

平成 27 年度研究開発成果概要書

課 題 名 : 革新的光通信インフラの研究開発

採 択 番 号 : 150ウ01

個別課題名 : 課題ウ マルチコア・マルチモード伝送技術

副 題 : マルチコア/マルチレベル/マルチモード光伝送技術の研究

(1) 研究開発の目的

光通信技術は過去 40 年間、超低損失光ファイバ、狭線幅半導体レーザ、低雑音光検出器、高速電子回路、広帯域光増幅器などの数多くの革新的な発明により着実に伝送容量を増加させており、特に過去 20 年間では 1,000 倍の大容量化を実現している。現在、我が国の基幹系商用システムでは 1 ファイバあたり 1.6 Tb/s が、また実験レベルでは 100 Tb/s 伝送が実現している。

この大容量光通信技術は伝送路である光ファイバや光増幅器の物理的限界に達しつつある。具体的には、大容量化に伴う光信号の高パワー化により光ファイバ中に誘起される非線形光学効果と、パワー集中により光ファイバのコア部が熔融して光ファイバを逆走するファイバフュージョン、光ファイバの低損失波長域と光増幅器の帯域制限などである。これに対して、現在我が国の通信トラヒックは依然として年率 1.4 倍で伸びており、20 年後には 1,000 倍の需要が予想される。

技術が確立している石英系光ファイバを使用しつつこの物理限界を打破するためには、コア部に集中する光信号パワー密度の最大値を下げる事が必要になる。

光信号パワー密度低減方法として最も有効なものは複数のコアに光信号を分散させるマルチコア伝送である。マルチコア伝送によって、通常の単一モードファイバを使用した場合に比べるとコア数分の伝送容量の拡大が期待できる。光信号パワー密度低減の別法としては単一モードファイバに比べてコア径の大きいマルチモードファイバを用いる伝送がある。従来マルチモードファイバ中をシングルモード伝送させる研究は行われているが、各伝搬モードを個別の伝送チャンネルとして用いるモード多重伝送を行う事により伝送容量の拡大も可能となる。また、モード多重伝送においては、伝搬モードごとにコア断面中の強度分布が異なるため、光信号パワー密度の最大値を低減できる可能性がある。

さらに、マルチコア・マルチモードに加え、3 つ目の超多重化技術としてマルチレベル(超多値)伝送方式を導入することにより、光ファイバの伝送能力をさらに向上させることが出来る。光の振幅と位相を同時に用いる QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 方式は、周波数利用効率を 10 b/s/Hz 以上に拡大できるため、限られた帯域の中で伝送容量を飛躍的に増大させることができる。この技術に空間多重を組み合わせることができれば、ファイバ 1 本あたりの周波数利用効率を一挙に 100 b/s/Hz にまで引き上げることが可能となり、光通信のパラダイムシフトを引き起こすことができるものと期待される。

本研究開発では、これらマルチコア伝送とマルチモード伝送、およびマルチコア伝送と超多値伝送を併用した革新的光伝送方式を採用することで将来の大容量光通信の需要に対応する技術を開発する。

(2) 研究開発期間

平成 23 年度から平成 27 年度 (5 年間)

(27-1)

(3) 実施機関

日本電信電話株式会社<代表研究者>、
国立大学法人東北大学（実施責任者 教授 中沢正隆）、
国立大学法人島根大学（実施責任者 教授 増田浩次）、
国立大学法人大分大学（実施責任者 教授 古賀正文）、
国立大学法人横浜国立大学（実施責任者 教授 國分泰雄）、
国立大学法人九州大学（実施責任者 教授 浜本貴一）

(4) 研究開発予算（契約額）

総額 419百万円（平成27年度 74百万円）
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発課題と担当

課題ウ-1：マルチコア伝送技術の開発

1. マルチコア伝送系設計・評価技術（日本電信電話株式会社）
2. マルチコアMIMO信号処理技術（日本電信電話株式会社）
3. マルチコア光増幅中継技術（国立大学法人島根大学）
4. マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術（国立大学法人大分大学）
5. マルチコア伝送の実証（日本電信電話株式会社）

課題ウ-2：超多値マルチコア伝送技術の開発

1. 超多値マルチコア送受信技術（国立大学法人東北大学）
2. 超多値信号のマルチコア伝送評価および総合実験（国立大学法人東北大学）

課題ウ-3：マルチモード伝送技術の開発

1. マルチモード伝送系設計技術（日本電信電話株式会社）
2. マルチモード光増幅中継技術（国立大学法人島根大学）
3. 単一コア伝送用モード合分波技術（日本電信電話株式会社）
4. 結合マルチコア伝送用モード合分波技術（国立大学法人横浜国立大学）
5. マルチモード光源技術（国立大学法人九州大学）
6. マルチモード伝送の実証（日本電信電話株式会社）

