

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360171

研究課題名(和文)長距離光ファイバ伝送における光・電気ハイブリッド信号処理の研究

研究課題名(英文) Study on Opto-Electronic Hybrid Signal Processing for Long-Distance Optical Fiber Transmission

研究代表者

松本 正行 (MATSUMOTO, Masayuki)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：10181786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円、(間接経費) 4,560,000円

研究成果の概要(和文)：種々の波形劣化および雑音への耐性に優れた長距離高速光ファイバ信号伝送の実現を目的として、光信号の波形整形および雑音除去に関する研究を行った。主な成果として、(1)信号再生操作の一部を電気信号領域で行う光・電気ハイブリッド型の信号再生器を提案し、その有効性を実験およびシミュレーションにより検証した。(2)光信号再生器が伝送路中に分散配置された伝送系において、受信端での系列推定などの電気信号処理が系の耐波長分散性を高めることを明らかにした。(3)位相感応増幅器による4値位相変調光の再生など、全光型の信号再生方式の機能向上を検討した。

研究成果の概要(英文)：We studied optical signal reshaping and noise reduction methods with an aim to realize long-distance and high-speed optical fiber transmission systems with superior tolerance to various kinds of waveform distortion and noise. Following results are obtained: (1) we proposed opto-electronic hybrid signal regeneration schemes where signal reshaping is partially performed in the electrical domain and demonstrated their effectiveness by experiments and numerical simulation, (2) we showed that electrical signal processing such as sequence estimation at the receiver can enhance dispersion tolerance of the system periodically equipped with signal regenerators to some degree, and (3) we proposed and discussed high functionality all-optical signal regeneration such as phase-sensitive amplification for QPSK signals.

研究分野：工学

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：フォトニックネットワーク 先端的通信 超高速情報処理

1. 研究開始当初の背景

光ファイバ通信を大容量化するための方法として、コヒーレント光伝送と検波後の電気信号処理を組合せた方式が有望視され活発な研究が進められている。この方式では、多値の光変調形式を用いることが可能となるため、周波数利用効率の高い光信号伝送が実現される。また、伝送路の分散による波形劣化も電気領域での信号処理によって適応的に補償することができる。この方式においては、伝送路中に配置された光増幅器からの雑音やファイバ伝送路の光非線形性による信号劣化がシステムの伝送性能を決める主要因となる。特に、変調多値数が増すほど雑音に対する耐性が弱くなるため、伝送距離が大きく制限される。

この制限を超えて伝送距離を延ばすためには、信号再生中継が必要になる。現存のシステムでは、光信号をいったん電気信号に変換し電気回路で信号を再生した後光信号に戻して送出する構成が用いられているが、光変調形式が高度になるほど光/電気/光変換が複雑になり、コストやエネルギー消費量が増大する。また、処理できる信号速度も数十ギガシンボル/秒程度に制限される。そこで、複雑な電気信号処理を使わずに信号に重畳された雑音を除去する光信号再生方式の実現が望まれており、これまでに多くの研究がなされてきた。今後、これらの研究を進展させ、コヒーレント光伝送システムで用いられる高度の変調形式の光信号をより簡素な構成で効率よく再生できる信号再生方式を実現することが必要である。

信号再生は本質的に非線形な信号処理であるので、処理されるべき信号は、再生器入力においてシンボル(光パルス)ごとに分離されている必要がある。つまり、再生される信号(波長分割多重伝送の場合は、各波長チャンネルの信号)に対して正確に分散補償を行いシンボル間の時間的な重なりが生じないようにする必要がある。この条件が満たされない場合には、雑音除去の効果が弱まると同時に非線形な符号間干渉により大きな波形劣化が生ずる。このように動作条件が理想的な条件から外れた場合にも、信号再生器の効果を維持する方法を考案することは、光信号再生器を実システムに導入する際に極めて重要である。光信号再生器に入力される光信号波形の最適制御や、信号再生操作に起因する符号間干渉の軽減は、送受信端での電気信号処理によって実現できる可能性がある。

