

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 4日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360155

研究課題名（和文） 位相感応型光中継増幅技術の研究

研究課題名（英文） Study of phase sensitive amplifier repeaters

研究代表者

高田 篤（TAKADA ATSUSHI）

徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授

研究者番号：00548563

研究成果の概要（和文）：光利得が入力光の光位相に依存する光増幅器である位相感応型光増幅器の基本性能パラメータとパラメトリック増幅媒質（シリカ光ファイバ及び疑似位相整合ニオブ酸リチウム結晶導波路）のデバイスパラメータの依存関係と、これらの中継増幅器としてBPSK/QPSK 多中継光ファイバ伝送系に適用した場合の再生中継間隔の延伸効果を理論的に明確化した。また、励起光位相同期系の位相誤差によるパワペナルティも明確化した。更に世界で初めて、励起光位相制御に光位相同期ループ回路を適用して位相感応増幅効果を実証した。

研究成果の概要（英文）：Fundamental gain characteristics of optical phase-sensitive amplifier which have input-optical phase dependent gain are clarified, in the case that silica optical fiber and quasi-phase matched Lithium Niobate waveguide is applied as a parametric medium. Regenerative repeater spacing is also calculated when the PSAs are adopted as repeater amplifiers in repeated BPSK/QPSK optical fiber transmission system. Power penalty due to optical phase error between pump and input signal light is also clarified. Experiment using optical phase-lock loop circuit for pump phase control is successfully demonstrated for the first time.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2011年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2012年度	2,000,000	600,000	2,600,000
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

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：通信方式（無線、有線、衛星、光、波動）

1. 研究開始当初の背景

基幹系通信網における基幹伝送システムには、現在最も大容量なシステムとして情報伝送速度 40 Gbit/s のシステムが適用されている。増大する通信トラヒックに対応するため、次期伝送システムとして光コヒーレント送受信技術と信号処理技術を適用した情報伝送速度 100Gbit/s のシステムが実用化されているが、今後のさらなる通信トラヒック需

要の増加に対して、次期システムより高速の情報伝送速度、より長距離の伝送距離を有する次世代伝送システムの研究開発が必要とされていた。

2. 研究の目的

次世代伝送システムに適用する技術として、高速大容量光送受信技術、低損失低歪み光伝搬ファイバ技術、低雑音低歪み光中継技

術等の研究開発が必要である。この中で情報伝送速度や伝送距離等のシステム伝送性能向上効果が大きいのは、光中継技術の革新である。位相感応型光増幅は、入力信号光が有する光位相雑音を抑圧すると共に、波形整形効果を有することが知られている。本研究課題では、光中継技術の革新を目指し、従来適用されているエルビウム添加光ファイバ増幅(EDFA)中継に代わり、光パラメトリック増幅原理を適用した位相感応増幅中継システムに関する基本技術を明確化することを目的としている。

3. 研究の方法

位相感応型光増幅器を増幅中継器として適用した多中継光ファイバ伝送系では、従来のEDFA中継では劣化していた光信号の信号対雑音電力比の劣化を抑圧・向上し、また増幅中継毎に光ファイバ伝送路の伝搬により波形劣化した光信号パルスを整形する。これらの効果により、情報伝送速度の高速化と光伝送距離の延伸が期待されていた。本課題では、以下の観点から位相感応型光増幅中継の基本技術を検討した。

(1)位相感応型光増幅の基本性能：位相感応増幅を実現するには光パラメトリック増幅(OPA)が用いられる。OPAには高光非線形ファイバなどの3次の光非線形効果を用いたものと、周期分極反転による疑似位相整合型ニオブ酸リチウム(PPLN)結晶導波路などの2次の光非線形効果を用いたものがある。本課題では、これらのパラメトリック増幅材料パラメータと基本増幅パラメータの関係を検討した。

(2)再生中継間隔の検討：増幅中継器にPSAを適用した場合の再生中継間隔の延伸効果について、信号対雑音電力比の劣化により制限される再生中継間隔と符号間干渉による制限距離を光変調方式BPSKとQPSKについて理論検討した。

(3)励起光位相誤差による信号劣化の検討：位相感応型光増幅では、光パラメトリック増幅の励起光位相を信号光の平均光位相に同期する必要がある。位相感応型光増幅器内に用いられるパラメトリック増幅のための励起光と信号光搬送波との光位相誤差による信号品質の劣化を理論的に検討した。

