

平成 26 年度 委託研究

課題 175

光周波数・位相制御光中継伝送技術
の研究開発

研究計画書



1. 研究開発課題

「光周波数・位相制御光中継伝送技術の研究開発」

課題 A 高精度光周波数・位相同期制御技術

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

2. 研究開発の目的

通信トラフィック需要の劇的な増加を支えるために、光ファイバ伝送容量に関する研究開発は最近 30 年で 5 桁（年率 1.4–1.5 倍）を超える容量増加を達成した。他の分野の研究開発に比しても驚異的数値であり、一般社会では目立たないが革新性の高い成果と言える。インターネットの社会生活への浸透にしたがい ICT に関わる新しいアプリケーションが創出され、最近ではスマートフォンに見る高性能携帯サービスやビッグデータクラウドサービスが典型例であり、トラフィック需要を一層押し上げている。このようなアプリケーションの進化に伴う継続的トラフィックの伸びを支えていくためには、光ファイバ通信インフラ技術にはこれまで以上に持続的な大容量化・高信頼化・経済化技術の研究開発が欠かせない。

最近 10 年の大容量化を可能にした光ファイバ伝送技術は、高速大規模デジタル信号処理（DSP）技術の貢献によるところが大きく、DSP をコヒーレント検波技術へ適用して位相推定によるデジタルコヒーレント光通信技術として飛躍的に性能を向上させてきた。DSP による効果はそれだけに留まらず、偏波多重や精緻な線形分散補償を可能にしている。そのおかげで最近では 1 波長あたり 100Gbps 容量を長距離伝送可能な偏波多重 QPSK（Quadrature Phase Shift Keying）伝送システムが実用化レベルとなっている。さらに、多値 QAM（Quadrature Amplitude Modulation）符号や送信端デジタル信号処理を用いて、光ネットワーク全体での周波数利用効率の向上も研究が進んでいる。すでにシステム開発の目標は、400Gbps 級の光パス容量を可能とする次世代伝送システムに向けられており、世界中でしのぎを削る研究開発が繰り広げられている。

100Gbps を超えるシステムでは、光パスあたり搬送波（キャリア）を 1 つだけ用いる従来のシングルキャリア方式から、マルチキャリア光通信技術が方式検討されはじめている。キャリア信号帯域を抑えて外乱の影響を小さくしたサブキャリアを複数用いることによって光パス単位での容量拡大を狙う技術である。また、多値変調方式を含めた多様な伝送方式の可能性が拡がり、これまでの ITU-T における 25GHz を最小単位とする固定的光キャリア周波数の配置に対して、その柔軟性を高めるために 6.25GHz を単位とするフレキシブルグリッドなる周波数配置の概念が国際標準として承認された。従来の固定周波数間隔の光ネットワークから、信号帯域や到達距離に応じて柔軟に光周波数間隔を設定可能なマルチキャリア光パスネットワークの研究開発が精力的に進められている。

マルチキャリア光パスネットワークには、今後はパス容量をテラビット級まで拡大させる一方で、上述のように GHz 単位での光周波数の精緻かつ稠密な配置制御が求めら

れることになる。パス容量のテラビット級への拡大には、非線形シャノン限界を克服することが要請される技術レベルに達している。このようなネットワーク機能性を高めつつスケラビリティ（パス容量、伝達距離）を向上させていくためには、電気的な DSP 技術だけで解決できるものではなく、光学的分野での技術革新を急ぐ必要がある。光キャリア周波数・位相の光学特性に関して量子エレクトロニクスの物理に基づいて飛躍的な高性能化・高機能化をもたらすコヒーレント光イノベーションがそれに値する。

本研究開発では、デジタルコヒーレント技術のもつ潜在能力をさらに引き出し、様々なサービスが求める帯域要求にフレキシブルに適応可能とする、1) 広帯域波長可変性を備えた高コヒーレンシ光源技術、ならびに2) 当該高コヒーレンシ光源を用いた光パラメトリック過程に基づく光増幅中継技術の確立を目的としている。

広帯域波長可変高コヒーレンシ光源技術では、マルチキャリア光信号スペクトルにおける矩形型 Nyquist Filtering による光パス・サブキャリア信号の稠密な周波数多重分離に整合する高精度な光周波数・位相同期制御技術の確立を目指す(*)。さらにパラメトリック過程に基づく光増幅中継技術では、標準量子限界以下となる低雑音増幅を目指している。その結果として、伝達スケールの飛躍的拡大を可能とする基盤技術の確立を目標とする。デジタルコヒーレント技術の進歩と歩調を合わせたこのようなコヒーレント光イノベーションにより、周波数軸ならびに再生中継距離に対してスケラブルな将来の大容量マルチキャリア光パスネットワークの実現へ大きく貢献することが期待できる。