2. 研究の目的

上記の背景のもとで、本課題では、(1)信号再生器のより一層の高機能化、高効率化、および、構成の簡素化をめざした検討を行うとともに、(2)光信号再生器が分散配置された長距離伝送系において、送受信端での信号波形・位相制御や系列推定などの電気信号処理を用いて系の耐分散性やロバスト性を

高める方法を明らかにする。

(1)については、信号再生操作の一部を電気信号領域で行う光・電気ハイブリッド型の信号再生器の構成を検討し、より簡便で実用性が高い信号再生器を開発する。具体的には、電気光学または電界吸収型変調器とフィードフォワード制御を組合せた振幅雑音除去方式や、遅延干渉計と光同相・直交位相(IQ)変調器を組合せた(D)QPSK 光信号再生器等の研究を行う。さらに位相感応型光増幅器や、パラメトリック増幅の飽和を利用した振幅制限器など、全光型信号再生の高機能化に取り組む。

(2)については、複数台の信号再生器が配置されたシステムにおいて、送信機における電気領域波形・位相制御や、受信機における系列推定等の電気信号処理によって、伝送路の残留分散の悪影響や再生操作によって発生するパルス間干渉を軽減できることを明らかにする。

3. 研究の方法

オン・オフ変調(OOK)、2値位相変調(BPSK および DPSK)、4値位相変調(QPSK および DQPSK)信号を対象とし、これらの信号に加わった振幅および位相雑音が提案する波形整形・信号再生操作によって低減することを、実験およびシミュレーションによって検証した。実験は毎秒10ギガシンボルの信号速度で行った。波形整形・信号再生の効果は、パワーペナルティおよびビット誤り率の低減によって評価した。

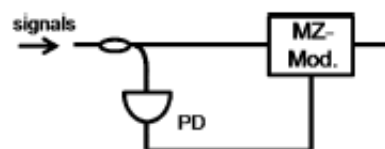
また、信号再生器が分散的に配置された伝送システムの情報速度を数値計算によって求め、信号再生器間の伝送路に分散がある場合の波形劣化の程度や、受信信号に対する系列推定などの信号処理の有効性を明らかにした。

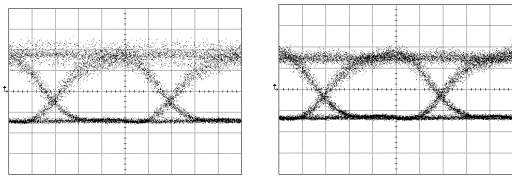
4. 研究成果

次の研究成果を得た

研究目的(1)に関する研究成果

信号光の一部を直接検波により電気信号に変換し、それを負の変調特性を有する光強度変調器に印加することにより、入力信号光に負のフィードフォワードをかけ、強度揺らぎを抑圧する信号再生器を提案し、その有効性を実験およびシミュレーションにより示した。光変調器としてはマッハツェンダーLN変調器および偏波無依存EA変調器を使用した。本回路は、強度変調信号光だけでなく、DPSK信号光やBPSK信号光に対しても有効であることを示した。図1に再生器の構成と、強度変調信号光の再生前後の波形の例を示す。(雑誌論文[2,6,7,8]、学会発表[2])





再生前アイパターン 再生後アイパターン
20ps/div

図1 フィードフォワード型強度揺らぎ抑圧回路と入出力信号のアイパターン

遅延干渉計により検出した信号光の差動位相を光位相変調器に印加することにより、信号光位相の揺らぎ成分を平均化して位相雑音を抑圧する回路を提案し、その有効性をシミュレーションにより示した。図2に、再生器構成を示す。