(4)位相同期ループ回路を適用した実証実験：従来の研究報告例では、半導体レーザーへの光搬送波の光注入同期法がもっぱら適用されている。本課題では、位相同期時定数等を電子的に調整可能な位相同期ループ回路を適用した構成を検討した。デジコンドリブ型コスタスループ回路による励起光位相制御により位相感応増幅の実証実験を実施した。

(5)波長分割多重伝送への適用：波長分割多

重(WDM)信号の一括位相感応増幅する場合の、PSA内部で生じる波長チャンネル間クロストークを理論的に検討した。

4. 研究成果

(1)位相感応型光増幅の基本性能

光ファイバとPPLNを利得媒質とする縮退及び非縮退パラメトリック増幅による位相感応増幅の基本特性を理論的に明確化した。一例として高非線形光ファイバを適用した非縮退パラメトリック位相感応型増幅の励起光パワー対利得特性を図1に示す。

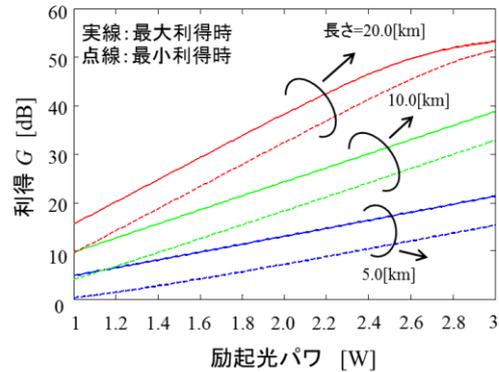


図1 高非線形ファイバを利得媒質とした非縮退パラメトリック位相感応増幅特性

光ファイバの非線形係数は10/W/km、損失は0.3 dB/kmである。非縮退パラメトリック増幅時に信号光と共に増幅するアイドラ光として、信号光位相の3倍の光位相を有する光を想定している。信号利得は入力信号光位相により、最少利得と最大利得の間の値をとる。最少利得と最大利得となる入力光位相は45度の差があり、QPSK信号に対応した動作となっている。縮退パラメトリック増幅を適用した場合と比較して、最大利得と最少利得の差が小さいため、中継増幅時の位相雑音抑圧効果が小さいことがわかる。従って、詳細な再生中継間隔延伸効果を検討する必要があることがわかる(次項)。また出力光の位相雑音を高い比率で抑圧するには、同時に増幅するアイドラ光パワーの最適値も明確化した。これらの検討によりPSA回路の基本設計を可能とした。

(2)再生中継間隔の検討

BPSK信号、及びQPSK信号に対して、それぞれ縮退パラメトリック位相感応増幅中継、非縮退パラメトリック位相感応増幅中継した場合の再生中継間隔を数値計算により求めた。再生中継間隔は、信号対雑音電力比の劣化と符号間干渉の両方によって制限されるため、前者を雑音解析、後者を非線形シュレジンガー方程式を用いた波形解析により求めた。更に前者では、中継増幅器が発生する自然放出光(ASE)雑音光が伝送路光ファ

イバ伝搬により信号光の位相雑音に変換される効果（位相雑音増強効果）も勘案した。図2にQPSK信号中継時のIまたはQチャネル信号の信号対雑音電力比(SNR)の中継回数依存性を示す。

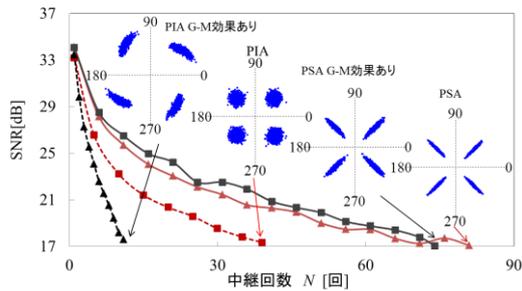


図2 信号対雑音電力比の中継回数依存性

従来のEDFAなどの位相非感応光増幅(PIA)中継では、伝送路光ファイバ伝搬により生じる位相雑音増強効果の影響を受けて中継段数の増加と共にSNRが大きく劣化するのに対して、PSA中継では増幅と共に入力信号光が有する光位相雑音を抑制するため、位相雑音増強効果があっても伝送特性に大きな劣化が生じないことがわかる。また、SNRの劣化の原因は振幅雑音が増加することによることを明確化した。