課題ウ-4：マルチコア・マルチモード伝送技術の開発

1. マルチコア・マルチモード伝送系設計技術（日本電信電話株式会社）
2. マルチコア・マルチモード伝送の実証（日本電信電話株式会社）

(6) これまで得られた成果（特許出願や論文発表等）

		累計（件）	当該年度（件）
特許出願	国内出願	16	2
	外国出願	6	2
外部発表	研究論文	24	6
	その他研究発表	197	39
	プレスリリース・報道	17	0
	展示会	17	4
	標準化提案	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

・課題ウ-1：マルチコア伝送技術の開発

1. マルチコア伝送系設計・評価技術（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

多重数 7~12、伝送容量距離積 数百 Pb/s・km を実現するためのマルチコア伝送系の基本構成を明確化する。また、設計した伝送システムの有用性を検証するために、周回伝送実験等の評価技術を構築する。

【実施内容および最終成果】

マルチコア伝送におけるクロストークマネジメントを提案し、本技術を適用した 1 Pb/s 級大容量伝送の評価系を構築した。また、クロストーク低減による伝送距離長延化に向けて 12 コア二重リング型ファイバと伝搬方向インタリーブの適用を提案し、周回伝送構成による長距離伝送評価系を構築した。さらに、無中継光伝送システムの大容量化に向けて MCF-遠隔励起光増幅技術を提案し、無中継大容量伝送評価系を構築した。

2. マルチコア MIMO 信号処理技術（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

伝送容量距離積 数百 Pb/s・km 級の WDM 信号における 7 以上のコア間のクロストーク除去の実現に向けた MIMO 信号処理技術の検討を行う。

【実施内容および最終成果】

伝搬方向インタリーブ光伝送方式を利用することにより、MIMO 信号処理に必要なコア数を 2 に低減できることを示した。また、2 コアでの周回伝送系によるマルチコア MIMO 原理確認実験を行い、コア間クロストークを MIMO 信号処理により低減できることを確認した。

3. マルチコア光増幅中継技術（国立大学法人島根大学）

【最終目標】

数百 Pb/s・km の超大容量光伝送を達成するために必要なマルチコア光増幅中継技術を確立する。すなわち、課題アのマルチコア光増幅技術で作製したマルチコア光増幅器（MC-EDFA）を用いたマルチコア利得スペクトル等化を含む光増幅中継系構成法と、マルチコア利得一定制御を含む制御・モニタ法に関する設計・評価技術を確立する。

【実施内容および最終成果】

光増幅中継系構成法およびマルチコア利得一定制御を含む制御・モニタ法に関する設計・評価技術の検討を行った。すなわち、マルチコア分布ラマン増幅中継系およびマルチコア遠隔励起光増幅中継系の設計技術、空間多重と波長多重のハイブリッド多重技術および分布ラマン増幅中継系のコア間クロストーク特性、MC-EDFA の全光型自動利得一定制御技術の検討により十分な成果が得られた。

4. マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送技術（国立大学法人大分大学）

【最終目標】

マルチコアの空間並列性の特徴を利用して等価的にファイバ有効断面積を拡大することで非線形光学効果による光パワー制限を緩和できる、マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送の基本技術について研究開発を進め、マルチコア位相同期化ダイバーシティ伝送の実証を目指し、本方式の可能性を明らかにする。

【実施内容および最終成果】

マルチコアファイバにおける通信方式上の潜在的可能性を探るべく、光ダイバーシティ伝送を提案し、実証を進めた。その結果、WDM 信号光とその位相共役光を用いた 2 コアダイバーシティ伝送とその最大比合成による非線形位相回転の相殺が可能となり、4 dB を超える Q 値利得（単一コア伝送比）に関する実証結果が得られた。容量距離積で単一コ

ア2本の伝送性能を上回ることを意味する。原理的に分散値は6 ps/nm/km程度と小さいほど、また中継スパンごとに分散補償するほど高い相殺効果が得られることも明らかにした。

5. マルチコア伝送の実証（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

実証実験を行い、数百 Pb/s・km の超大容量光伝送を達成する技術の見通しを得る。

【実施内容および最終成果】

クロストークマネジメントを適用することにより、単リング型12コアファイバを用いて1 Pb/sを超える総伝送容量を初めて実現した。また、二重リング型12コアファイバと伝搬方向インタリーブを用いた長距離大容量MCF伝送実験により、容量距離積として世界最大の1 Eb/s・kmを実現した。さらに、遠隔励起マルチコアファイバ増幅方式（MCF-ROPA）を用いて無中継伝送としてファイバ1心で最大容量120.7 Tb/s-204 km伝送を実現した。