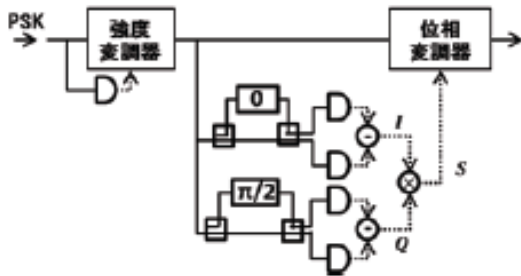


図2 揺らぎの平均化による位相雑音抑圧方式

2つの差動検波出力は

$I=A^2\cos[\theta(t-\tau)-\theta(t)]$,
 $Q=A^2\sin[\theta(t-\tau)-\theta(t)]$ で与えられ、その乗算処理により $S=IQ=(A^4/2)\sin\{2[\theta(t-\tau)-\theta(t)]\}$ を得る。ここで、 A は信号の振幅に比例する量、 $\theta(t-\tau)$ および $\theta(t)$ は連続する2つのシンボルの位相である。BPSK 信号を想定し、 $\theta(t-\tau)$ および $\theta(t)$ はゼロまたは π の値をとるとし、位相揺らぎを $\delta(t-\tau)$ および $\delta(t)$ とすると、 $S \approx (A^4/2)[\delta(t-\tau)-\delta(t)]$ となる。位相変調器により、 S に比例する位相変化 $(1/2)[\delta(t-\tau)-\delta(t)]$ を時刻 t のシンボルに加えると、時刻 t のシンボルの位相が $\theta(t)+\delta(t)+(1/2)[\delta(t-\tau)-\delta(t)]=\theta(t)+[\delta(t-\tau)+\delta(t)]/2$ となり、位相揺らぎが平均化されて低減されることがわかる。

図3に位相揺らぎ低減の数値計算結果を示す。(雑誌論文[4]、学会発表[5])

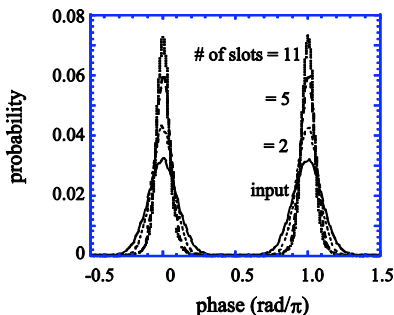


図3 揺らぎの平均化による位相雑音低減

遅延干渉計を用いて光の位相情報を電気信号として検出し、それによって再生器内の光源を変調するタイプの光電気ハイブリッド DQPSK 光信号再生器の提案と信号再生効果の検証実験を行った。電気信号に対してリミティング増幅を行うことにより強い波形整形効果が得られることと、電気回路に要求される帯域幅がシンボル速度の 50%程度であることを明らかにした。図4に、再生器の構成を示す。図5は再生前後の信号に対する受信感度と再生前の光信号対雑音比の関係である。信号再生器を通すことにより受信感度が最大 8dB 程度増大することがわかる。(学会発表[6])

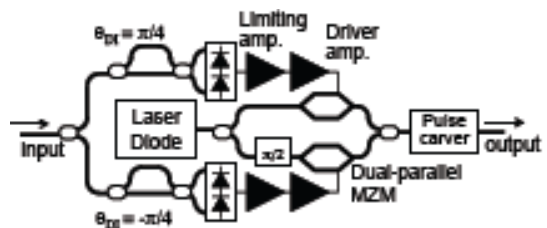


図4 光電気ハイブリッド DQPSK 信号再生器

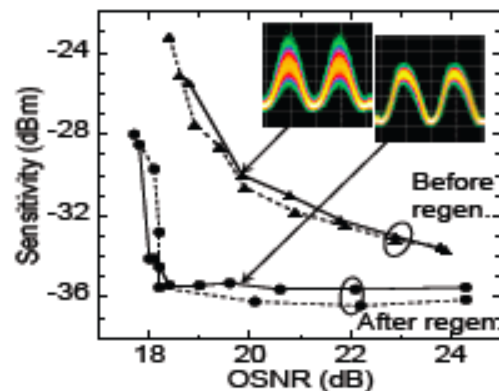


図5 再生前後の信号の受信感度

ホモダイン検出を用いて光の位相情報を電気信号として検出し、それによって再生器内の光源を変調するタイプの光電気ハイブリッドコヒーレント BPSK 信号再生器の提案と信号再生効果の検証実験を行った。また、キャリア成分を含まない位相変調信号から位相同期した光キャリアを生成する手法を新たに考案し、良好なキャリアを生成できることを実験により検証した。図6に無キャリアの BPSK 信号からキャリア光を抽出する回路を示す。図7にこのキャリア抽出手法によってホモダイン検波した受信アイパターン(位相同期回路をオフにした場合とオンにした場合)を示す。位相同期を働かせることによって良好なアイ開口が得られることがわかる。(学会発表[1])