図3に波形劣化によるアイ開口率の中継回数依存性を示す。分散補償を併用することにより波形劣化を大幅に抑圧可能である。

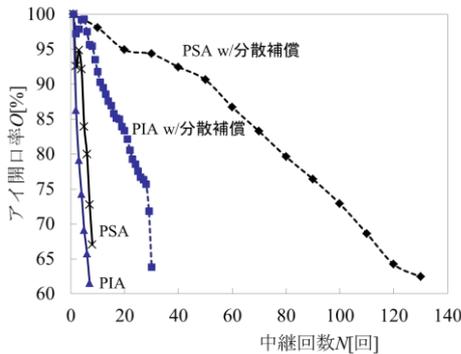


図3 アイ開口率の中継回数依存性

再生中継間隔の計算結果の一例として、QPSK信号に対して非縮退パラメトリック位相感応増幅を適用して多中継した場合の再生中継間隔を図4に示す。シンボル速度は25 Gsymbol/s、増幅中継区間距離80 km、区間損失24 dB、受信方式はホモダイナミック方式とした。

ISI limit, SNR limitは、それぞれ符号間干渉による再生中継回数、信号対雑音電力比の劣化による再生中継回数である。非縮退パラメトリック位相感応増幅中継を適用したQPSK信号伝送系の再生中継間隔に関する検討はこれまでにない。送信光パワを最適化する

ることにより、再生中継間隔を8倍程度に延伸できる可能性を示した。伝送路分散制御により更なる再生中継間隔延伸の可能性がある。

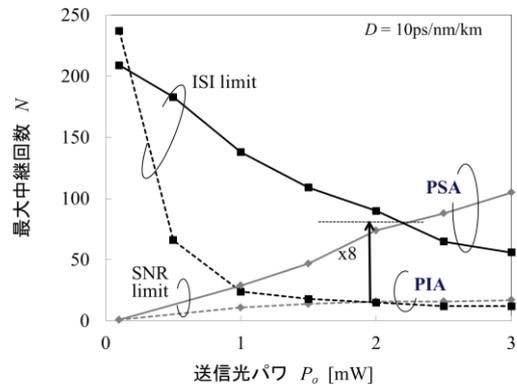


図4 QPSK-PSA中継系の最大中継回数

(3) 励起光位相誤差による信号劣化の影響

BPSK信号及びQPSK信号に対してそれぞれ縮退パラメトリック位相感応増幅中継と非縮退パラメトリック位相感応増幅中継を適用した多中継伝送系において、各位相感応増幅中継器においてパラメトリック増幅の励起光と入力信号光の平均光位相間に位相誤差が生じた場合の再生中継間隔に対するペナルティについて理論的に検討した。PSA多中継伝送系におけるPSA位相誤差に関する理論検討は世界で初めてである。図5にQPSK信号伝送系におけるパワーペナルティの中継回数依存性の計算結果を示す。

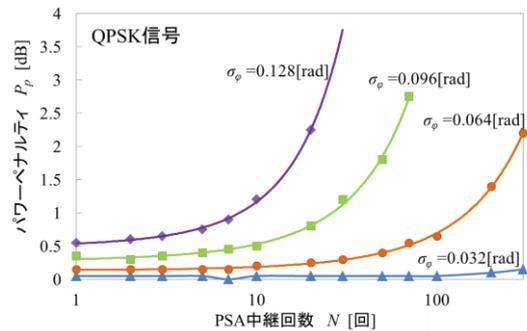
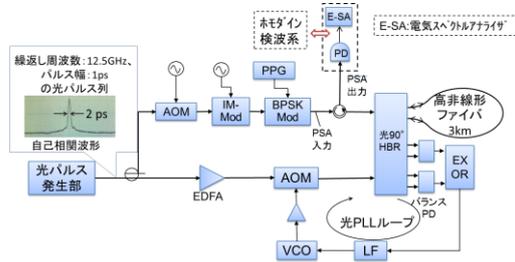


図5 PSA励起光位相誤差によるペナルティ

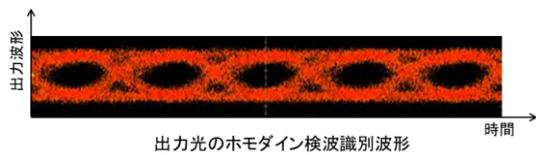
図中 σ_ϕ は、ガウス型位相雑音を想定した場合の励起光位相と入力光平均位相の位相誤差の標準偏差である。中継段数の増加により信号品質が劣化しパワーペナルティが増加している。信号光に重畳された光雑音の信号空間上の分布から、位相感応型増幅中継器の励起光位相誤差が信号光の振幅雑音に変換されていることを見出した。位相誤差計算結果より、標準偏差として64 mrad以下であ

