

光周波数同期フォトニックネットワークの概念実証と
 当該ネットワークにおける高コヒーレンス光通信技術の研究開発 (111510001)
 Demonstration of optical frequency synchronous network concept
 based on highly coherent light source communication technology

古賀 正文 大分大学
 Masafumi KOGA Oita University

研究分担者

高田 篤† 水鳥 明††
 Atsushi Takada† Akira Mizutori††
 †徳島大学 ††大分大学
 †The University of Tokushima ††Oita University

研究期間 平成 23 年度～平成 25 年度

概要

我々はシステム全体の光周波数が同期して動作するフォトニックネットワークを光周波数同期フォトニックネットワークと称して、その概念を提唱している。光周波数同期フォトニックネットワークの概念の下で高コヒーレンス光源が可能とするSNRの限界を追求し、実現が難しいとされてきたホモダイン直接検波、位相感応型増幅器の実現可能性へ挑戦した結果、20Gbit/s QPSK信号のホモダイン検波受信に成功し、位相再生励起光によるPSAに成功した。搬送波位相同期による伝送性能の向上レベルを符号変調方式ごとに明らかにした。

1. まえがき

通信トラフィック需要の伸びは留まるところを知らず、伝送容量の拡大に関わる研究開発は持続的挑戦課題と認識されている。2030年にはEXA-bit/s Classの光ネットワークが必要とされている。これには、3桁の容量拡大を可能とする革新性のある光通信技術の創出が必要である。消費電力増加を最小限に抑える技術であることも時代の要請である。本研究は、光源のコヒーレンスを可能な限り高め、その結果可能となる光通信におけるSNR限界を明らかにし、3桁容量拡大の課題と消費電力問題へ貢献することを目的としている。

光源のコヒーレンスを高めるために光周波数同期フォトニックネットワークの概念を提案しており、コヒーレンスの高い光キャリアを用いて、①受信感度を高めるホモダイン検波の実証、②位相再生型励起光による位相感応光増幅(PSA)の実証、③搬送波位相同期伝送系による伝送性能向上の程度を符号変調方式ごとに明確化、した。本予稿では、紙面の関係上、①と②について報告する。

2. 研究開発内容及び成果

2.1 20Gbit/s QPSK 変調信号の Costas Loop ホモダイン受信系の構築とその光ファイバ伝送実証

20-Gbit/s QPSK 変調信号に対して設計し開発した decision-directed Costas loop ホモダイン受信回路ならびにその伝送実験系構成を図1に示す。送信光源は1MHzの精度を有する光周波数コム(Comb)基準(OFCR)に位相同期されており、光周波数同期網を模擬している。ホモダイン受信回路は図1中にて破線枠で Receiver と記している。Costas loop に必要となる加減算、乗算回路がすべて Digital 回路にて構成できる方式を考案し、安定で高感度な20Gbit/s QPSK 変調信号ホモダイン受信を達成した。これまで加減算にマイクロ波パワーディバイダ(アナログ)を用いた例が多く、これに比べて動作の安定性がきわめて高まり、結果として理論限界に近い検出感度が得られた。そのときのアイ(eye)パターンとコンスタレーションマップも図中に示した。アイがきれいに開いているのが分かる。安定にアイが開いた報告例は世界的に見ても初めてである。回路動作の詳細は文献[2]を参照されたい。