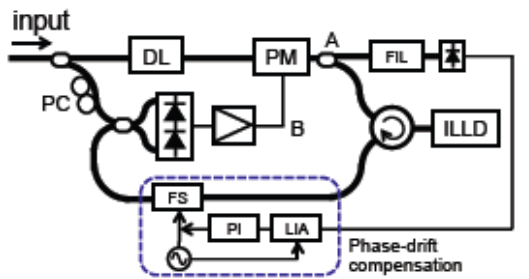


図6 BPSK 信号からのキャリア抽出 / ホモダイン検波回路

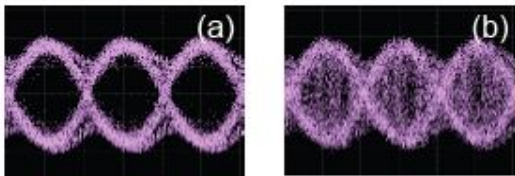


図7 ホモダイン検出信号のアイパターン
(a)位相同期オン、(b)位相同期オフ

位相変調信号光を直接信号再生する位相感応増幅器について研究した。図8に、QPSK全光信号再生器の構成を示す。3dB結合器の二つの端子を高非線形ファイバ(HNLF)で接続したループ構成となっている。Aから入射した信号光は、結合器で分岐され時計・反時計回りでHNLFを伝搬する。同時に、二つのポンプ光(E_{p1} 、 E_{p2})をA、Bから各々入射する。ここで、入射光周波数は $f_{p1}+f_{p2}=2f_s$ とする(f_s :信号光、 f_{p1} 、 f_{p2} :ポンプ光)。すると、HNLFループで信号光が位相感応増幅される。この際、結合器での位相シフトにより両廻りでの増幅位相特性は $\pi/2$ ずれている。両廻り信号光は結合器により位相が $\pi/2$ シフトして合波される。ここで、PSAが利得飽和状態であると、合波後の位相は入力信号位相に対して、 $\pi/2$ ごとの階段状となる。これによりQPSK信号再生が可能となる。図9に入力および出力QPSK信号のコンスタレーション図を示す。本信号再生により、QPSK信号の雑音が低減されていることがわかる。(雑誌論文[3]、学会発表[4])

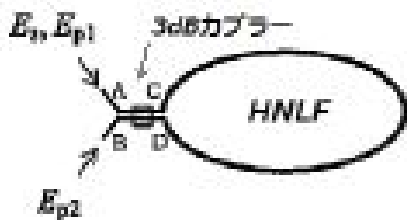


図8 QPSK全光信号再生器

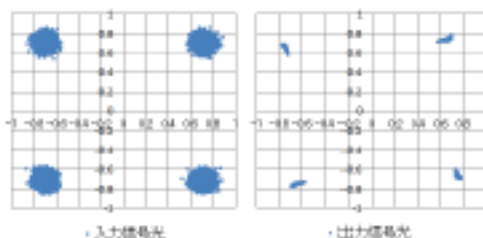


図9 再生器入出力におけるコンスタレーション図

研究目的(2)に関する研究成果

複数個の信号再生器が分布的に配置された伝送系において、伝送路の残留分散によってもたらされる非線形の符号間干渉による信号検出誤りを受信機における最尤系列推定によってある程度低減できることを数値計算によって確認した。

図10に解析した伝送系を示す。毎秒40GbitのOOK信号伝送系に周期的に信号再生器が配置されている。再生器間の残留分散を変えて情報速度(相互情報量)を計算した結果を図11に示す。残留分散が小さい場合は信号再生器を用いることによって大きい情報速度を得ることができるが、残留分散が大きいと、再生器を挿入することによって非線形の符号間干渉が生ずるため情報速度が低下することがわかる。図12は、再生器を挿入した場合において、受信端で最尤系列推定を行った場合のビット誤り率である。系列推定の状態数を増す(m を大きくする)ことによってビット誤り率が低下することがわかる。(雑誌論文[1])