*現状では、信号光キャリア周波数は規定(OIF-TLMSA-01.0 - Multi-Source Agreement for CW Tunable Lasers (May 2003))により $\pm 2.5\text{GHz}$ の範囲でドリフトや揺らぎが許容されている。この変動範囲5GHzは信号変調帯域に加算されて信号チャンネル占有帯域を構成する。したがって、信号変調帯域<信号チャンネル占有帯域、が現状である。光キャリア周波数安定性を向上させて矩形型 Nyquist Filtering によって合分波できると、上記揺らぎ範囲を除くことができ、信号変調帯域=信号チャンネル占有帯域、として光周波数配置管理が可能となる。このように精密に光周波数を制御し矩形型 Nyquist Filtering による隙間のない合分波を可能とする光周波数管理のあり方を、稠密光周波数管理、とここでは呼んでいる。

3. 採択件数、研究開発期間及び予算

研究開発期間：契約締結日から平成 29 年度までの4年間

予算：平成 26 年度は総額 125 百万円を上限とする。(提案の予算額の調整を行った上で採択する提案を決定する場合がある。)

本委託研究は、次の個別研究開発課題毎に公募する。

課題 A 高精度光周波数・位相同期制御技術

予算：平成 26 年度は、総額 50 百万円を上限とする。なお、平成 27 年度以降は対前年度比で 6%削減した金額を上限として提案を行うこと。

採択件数： 1 件

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

予算：平成 26 年度は、総額 75 百万円を上限とする。なお、平成 27 年度以降は対前年度比で 6%削減した金額を上限として提案を行うこと。

採択件数： 1 件

4. 研究開発の到達目標

課題Aならび課題Bの要素技術を確認し、それぞれの要素技術を連携させてパス容量毎秒1テラビット以上においてトランスペアレントなネットワーク領域が、周波数利用効率[bps/Hz]と伝送距離[km]との積SDP (SE- Distance Product)なる評価指標において、既存のEDFAによる中継増幅器(NF;5.5dB程度)による中継伝送系に比して、2倍以上となる伝送能力を実証することを目標に掲げる。

課題 A 高精度光周波数・位相同期制御技術

本課題では、矩形型 Nyquist フィルタによる合分波技術の時代にふさわしい高精度光周波数・位相制御技術の研究開発によって、変調多値度、周波数利用効率の向上、高速リストレーションを揃って可能とする光源技術の研究開発を実施する。

具体的な到達目標については、下記基準を参考に、提案の際に定量的に記載すること。項目(2)、(3)に関しては、上記3つの機能を達成するために必要となる3つの光源性能、①光周波数安定度、②スペクトル線幅、③光周波数スイッチングに要する時間、に関して同時に実現できる目標値を記載することとする。

(1) 矩形型 Nyquist フィルタによる合分波技術を可能とする稠密光周波数管理、高速光周波数スイッチングを実現する高コヒーレンシ光源モジュールを試作し、性能を検証すること。

(2) 試作する光源モジュールは、フリーランニング状態にて短期的に

- ・周波数安定性 : $\pm 100\text{MHz}$ 以下
- ・スペクトル線幅 : 100kHz 以下

を同時に満たすとともに、 $1.25\text{THz}(10\text{nm})$ の範囲にある任意のグリッドに 100msec 以内で定常状態となる周波数スイッチングが可能であること。ここで、光周波数グリッドは ITU-T G.694.1 “Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid”に記載されている Flex DWDM grid definition に従うものとする。

(3) 当該光源モジュールに外部基準光または外部観測手段との連係動作を行わせることにより

- ・周波数安定性 (短期) : $\pm 1\text{MHz}$ 以下

なる光周波数高安定化を実現すること。上記周波数スイッチング機能は損なわれてはならない。

(4) 試作する光源モジュールは、19 インチラックによる標準的通信システム用ボードへ実装可能な実用性の高い寸法であること。

なお、長距離通信用光源に対して OIF 規格(ITLA-MSA-01.2)にて規定されている

RIN -135dB/Hz 以下、SMSR 43dB 以下も研究期間内に達成できることが望ましい。

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

本課題では、大容量化広帯域マルチキャリア信号の一括中継増幅による信号対雑音比 (SNR) の劣化を最小化できる光パラメトリック過程に基づく増幅技術の実用性向上に関する研究開発を実施する。