受信感度を評価したところ、5.8dBmの局発光強度にて

-27.5dBm であった。ホモダイン検波位相誤差が理想的状態

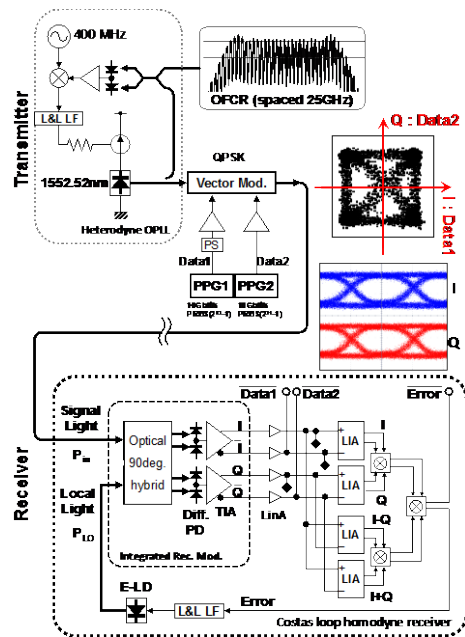


図1. Decision-directed Costas Loop ホモダイン受信回路とその伝送実験系: Pin: Signal light power. Diff. PD: Differential photo detector. TIA: Trans-impedance amplifier. LinA: Linear amplifier. LIA: Differential mode Limiting amplifier. E-LD: External cavity laser diode. L&L LF: Lag-lead loop filter with integrator.

に比べて2dBの差であり、その内1.5dBは90°ハイブリッドの過剰損失である。したがって、ショット雑音限界から0.5dB以内で高感度な受信が達成できていることと等価である。

100km光ファイバ伝送実験を行ったところ、誤り率が 10^{-3} までSNRが劣化しても十分安定なホモダイン検波が可能であった。波長分散(CD)は800ps/nmにおよび、群速度分散に置き換えて相対遅延時間差を評価すると70psとなる。10Gbit/sの変調信号における1ビットの時間幅換算では0.7である。これだけの群速度分散を被っても、Decision-directed Costas Loop

では、位相同期が可能であることを示していた。

本技術の成果を基に、多値 M-ary QAM 変調信号に対するホモダイン検波回路構成を考案し、特許申請中である(申請特許リスト[3])。また、位相感応増幅技術の実用化を目指すとき、搬送波から位相再生を行って励起光を生成することは必須の要件の一つとなるが、必須要件のひとつに見通しを得られたことになる。

2.2 位相同期ループ励起光による PSA の実証

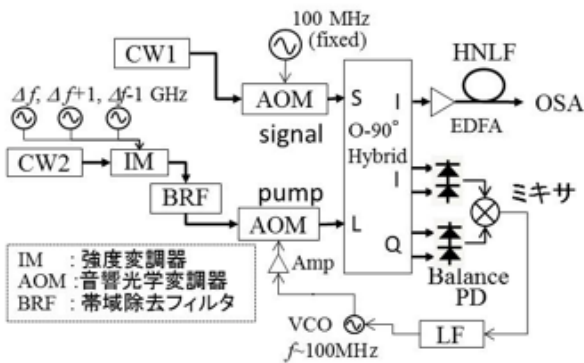
PSA 中継増幅を行うには、PSA 中継器内の励起光の光位相を入射信号光の搬送波位相に同期する必要がある。励起光位相を搬送波に同期する手法はその原理により、光注入同期法(IL 法)と光位相同期ループ回路法(OPLL 法)に大別される。これまでの他機関での PSA 実験はほとんどが IL 法であるが、コスト回路を適用した OPLL 法は信号光品質劣化に対する耐力が高く、位相同期特性をループ電気回路パラメータにより容易に制御でき、実用化を目指す上でも優位性がある。我々は OPLL 法を適用した PSA の実現を目指して研究を進め、世界で初めて実証を行った。

PSA におけるパラメトリック増幅方式には複数の方式がある。多値 PSK 信号やマルチキャリア信号の PSA では非縮退パラメトリック方式が適している。コスト型 OPLL 励起光制御回路による PSA 動作条件について検討した結果、回路中の位相誤差信号が

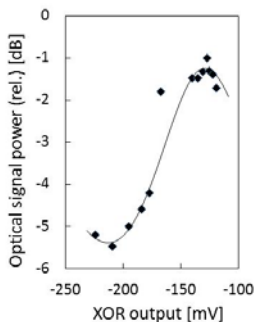
$$\text{誤差信号} \propto \sin \{2\theta_L - (\theta_{a1}(t) + \theta_{a2}(t)) - (\theta_{s1} + \theta_{s2})\}$$

となり、M 値 PSK 信号に対して PSA 動作するようにアイドラ光の位相を $(M-1)\theta_{a1}(t)$ または $(-M)\theta_{a1}(t)$ としたとき、誤差信号が変調成分を含まないこととなるため、位相同期ループが正常動作することを見出した。但し、 $\theta_{a1}(t)$ は信号光の変調位相シフト量、M は多値数、 θ_s は信号光/アイドラ光の位相雑音、 θ_L 励起光の位相である。