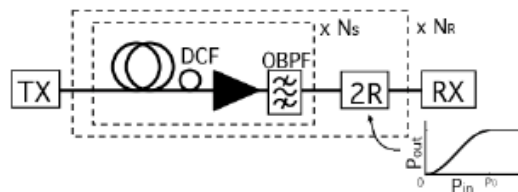


図10 信号再生器が周期的に配置された伝送系

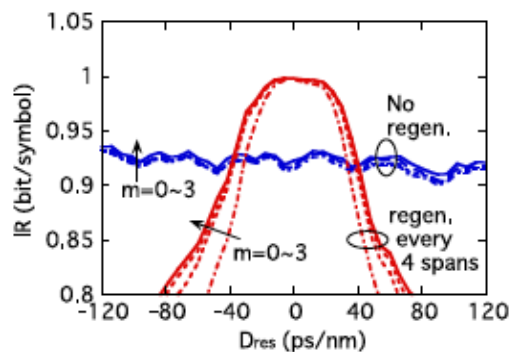


図11 情報速度と再生器間残留分散の関係

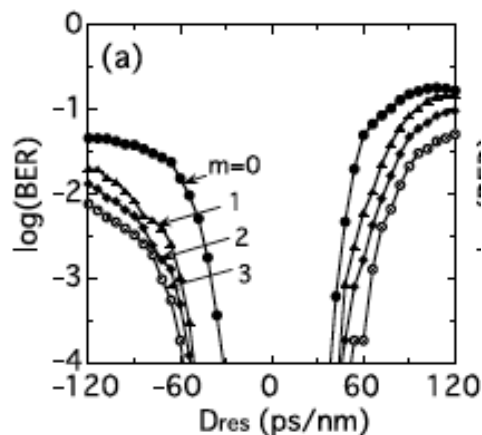


図 1 2 最尤系列推定を用いた場合 ($m \geq 1$) のビット誤り率と再生器間残留分散の関係

以上のように、本課題では光信号処理と電気信号処理を併用した光信号波形整形・再生方式に関する研究を行った。入力光信号を分岐・検波して得た電気信号を増幅・処理した信号によって入力光信号を変調するフィードフォワード型信号再生、および、入力光信号を電気信号に変換した後に雑音を除去し、再び光信号に変換するタイプの信号再生の両者について検討した。OOK、(D)BPSK、(D)QPSK など様々な変調形式の信号に対する雑音除去が、簡単な回路構成で実現できることを明らかにした。

また、信号再生器が分布的に配置された伝送路の特性を情報速度を指標として解析した。伝送路に残留分散があると信号再生器の波形整形効果が失われ伝送路の情報速度が劣化することや、特性劣化の一因であるパターン依存性波形歪みは、受信端における系列推定などの信号処理によってある程度軽減できることを示した。

さらに、ファイバの非線形効果を利用した全光信号再生について、ループ構造型 QPSK 信号再生や、パラメトリック増幅の飽和を利用した振幅再生の検討を行った。

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 1 件)

[1] M. Matsumoto, "Information-rate analysis of a fiber-optic transmission system including 2R signal regenerators", Opt. Express, vol. 21, 2013, 26762-26773, 査読有

DOI: 10.1364/OE.21.026762

[2] S. Okada and K. Inoue, "Operation condition of OOK signal regenerator with feed-forward control", Opt. Fiber Technol., vol. 20, 2013, 7-14, 査読有

DOI: 10.1016/j.yofte.2013.11.001.

[3] K. Inoue and S. Okazaki, "Phase-sensitive amplification in loop configuration for QPSK signal regeneration", Opt. Commun., Vol. 298-299, 2013, 202-206, 査読有

DOI: 10.1016/j.optcom.2013.02.047

[4] K. Inoue and M. Ohta, "Averaging of phase noise in PSK signals by an optoelectrical feed-forward circuit", Opt. Fiber Technol., vol. 19, 2013, 514-517, 査読有

10.1016/j.yofte.2013.07.007.