・課題ウ-2：超多値マルチコア伝送技術の開発（国立大学法人東北大学）

1. 超多値マルチコア送受信技術

【最終目標】

狭線幅コヒーレント光源および高機能電子デバイスを用いて、シンボルレート10 Gsymbol/s、多値度64～512値の偏波多重QAM信号の変復調およびその7コア空間多重を可能にする要素技術を開発する。シンボルレート10 Gsymbol/sで1波長・1コア当たり120～180 Gb/sの信号を10 b/s/Hz以上の周波数利用効率で伝送させるための変復調技術を構築する。伝送中のモード結合も考慮して受信部における伝送歪み補償および復調回路を実現する。

【実施内容および最終成果】

QAM多値度に関しては、伝送歪み補償および偏波分離に用いるデジタル信号処理の高度化により、当初の目標を上回る1024および2048 QAM伝送を実現し、15 b/s/Hzを超える周波数利用効率を単一コアで達成した。シンボルレートの高速化に関しては、高速DACを用いて32 Gsymbol/s、128 QAM信号(448 Gb/s)および20 Gsymbol/s、256 QAM信号(320 Gb/s)を生成し、これらの信号を150 km単一コアで伝送することに成功した。

2. 超多値信号のマルチコア伝送評価および総合実験

【最終目標】

超多値QAM信号のマルチコアファイバ伝送に関して実験・解析による詳細な評価を行い、モード結合、非線形相互作用などによる歪み要因を明確にする。空間多重に伴う超多値信号の歪みを補償可能なMIMO信号処理を設計し、コヒーレントレシーバへ適用する。これらの評価結果をマルチコアファイバの設計へフィードバックし、最適なファイバ構造を見出すとともに、多値度に関しても最適化を図る。最終的に、課題ア・イならびに課題ウ-1の成果を取り入れ、超多重信号の多中継長距離伝送実験を実施する。

【実施内容および最終成果】

課題ウ-2-1で実現した超多値信号の送受信技術を用いて、60 Gb/s 1024 QAM信号をファイバ型ファンイン・ファンアウト素子を介して7コアファイバに入射し、7コアEDFAを介して100 km中継伝送に成功した。周波数領域等化(FDE)および逆伝搬法を導入することによりMCF中の伝送に伴う波形歪みを補償し、ファイバ1本あたり109 b/s/Hzの周波数利用効率を実現した。また100 km程度の伝送においてはMCF中のクロストークが伝送特性に及ぼす影響は十分小さいことを明らかにした。

・課題ウ-3：マルチモード伝送技術の開発

1. マルチモード伝送系設計技術（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

本課題ではモード間結合を抑制した数モードファイバを使用し、光学的モード分離を用いたモード多重伝送に注目して研究開発を行う。この目的に適した数モード光ファイバの検討はほとんど行われていないため、伝送ファイバへの要求条件を明確化すること、および、それを用いた5～8のモード多重伝送系の基本構成を確立することを最終目標とする。

【実施内容および最終成果】

5～8のモード多重伝送系の基本構成を確立することを目的とし、光学的モード分離実証のための伝送系の構築、マルチモード伝送系要求条件明確化を行った。また、新たなMIMO信号処理法的设计・実装を行い、信号処理量を約1/33に大幅に低減できることを示した。

2. マルチモード光増幅中継技術（国立大学法人島根大学）

【最終目標】

数モードファイバを伝搬した光信号を光増幅する数モード光増幅器を用いた光増幅中継技術を確立する。すなわち、数モード光信号に対する利得等化を含む光増幅中継系構成法と、利得一定制御を含む制御・モニタ法に関する設計・評価技術を確立する。

【実施内容および最終成果】

マルチモード光増幅中継システムおよび中継器の基本構成の明確化を行った。数モード伝送ファイバにおける分布ラマン増幅基本特性の実験評価を行った。また、モード間利得偏差低減を可能とする励起方法の提案と光増幅特性の明確化を行った。

3. 単一コア伝送用モード合分波技術（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

単一コアのマルチモードファイバ伝送路において、異なるモードの光信号を合波あるいは分波するモード合分波器の研究を行う。さらに、特性向上を図り、課題ウ-3-6と連携し実際の伝送システムに必要な合分波器を実現する。また、その技術を応用しマルチモード伝送で必要なその他のデバイス（モード制御器、モード等化器等）の実現も目指す。

【実施内容および最終成果】

原理損ゼロである非対称方結構成と光ファイバとの接続損を低く抑えられる石英系PLC回路を用いて、単一コアの高次モード光を高効率に変換・合分波できるモード合分波回路を実現した。さらに、高いモード消光比が得られるダブルゲート構成の合分波器を実現し、3Dアセンブリ技術により高次モードの多重化を実現し、課題ウ-3-6と連携しモード分離実証実験に適用した。また、開発した技術を応用しPLC型MDL等化器、5モード変換・合分波器を検討・試作した。

