

採 択 番 号 : 175B01

課 題 名 : 光周波数・位相制御光中継伝送技術の研究開発

個別課題名 : 課題 B 広帯域マルチキャリア光パラメトリック増幅中継技術

副 題 : 大容量マルチキャリア信号の高ダイナミックレンジ中継増幅技術

(1) 研究開発の目的

近年、飛躍的な進歩を遂げ、今後の光伝送の柱として期待されているデジタルコヒーレント技術のもつ潜在能力を一層向上させ、通信トラフィック需要の急速な増大に応えるために、電氣的なデジタル信号処理 (DSP) 技術のみならず、光のコヒーレンスを駆使した革新技術でブレークスルーを生み出すことが望まれている。本研究では、ネットワークの信号対雑音比 (SNR: Signal-to-noise ratio) の劣化を最小限に抑え、伝送距離の制限緩和を目指すアプローチとして、EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) に比べて低雑音増幅ならびに非線形位相雑音低減の可能性を持つ光パラメトリック増幅器の実現を目指す。産学連携により、それぞれの強みを持ち寄ることで、多値変調信号/マルチキャリア信号に対応した光パラメトリック増幅技術、光パラメトリック媒質を励起するための低遅延・高出力励起光生成技術、位相感応型光増幅時の安定動作のための励起光位相制御技術の研究を行う。また、課題 A、B の技術を連携し、1 Tbps 相当の光パス容量を有するマルチキャリア多値変調信号の中継伝送において、従来の EDFA を用いた中継増幅方式に比べて伝送距離延伸をはかり、周波数利用効率と伝送距離との積 (SDP: SE-Distance Product) を 2 倍以上にすることが可能な要素技術を確立する。

(2) 研究開発期間

平成 26 年度から平成 29 年度 (4 年間)

(3) 実施機関

日本電信電話株式会社<代表研究者>  
古河電気工業株式会社  
国立大学法人徳島大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

総額 274 百万円 (平成 29 年度 63 百万円) ※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

課題 B-1: マルチキャリア低雑音光パラメトリック増幅技術の研究

B-1-1. PPLN 型光パラメトリック増幅技術の研究 (日本電信電話株式会社)

B-1-2. ファイバ型光パラメトリック増幅技術の研究 (古河電気工業株式会社)

B-1-3. 課題 A との統合動作 (日本電信電話株式会社)

課題 B-2: 高出力励起光生成技術の研究 (古河電気工業株式会社)

課題 B-3: 励起光位相制御技術の研究

B-3-1. 励起光位相制御光回路の構成技術の研究 (国立大学法人徳島大学)

B-3-2. 励起光位相制御光回路の実装技術の研究 (日本電信電話株式会社)

## (6) 特許出願、論文発表等

		累計 (件)	当該年度 (件)
特許出願	国内出願	11	3
	外国出願	1	0
外部発表	研究論文	5	1
	その他研究発表	72	17
	プレスリリース・報道	8	0
	展示会	6	1
	標準化提案	0	0

## (7) 具体的な実施内容と成果

- ・課題 B-1 マルチキャリア低雑音光パラメトリック増幅技術の研究

## B-1-1. PPLN 型光パラメトリック増幅技術の研究 (日本電信電話株式会社)

## 【目標】

PPLN 型の光パラメトリック増幅部が位相感応型動作時に 2 dB 未満の雑音指数を実現可能であることを実証する。また PPLN 型の光パラメトリック増幅部の偏波無依存型プロトタイプを試作し、10 nm 以上の波長帯域にわたりマルチキャリア信号を 15 dB 以上の利得で増幅できることを確認し、マルチキャリア多値変調信号に対応した PPLN 型の光パラメトリック増幅技術を確立する。