ば、100 中継時のパワーペナルティが 1dB 以下に抑えられることがわかる。本理論検討は、PSA における励起光位相制御回路の設計指針を与えるものである。

(4) 位相同期ループ回路を適用した実証実験



(a) 光位相同期ループを用いた位相感応増幅実験系



(b) 増幅光の光ホモダイン受信波形

図 6 OPLL による位相感応増幅実験結果

光パラメトリック増幅のための励起光の位相を位相同期ループ回路 (OPLL) を用いて制御することにより位相感応増幅の実証実験を実施した。図 6 に実験系を示す。高非線形光ファイバを利得媒質として用いた縮退光パラメトリック位相感応増幅構成とした。信号光は BPSK 変調光、励起光は高ピークパワを得るため短パルス化した。OPLL 回路はデジジョンドリブンコスタスループ型回路であり、ループ制御帯域幅等を調整したうえで、誤差信号を AOM (音響光学変調) 型光周波数シフタに帰還している。同図 (b) に増幅された信号光のホモダイン受信波形を示す。安定な位相同期状態が保持されていることがわかる。

(5) 波長分割多重伝送への適用

波長分割多重信号 (WDM) 光に対する一括位相感応増幅時の増幅特性を検討した。特に、位相感応型光増幅では光パラメトリック増幅を用いているため、WDM 光間のパラメトリック相互作用により、波長チャンネル間クロストークが発生し、信号品質劣化につながる。パラメトリック増幅媒質が高非線形ファイバ及び PPLN 結晶導波路の 2 つの場合について、波長チャンネル間クロストークの発生量について検討した。PSA は、WDM 信号光の一括増幅を行ため、信号光と同一のデータを有するアイドラ光が周波数軸上で励起光周波数に対して対称に配置された WDM 光の非縮退パラメトリック増幅を想定した。

高非線形光ファイバを用いた場合、波長チャンネル間クロストーク光は 3 つの信号光及

び励起光と 2 つの信号光から発生する。PPLN を用いた場合では、波長チャンネル間クロストーク光は、2 つの信号光により発生する和周波光と 1 つの信号光間の差周波光発生過程により生じる。それぞれの場合について数値計算によりクロストーク量を求めた。

その結果、どちらの場合も信号利得を増加させるとチャンネル間クロストークが増加し、クロストーク量 30 dB 以上に達する可能性があることを明確化した。さらに PPLN を用いた PSA の場合について、チャンネル間クロストーク光の発生を抑圧する方法を考案し、その効果を計算により実証した。

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)

[学会発表] (計 16 件)

① 堺友哉、他、Experiment on Phase Sensitive Amplification of BPSK Signal Using Phase-lock Costas Loop Circuit、Optoelectronics and Communications Conference 2013、2013 年 07 月 2 日、京都国際会議場 (京都府)

② 高田 篤、他、位相感応型光増幅中継技術、レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会招待講演 (招待講演)、2013 年 01 月 29 日、姫路商工会議所 (兵庫県)

③ 高田 篤、他、位相感応型光増幅中継技術、レーザー学会学術講演会第 33 回年次大会招待講演 (招待講演)、2013 年 01 月 29 日、姫路商工会議所 (兵庫県)

④ 橋本佳祐、他、位相感応型光増幅中継を用いた QPSK 多中継系伝送系の基本特性のシミュレーション解析、社団法人電子情報通信学会総合大会、2012 年 3 月 22 日、岡山大学 (岡山県)

⑤ 中谷栄希、他、位相感応型光増幅中継伝送系における光位相同期誤差累積に関する検討、社団法人電子情報通信学会総合大会、2012 年 3 月 22 日、岡山大学 (岡山県)

⑥ 高田 篤、他、位相感応型光増幅中継技術、社団法人電子情報通信学会 (招待講演)、2011 年 9 月 14 日、北海道大学 (北海道)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高田 篤 (TAKADA ATSUSHI)
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部・教授
研究者番号：00548563

(2) 研究分担者

古賀 正文 (KOGA MASAFUMI)
大分大学・工学部・教授
研究者番号：60448545

(3) 連携研究者

()
研究者番号：