4. 結合マルチコア伝送用モード合分波技術（国立大学法人横浜国立大学）

【最終目標】

結合型マルチコア光ファイバは各次数の結合モードを個々の伝送チャネルに対応させるため、入出力ポートからの光信号によって1対1対応で各次数の結合モードを選択的に励振するためのモード合分波器が必要になる。これまでの先行研究によって、一括非対称分岐型および逐次非対称テーパ分岐型モード合分波器を考案して、基本的設計を行った。本検討では、これらの蓄積を活用することにより、結合型マルチコア伝送に必須の合分波器の実現を目指す。さらに、結合型マルチコアを非結合で複数配置した断面構造のハイブリッド型マルチコアファイバが将来の超大容量化に必要と考えられており、このハイブリッド型マルチコアファイバに対応した合分波器の開発を最終目標とする。

【実施内容および最終成果】

非対称テーパ結合モード遷移型モード合分波器を設計し、ポリマー導波路を用いて製作して、挿入損失とクロストークを求め、結合型 MCF 用モード合分波器を実証した。したがって、最終目標の前半は達成したが、後半の目標に設定した結合型マルチコアを非結合で複数配置したハイブリッド型マルチコアファイバ用のモード合分波器の実証については、45 度マイクロミラーを用いた複数チャンネルモード合分波器の設計と試作を試みて、45 度マイクロミラーの製作技術を確立したが、実際の光導波路出射端への製作実証には至らなかった。今後は本委託契約終了後も引き続き光導波路出射端への 45 度マイクロミラー装着による光路垂直変換とマルチコアファイバへの結合の実証を目指す。一方、当初の目標にはなかったが研究の進展に伴って波及した研究内容として、数モードファイバからの出射光近視野像を、偏光子を透過させて測定し、縮退した LP11^{even} モードおよび LP11^{odd} モードをも分離して、それらの偏光状態を測定することに初めて成功した。

5. マルチモード光源技術（国立大学法人九州大学）

【最終目標】

デバイスの小型化・集積化を目的とし、特定の高次モードを励振可能な光源技術を実現する。さらに、1つのレーザで任意の高次モードを選択的に発振可能とし、1種類のレーザを、異なるモードが割り当てられた複数の送信器に適用するための技術を確立する。

【実施内容および最終成果】

特定の高次モードを励振する導波路構造として、MMI 導波路を用いた LP11 モード光源用光導波路を実証すると同時に、その設計理論を確立した。さらなるモード次数向上を検討し、縦方向にも多モード干渉を利用した LP21 モード光源用光導波路を実現した。これらにより、光導波路を集積することで複数の特定の LP 高次モードを実現する技術を確立することができた。さらには当初計画には含んでいなかったが、関連技術として、MCF の伝送容量を飛躍的に増大させることのできる a-OAM モードを世界に先駆け提案した。

6. マルチモード伝送の実証（日本電信電話株式会社）

【最終目標】

5 ないし 8 モードを利用したモード多重伝送実証実験を行い、数十 Pb/s・km の超大容量光伝送を達成する技術の見通しを得るとともに、伝送ファイバに要求される特性の明確化を行う。

【実施内容および最終成果】

光学的モード分離、MIMO 信号処理によりそれぞれ LP モード間のモード分離、縮退モード間のモード分離が可能であることを実験的に実証し、6 モード多重信号を用いた光伝送実験に成功した。これらを組み合わせることで 6 モード以上のマルチモード伝送が可能であり、C+L フルバンド WDM を行うことで、数十 Pb/s・km の超大容量光伝送を達成する技術の見通しを得た。

・課題ウ-4：マルチコア・マルチモード伝送技術の開発（日本電信電話株式会社）

1. マルチコア・マルチモード伝送系設計技術

【最終目標】

1 Eb/s・km を実現するためのマルチコア・マルチモード伝送系の基本構成ならびに課題点を明確化する。

【実施内容および最終成果】

マルチコア・マルチモード伝送系の基本構成ならびに課題点を明確化し、課題ウの各技術を集結し、また課題ア・課題イと連携して、当初目標を上回る 1 Eb/s・km が実現できる見通しを示した。

(27-1)

2. マルチコア・マルチモード伝送の実証

【最終目標】

課題ウの各技術を集結し、また課題ア・課題イと連携して、各コアが複数のモードを持つマルチコアファイバによる、マルチコア伝送とモード多重伝送併用伝送の原理確認実験を行う。

【実施内容および最終成果】

課題ウ-1 のマルチコア伝送技術、および課題ウ-3 のマルチモード伝送技術を結集し、さらに課題ア（光増幅器）、課題イ（ファンイン・ファンアウト）、課題 170（光ファイバ）と連携して、12 コア×3 モードの世界初のマルチコア・マルチモード高密度空間多重伝送、およびマルチコア・マルチモード光伝送では世界初の中継光伝送を実現し、527 km の長距離伝送に成功した。