## 【実施内容および成果】

多値信号が増幅可能な構成において帯域 12 nm の低クロストークな WDM 信号一括位相感応光増幅 (利得 +17 dB) を実証するとともに、増幅媒質である PPLN デバイスの改良により最終目標を 10 倍上回る +25 dB の利得を達成し、雑音指数としても 2 dB 以下の NF : 1.5 dB を達成した。さらに、偏波ダイバシティ構成の適用により偏波多重信号の位相感応光増幅に成功し、既存のデジタルコヒーレントシステムとの親和性を高めたうえで位相感応型光パラメトリック増幅部のプロトタイプ化を行った。さらに、光パラメトリック増幅の新たな応用として検討した非線形歪み補償技術においては、従来の 2 倍以上の帯域利用効率を有する位相共役変換器の基本構成の考案から大規模 WDM 信号への適用実証まで行うことに成功した。

## B-1-2. ファイバ型光パラメトリック増幅技術の研究 (古河電気工業株式会社)

## 【目標】

ファイバ型の光パラメトリック増幅部が位相感応型動作時に 2 dB 未満の雑音指数を実現可能であることを実証する。またファイバ型の光パラメトリック増幅部の偏波無依存型プロトタイプを試作し、10 nm 以上の波長帯域にわたりマルチキャリア信号を 15 dB 以上の利得で増幅できることを確認し、マルチキャリア多値変調信号に対応したファイバ型の光パラメトリック増幅技術を確立する。

## 【実施内容および成果】

帯域 40 nm、利得 19 dB、NF 4.5 dB のパラメトリック増幅を行える偏波保持型の分散安定化高非線形ファイバを開発した。

偏波無依存で増幅できるファイバ型光パラメトリック増幅器を 19 インチ筐体に収納したプロトタイプが、帯域 35 nm、利得 19 dB、NF 5.0 dB であることを確認した。さらに、課題 A との連携実験を通して、偏波無依存パラメトリック増幅には過渡応答のないことを実証した。

## B-1-3. 課題 A との統合動作（日本電信電話株式会社）

## 【目標】

課題 B-1、課題 B-2、課題 B-3 の統合動作で得られた知見を活かした光パラメトリック増幅器プロトタイプを完成させる。また課題 A や必要に応じて先行する委託研究等とも連携し、課題 A で試作した高コヒーレンシ半導体レーザー等を光源として生成した 1 Tbps 相当の光パス容量を有するマルチキャリア多値変調信号を用いて、課題 B で試作した光パラメトリック増幅器を用いて中継伝送を行い、現状の 100 Gbps デジタルコヒーレント方式技術に比べて SDP を 2 倍以上に拡大可能であることを実証する。

## 【実施内容および成果】

課題 B-1、課題 B-2、課題 B-3 で作製した光パラメトリック増幅部、励起光生成部、励起光位同期期部の一体動作により、位相感応型光パラメトリック増幅器のプロトタイプを完成させた。デジタルコヒーレント技術との整合性のとれる波長多重 (WDM)・偏波多重 (PDM)・多値 (16QAM) 信号に対する中継増幅が可能で、正味利得として 20 dB 以上、帯域 12 nm 以上の増幅動作を実証した。低雑音性としては、通常の EDFA に比べ 5 dB 以上の OSNR の差を確認した。

また、従来の光増幅器 (EDFA) に比べ過渡応答性のない光パラメトリック増幅器の特徴を生かし、課題 A の要素技術である高速光周波数スイッチング光源と課題 B の要素技術である瞬時応答光パラメトリック増幅器の連携実験により、過渡応答の極めて小さい光増幅特性の実証に成功した。

また、先行課題 153 (λリーチ) との連携実験により、課題 175A の光周波数安定化光源技術を用いることで、周波数間隔 37.5 GHz 間隔まで狭め、WDM システムの周波数利用効率を約 1.3 倍以上高密度化することが可能であることを実験実証した。

