spacing using digital coherent receiver," European Conference on optical Communication (ECOC 2007), 8.3.2, Berlin, Germany (16-20 Sept. 2007).
- [15] K. Kikuchi, Y. Ishikawa and Kazuhiro Katoh, "Coherent demodulation of optical quadrature duobinary signal with spectral efficiency of 4 bit/s/Hz per polarization," European Conference on optical Communication (ECOC 2007), 9.3.4, Berlin, Germany (16-20 Sept. 2007).
- [16] K. Kikuchi, "Optical homodyne receiver comprising phase and polarization diversities with digital signal processing," 2007 IEEE/LEOS Summer Topical Meetings, TuA4.5, Portland, OR, U.S.A. (23-25 July 2007).
- [17] K. Kikuchi, "Coherent detection of multi-level coded optical signals," Optoelectronics and Communications Conference/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication (OECC/IOOC 2007), 11B3-1, Yokohama, Japan (9-13 July 2007).
- [18] K. Kikuchi, "Digital coherent optical receivers," Conference on Optical Internet (COIN/ACOFT 2007), WeB3-3, Melbourne, Australia (24-27 June 2007).
- [19] K. Kikuchi, M. Fukase, and S.-Y. Kim, "Electronic post-compensation for nonlinear phase noise in a 1000-km 20-Gbit/s optical QPSK transmission system using the homodyne receiver with digital signal processing," Optical Fiber Communication Conference (OFC 2007), OTuA2, Anaheim, CA, U.S.A. (25-29 March 2007).
- [20] S.-Y. Kim and K. Kikuchi, "1,000-km transmission of 20-Gbit/s QPSK-NRZ co-polarized DWDM signals with spectral efficiency of 1 bit/s/Hz using coherent detection," Optical Fiber Communication Conference (OFC 2007), OThS4, Anaheim, CA, U.S.A. (25-29 March 2007).
- [21] K. Kikuchi, "Coherent detection: Born again?" IEEE LEOS Annual Meeting (LEOS 2006), WP1, Montreal, QC, Canada (29 Oct.-2 Nov. 2006).
- [22] S. Tsukamoto, Y. Ishikawa, and K. Kikuchi, "Optical homodyne receiver comprising phase and polarization diversities with digital signal processing," European Conference on Optical Communication (ECOC 2006), Mo4.2.1, Cannes, France (24-28 Sept. 2006).
- [23] K. Kikuchi, "Phase-diversity homodyne receiver for coherent optical communications," Coherent Optical Technologies and Applications (COTA 2006), CThB3, Whistler, British Columbia, Canada (25-30 June 2006).
- [24] S. Tsukamoto, K. Katoh and K. Kikuchi, "Coherent demodulation of optical 8-phase shift-keying signals using homodyne detection and digital signal processing," Optical Fiber Communication Conference (OFC 2006), OThR5, Anaheim, CA, U.S.A. (5-10 March 2006).

- [25] S. Tsukamoto, K. Katoh and K. Kikuchi, “Unrepeated 20-Gbit/s QPSK transmission over 200-km standard single-mode fiber using homodyne detection and digital signal processing for dispersion compensation,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2006), OWB4, Anaheim, CA (5-10 March 2006).
- [26] K. Kikuchi, “Coherent detection of phase-shift keying signals using digital carrier-phase estimation,” Optical Fiber Communication Conference (OFC 2006), OTuI4, Anaheim, CA, U.S.A. (5-10 March 2006).
- [27] S. Tsukamoto, D.-S. Ly-Gagnon, K. Katoh, and K. Kikuchi, “Demodulation of co-polarized 20-Gbit/s QPSK signals with 16-GHz spacing after 200-km transmission using coherent detection and digital signal processing,” Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2005), CWO3, Baltimore, MA, U.S.A. (22-27 May 2005).

〔図書〕(計 1 件)

- [1] K. Kikuchi, “Coherent optical communication systems,” Chapter 3 in Optical Fiber Telecommunications VB, edited by I. P. Kaminow, Tingye Li, and Alan E. Willner, Academic Press, 2008, pp.95-129.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

菊池 和朗 (KAZURO KIKUCHI)
東京大学 大学院工学系研究科 教授
研究者番号 : 50134458

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

加藤 一弘 (KAZUHIRO KATOH)
東京大学 大学院情報理工学系研究科
助教
研究者番号 : 00292897