



Title	光パラメトリック信号処理による広帯域・低雑音光伝送システムに関する研究
Author(s)	清水, 新平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(情報科学)
Dissertation Number	甲第16988号
Issue Date	2026-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k16988
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/99832
Type	doctoral thesis
File Information	Shimpei_Shimizu_abstract.pdf, 論文内容の要旨 https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（情報科学） 氏名 清水 新平

学 位 論 文 題 名

光パラメトリック信号処理による広帯域・低雑音光伝送システムに関する研究
(Study on Wideband and Low-Noise Optical Transmission Systems Based on Optical Parametric
Signal Processing)

光ファイバを伝送媒体とする光伝送システムは、長距離かつ高速な情報通信手段として、現代の高度情報化社会の根幹を担う技術となっている。1990 年代後半には、光の波長（周波数）方向の直交性を利用し、異なる波長に異なる情報を変調して多重伝送する波長分割多重（WDM）方式と、エルビウム添加光ファイバ増幅器（EDFA）を用いて光信号を光のまま中継する光増幅中継技術によって、経済的な長距離大容量伝送技術が確立された。現在では、2010 年代より導入された、デジタル信号処理と光の波としての性質を最大限活用したデジタルコヒーレント方式を基盤として、光ファイバー本あたり 10 テラビット毎秒級の伝送容量で数百 km 以上にわたり増幅中継伝送が可能なシステムが実現されている。

このように、増加し続ける通信トラフィックを様々な技術のタイムリーな導入によって支えてきた光伝送システムであるが、その性能は物理限界に近づきつつあり、さらなる性能向上を実現するには新たな技術革新が必要となる。そこで本論文では、光伝送システムの性能を制限する要因として、光増幅器の自然放出光雑音、光ファイバ中の三次非線形光学効果に起因する信号歪み（非線形シャノン限界）、伝送帯域の 3 点に着目し、これらに起因する物理限界を克服する手段として光パラメトリック信号処理の適用を検討する。光パラメトリック信号処理は、非線形光学効果を利用して信号を増幅する光パラメトリック増幅器（OPA）によって様々な信号処理を全光学的に施す技術である。本研究では、高効率周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN）導波路デバイスを基盤とした二次非線形光学効果による OPA の適用によって、従来の限界を超えた光伝送システムの広帯域化、低雑音化によるさらなる性能向上の可能性について検討する。以下、本論文の要旨を各章ごとに述べる。

第 1 章では、本論文の研究背景として、陸上系基幹光ファイバ伝送システムの変遷を例とし、光伝送システムの現状の到達点とさらなる高度化に向けた課題についてまとめた。第 2 章では、光パラメトリック増幅器（OPA）の基本原理と、位相感応増幅器（PSA）、光位相共役変換（OPC）、波長変換、広帯域増幅中継の 4 つの光パラメトリック信号処理技術について、その基本的なコンセプトと光伝送システム応用に関する先行研究をまとめた。

第 3 章では、光パラメトリック信号処理を用いた伝送システムの設計項目を明確にすることを目的として、OPA の飽和領域での動作が光信号に与えるペナルティについて網羅的な実験評価を行った。信号品質の過剰な劣化を抑制するためには高い光パワーで光信号を取り扱う必要があるため、高パワー入出力時の特性を明らかにすることが重要となる。また、第 4 章では、ポンプレーザの要求特性を明確にするため、ポンプ位相雑音が信号品質に与える影響について、様々なユースケースでの評価を行った。伝送システム応用においては光ファイバ伝送に伴う波長分散の累積との相互作用で過剰なペナルティが生じることを見出し、その定量化と軽減方法の提案を行った。

第 5 章では、従来の物理限界を超えた低雑音性を実現する PSA を用いた光伝送システムの広帯域

化についての検討を行った.PSA はシグナル光とアイドラ光とを OPA 内で重ね合わせることで、雑音を伴わない増幅利得を生じさせ、超低雑音増幅を実現する技術である。しかしながら,PSA を WDM 信号のような広帯域信号に適用する場合、シグナル光とアイドラ光とを重ね合わせる際に、これらの間の相対位相を揃える必要があるため、増幅前に波長分散による位相変化を高精度に補償する必要がある。ここでは、伝送系の残留波長分散を PSA の動作状態から高精度に推定し補償する方法を提案し,PSA の伝送実験例としては最も広帯域となる 4 THz 帯域の WDM 位相感応増幅伝送を実証した。また、第 6 章では、位相感応増幅伝送システムの簡素化に向け、デジタル両側波帯変調を用いた方式を提案した。提案方式によって、従来は光学的に行う必要があったアイドラ光の生成と波長分散補償とをデジタル信号処理で行うことで、汎用的かつ簡易に PSA を伝送システムに適用することができるようになる。実験実証として、光学的な波長分散補償を行わない 200 km の標準シングルモードファイバ伝送系において,PSA による超低雑音増幅と高感度受信を適用できることを示した。

第 7 章では、通信トラフィックの少ない過疎地域網における中継間隔長延化に向けた検討として、非零分散シフトファイバのような低分散な光ファイバを用いた伝送系における OPC の適用について検討した。OPC は、伝送スパンの間で OPA による位相共役変換を行うことで、前の伝送スパンで光信号に生じた非線形歪みを次の伝送スパンで生じる歪みで相殺し補償する技術である。これにより、従来の非線形シャノン限界を超えた伝送システムの性能向上を実現できる。ここでは,OPC の適用によって狭帯域な非線形効果は効果的に補償されるが、広帯域な非線形効果の補償効率は伝送条件によって限定的となるため、非線形信号歪みの内訳として相互位相変調効果が強調されることを明らかにした。その結果,WDM チャネルの波長間隔が伝送品質に大きな影響を与え、従来よりも重要な設計パラメータとなることを示した。また、第 8 章では、大容量伝送網における OPC の活用に向け、高利得かつ広帯域な PPLN 型 OPC と EDFA を用いた C+L 帯ハイブリッド増幅中継器の提案と、それを用いた C+L 帯マルチバンド増幅中継伝送実験を行った。広帯域伝送システムに OPC を適用することで、ファイバ非線形性による信号歪みを軽減できるだけでなく,OPC に伴うスペクトル反転作用を利用して伝送ファイバ内の広帯域誘導ラマン散乱の影響を補償し、複数波長帯にわたって均一な信号品質での長距離伝送を実現できることを実証した。

第 9 章では、さらなる伝送帯域拡張に向けた OPA の広帯域化についての検討を行った.PPLN 導波路の位相整合特性を温度制御によって離調できることに着目し、相補的に離調制御した PPLN 導波路のカスケードによって、増幅利得を維持しながら効率的に広帯域化できる構成を提案した。また、提案構成を用いた 8 THz 超のシームレスな増幅帯域による広帯域増幅中継伝送を実証した。

最後に、第 10 章では、本論文で得られた成果を総括し、光パラメトリック信号処理に基づく広帯域・低雑音光伝送システムの展望について述べた。