また、新たに提案・構築した相補スペクトル反転位相共役変換器を用いて 3,840 km の長距離伝送において大容量・高周波数利用効率 (容量 13.6 Tbps、周波数利用効率 5.84 bit/s/Hz) の WDM 伝送における一括非線形歪み補償に成功した。さらに、課題 A の要素技術である光周波数安定化光源を送信器光源に適用した伝送実験評価により、相補スペクトル反転位相共役変換器を適用することで約 1.5 倍の距離延伸が実現できることを示した。これにより、課題 A および B の技術を用いることで 1.3 倍以上の高密度化と 1.5 倍の距離延伸により SDP を 2 倍に拡大できることを実証した。

また、96 Gbaud PDM-8QAM 信号を用いた伝送実験により 1 Tbit/s 級 (サブキャリアあたり 500 Gbps 超) の高速ボーレート信号 (100 GHz 級広帯域信号) へ本光パラメトリック増幅による非線形歪み補償技術が適用可能であることも示した。さらに、デジタル信号処理回路の負荷軽減効果を検証し、波長分散補償および非線形補償の両方の観点においてデジタル信号処理負荷を 50 分の 1 以下に低減し、それらの低減量が波長多重数分だけスケールできる可能性があることを示した。

## • 課題 B-2 高出力励起光生成技術の研究（古河電気工業株式会社）

## 【目標】

光パラメトリック増幅器を位相感応型光増幅動作させた場合において、位相感応型光増幅器のフィードバックループが安定に動作するのに十分な短尺さで、かつ、光パラメトリック増幅器の励起光として十分機能するワット級の出カパワーを持つ偏波保持型光増幅技術を確認する。また、マルチキャリア信号を中継伝送する光パラメトリック増幅器に適した励起光増幅技術を確認し、プロトタイプ化を行う。

## 【実施内容および成果】

総ファイバ長 16.4 m と最大 500 kHz の位相負帰還制御に影響を与えない短尺さで、-10 dBm と微弱な信号光を 7 W にまで、雑音指数 5 dB と低雑音に増幅する偏波保持増幅を確認した。この特性を持つ 2 台の偏波保持増幅器を 19 インチ 2U の筐体に収納し

たプロトタイプが、マルチキャリア信号を中継伝送する位相感应型パラメトリック増幅に適用できることを確認した。

• 課題 B-3 励起光位相制御技術の研究

B-3-1. 励起光位相制御光回路の構成技術の研究（国立大学法人徳島大学）

【目標】

マルチキャリア多値変調信号の搬送波成分を基準として、パラメトリック媒質の励起光の位相を制御する励起光位相制御回路の基本構成と、SDP を 2 倍以上とするために必要な励起光位相制御回路への要求条件を明確化する。この中で位相感应型光増幅における雑音指数の定義と評価方法を整理提案する。

【実施内容および成果】

光パラメトリック位相感应型光増幅回路に適用する、励起光位相制御光回路の基本構成を明確化し、光増幅実験により原理実証に成功した。また、数値シミュレーションにより励起光位相誤差に対する要求条件を明確化した。さらに、位相感应型光増幅器の新たな雑音評価指標および、その測定方法を提案した。

B-3-2. 励起光位相制御光回路の実装技術の研究（日本電信電話株式会社）

【目標】

課題 A、課題 B-1、課題 B-2 と連携し、伝送実験等の実施によってマルチキャリア多値変調信号に対応したパラメトリック増幅器の位相感应型光増幅動作時の励起光位相制御技術を確立する。

【実施内容および成果】

位相感应型光パラメトリック増幅部に適合する励起光位相制御回路として、「課題 B-3-1 励起光位相制御光回路の構成技術の研究」において提案・実証実験が行われた和周波・2 倍波光位相同期回路を 19 インチラック内に収容可能なユニットに実装し、プロトタイプ化を行った。光周波数アナライザを用いて位相雑音量の評価を行い、QPSK や 16QAM といった多値変調信号光に対しても光位相同期回路が動作することを実証した。