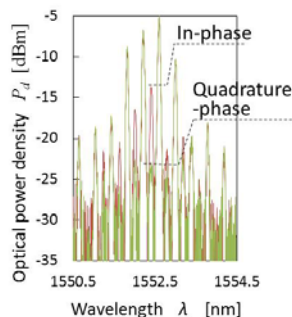
検証実験系を図2に示す。2 波長励起方式の PSA にて OPLL を適用した構成例である。同図(a)の実験系では、AOM を用いて検出した誤差信号により励起光源 CW2 の光位相を制御している。同図(b)は排他的論理和回路(XOR)によって



(a)実験系



(b) 出力光パワ



(c) 出力光スペクトル

図2 2 波長励起 PSA における励起光位相制御実験

構成したミキサの出力電圧により励起光位相を制御し利得を制御した結果を表している。励起光位相制御により約 10dB の位相感応利得が得られていることが分かる。(同図(c))

3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

光周波数同期フォトニックネットワークの概念下では光 PLL 技術は QPSK 変調信号に対するホモダイン検波まで可能であることが分かったので、さらに一般化して M-ary QAM への展開を図る。すでにその構成は特許として申請済みである。さらに励起光位相再生型 QPSK 信号 PSA 実現へ展開する。なお、光源の高コヒーレンス化ならびに PSA 技術の重要性は、その後公募された課題「光周波数・位相制御光中継伝送技術の研究開発」によって裏付けられている。

社会経済への波及効果:

光 PLL に基づくホモダイン検波技術はデジタルコヒーレントでは観測困難な状態遷移時の特性も把握できるので、計測技術等への応用が考えられる。また、光 PLL 単体は波長可変光源等測定・計測機器をより高性能化へと向かわせるであろう。現行の波長可変光源は、設定できる光周波数の絶対値ならびにその安定性は 100MHz 程度の不確かさを有している。1 MHz 以下の安定化基準光を備えた波長可変光源の市場がいずれ広がると考えられる。

4. むすび

光周波数同期フォトニックネットワークの概念が普及すれば、1MHz 以下の高い精度で搬送波を多重できることになる。結果として、ナイキストフィルタの間隔で稠密な波長多重化が可能となり、光ファイバにおける周波数利用効率は真の意味での理論限界を達成できることになる。

また、実現が困難とされたホモダインコヒーレント検波がこの概念の下では可能であることを実証できた。無雑音増幅が原理的に可能であり、かつ波形整形効果のある位相感応光増幅における位相再生制御の可能性を大きく拡大できたことにより、位相感応増幅の実用性を高めたと言える。普及が進むデジタルコヒーレント通信技術が抱える膨大な DSP 処理負荷の課題に解を与えることも期待できる。

【誌上发表リスト】

- [1] M. Koga, and A. Mizutori, "Decision-Directed Costas Loop Stable Homodyne Detection for 10-Gb/s BPSK Signal Transmission," IEEE Photonics Technology Letters, vol.26, No.4 (2014/2/15)
- [2] A. Mizutori, S. Y. Set, F. Shirazawa and M. Koga, "Stable Costas Loop Homodyne Detection for 20Gbit/s QPSK Signal Fiber Transmission," ECOC2013 Mo.4.C.1 (2013/9/23)
- [3] A. Takada, K. Higashiyama, E. Hamada, Y. Okamura, A. Mizutori and M. Koga, "Optical phase locking between pump and multiple-carrier signal lights in frequency non-degenerate parametric phase-sensitive amplifier," OECC2014, (2014/7/5)

【申請特許リスト】

- [1] 古賀正文、水鳥明「光位相同期回路」日本国、平成 26 年 2 月 28 日
- [2] 高田篤、岡村康弘、古賀正文「位相感応型光増幅器及び励起光位相同期回路」、日本国、平成 26 年 3 月 7 日
- [3] 水鳥明、古賀正文「光位相変調信号受信装置」、日本国、平成 25 年 1 月 16 日

【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://koga-labs.jp>