[5] M. Matsumoto, "Impact of dispersion slope on performance of fibre-optic-parametric-amplifier-based all-optical amplitude limiter", Electron. Lett., Vol. 49, 2013, 291-292, 査読有

DOI: 10.1049/el.2012.3293

[6] N. Kunigita and K. Inoue, "Improvement of OOK signals with a polarization-independent feed-forward control circuit using an electro-absorption modulator", Opt. Fiber Technol., Vol. 19, 2013, 185-188, 査読有

DOI: 10.1016/j.yofte.2012.12.008

[7] N. Kunigita, H. Takamiya, M. Fukutoku, and K. Inoue, "Amplitude regeneration of NRZ-DPSK signal with a feed-forward control circuit", Opt. Fiber Technol., Vol. 19, 2013, 52-54, 査読有

DOI: 10.1016/j.yofte.2012.10.003

[8] N. Kunigita, H. Kawahara, and K. Inoue, "Improvement of intensity-modulated signal with feed-forward control", J. Lightwave Technol., Vol. 30, 2012, 2839-2845, 査読有

DOI: 10.1109/JLT.2012.2206559.

[9] M. Matsumoto, "Fiber-based all-optical signal regeneration", IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., Vol. 18, 2012, 738-752, 査読有

DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2136331.

[10] 松本正行, "光ファイバを用いた大容量信号伝送と高速光信号処理", 応用物理, Vol.80, 2011, 1042-1048, 査読有

DOI.

[11] Nor. Shahida Mohd Shah, M. Sato, and M. Matsumoto, "Adaptive delay control for time-interleaved multi-channel amplitude limiter based on saturation of four-wave mixing in a fiber", Opt. Express, Vol. 19, 2011, 21246-21257, 査読有

DOI: 10.1364/OE.19.021246.

[学会発表](計 2 5 件)

[1] M. Matsumoto and R. Nishimura, "Optical carrier extraction from carrier-less QPSK signals", IEEE Photonics Society 2014 Summer Topical Meeting Series,

Nonlinear-Optical Signal Processing, Montreal, Canada 発表予定 .

[2] S. Okada, S. Suwa, K. Igarashi, and K. Inoue, "Optoelectronic regeneration of binary phase-shift keying optical signals based on a feed-forward control of a LiNbO₃ intensity modulator," OECC2014, 2014.7.6-10, Melbourne, Australia 発表予定 .

[3] M. Matsumoto, "Optical carrier extraction for homodyne detection of BPSK signals", The 18th OptoElectronics and Communications Conference/ Photonics in Switching 2013, July 2, 2013, Kyoto .

[4] K. Inoue and S. Okazaki, "Phase-sensitive amplification in fiber-loop for QPSK signal regeneration", 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2013), June 12, 2013, San Jose, USA.

[5] K. Inoue and M. Ohta, "Averaging of phase noise in NRZ-PSK signals by using an optical and electrical feed-forward circuit", 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2013), June 10, 2013, San Jose, USA.

[6] M. Matsumoto, S. Kou, and S. Tanaka, "Opto-electronic multi-level signal regeneration", 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2013), June 10, 2013, San Jose, USA.

[7] M. Matsumoto, "Regeneration of multi-level phase-shift keying optical signals", The 7th International Conference on Nanophotonics (ICNP)/The 3rd Conference on Advances in Optoelectronics and Micro/Nano Optics (AOM), May 22, 2013, 香港理工大学 .

[8] M. Matsumoto, "All-optical and opto-electronic signal regenerators", 15th International SAOT (The Erlangen Graduate School in Advanced Optical Technologies) Workshop on All-Optical Signal Regeneration, Sep. 28, 2011, Erlangen, Germany.

[9] M. Matsumoto, "Optical parametric regeneration of phase-modulated signals", Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO2011), May 4, 2011, Baltimore, USA.

〔図書〕(計1件)

[1] M. Matsumoto, Springer Verlag, "Optical regenerators for novel modulation schemes", in Impact of Non-linearities on Fiber Optic Communications, S. Kumar Ed., 2011, 415-450.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.wakayama-u.ac.jp/~mmatsu/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

松本 正行 (MATSUMOTO, Masayuki)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：10181786

(2)研究分担者

井上 恭 (INOUE, Kyo)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10393787