コヒーレント光通信技術におけるパス容量増大方式では、マルチキャリア化技術の進展が著しく、マルチキャリア伝送に対応できる光増幅中継技術である必要性が高まっている。広帯域マルチキャリア信号に対して低雑音増幅特性による中継増幅技術の確立を目指す。具体的到達目標については、下記基準を参考に、提案の際に定量的に記載すること。

- (1) コヒーレントマルチキャリア信号など波長多重化(WDM)伝送技術へのパラメトリック光増幅過程に基づく中継増幅動作を実証すること。
- (2) 多値符号化された光信号の中継増幅動作実証が可能であること。
- (3) 15dB 以上の正味利得 (Net Gain) をマルチキャリア信号に対して波長帯域 10nm 以上において実証できること。
- (4) 雑音指数の評価では、評価方法を提案し、2dB 未満を実証できること。
- (5) 光パス容量毎秒 1 テラビット以上において課題 A と連携し、総合的伝送能力評価実験を実施すること。

伝送能力評価実験では、目標を再掲すると、トランスペアレントなネットワーク領域が、既存 EDFA(NF;5.5dB 程度)による中継伝送系に比して、SDP が2倍以上となること。

課題 A、課題 B 共通

<研究開発成果の評価実証>

- (1) 課題 A と B の受託者は相互に連携・協力して実験により実証すること。
- (2) 本委託課題 A と B により、400Gb/s 級以上のマルチキャリア光伝送用デジタル信号処理 (DSP) との整合性および DSP の処理負荷がどの程度軽減されるかを理論あるいは実験で実証すること。
- (3) 効果的な課題の実証のため先行する委託課題との連携及び JGN-X テストベッドの積極的な利用を提案すること。また NICT が平成 24 年度施設整備補正で整備する設備などの利用も検討すること。

5. 研究開発の運営管理及び評価について

研究開発に当たっては、機構の自主研究との連携を図ること。また複数の機関が共同で受託する場合には、代表提案者が受託者間の連携等の管理運営を行うこと。

機構は研究開発の進捗状況等を把握するためにヒアリングを実施することがある。

平成 27 年度に中間評価、平成 29 年度に終了評価を行う。また研究開発終了後に、成果の展開等状況調査、追跡評価を行う場合がある。

6. 参考

- (1) 平成 23 年度公募 NICT 委託研究「光トランスペアレント伝送技術 (λ リーチ)」(H23-H27) では、アクセス～メトロコア網において、全光トランスペアレント領域 (帯域×伝送エリア) を 10~100 倍へ拡大し、ユーザが 100Gbps を超える光トランスペアレント伝送を可能とする技術、および光網においてトラフィックを動的に適応できるネットワーク再構成可能なスケラブルフォトニックノード構成技術を確立することを狙いとしている。
- (2) 平成 24 年度公募 NICT 委託研究「エラスティック光アグリゲーションネットワークの研究開発」(H24-H28) では、サービス毎に性質の異なるトラフィックを最も効率良く集約 (アグリゲーション) でき、容量伸縮自在 (エラスティック) なメトロ・アクセス系を統合したフォトニックネットワークを実現するための、光リンク技術、プログラマブル光加入者線終端装置/光加入者線ネットワーク装置技術を確立することを狙いとしている。
- (3) 平成 25 年度公募 NICT 委託研究「エラスティック光通信ネットワーク構成技術の研究開発」(H25-H28) では伸縮自在なグリッドを用いたエラスティック光アグリゲーションネットワークをコア系にまで拡張し、トータルにエラスティックな光ネットワークを構成する技術を開発する。効果的な設計手法を実装した設計ツール及び光レベルでの編集を可能にするノード構成技術を開発することを狙いとしている。
- (4) 欧州プロジェクト；
- (4-1) 「PHASORS : Phase sensitive amplifier systems and optical regenerators and their applications」
(University of Southampton, UK を中心とするプロジェクト)
目的：大容量高密度コアネットワーク実現の破壊的技術 (the potential to be a disruptive technology) と位置づけで、低雑音増幅および超高速光信号処理の能力をもつファイバ型の位相感応増幅技術を開発する。
期間：2008/7-2011/6
予算：3 年間 5 億円
プロジェクトにおける主要成果：
雑音指数 1dB 以下を目標に掲げ、その達成や、BPSK 信号の再生実験等が行われた。
- (4-2) 「PSOPA : Phase-sensitive optical parametric amplifiers」
(Chalmers University of Technology, Sweden を中心)

目的：通信・非通信応用を念頭に、科学的・光学的両面から位相感応増幅器の持つポテンシャルを最大限引き出す。

期間：2011-2016

予算：5年間で約3.3億円(2.5 million Euros)

プロジェクトにおける主要成果：

新規非線形材料による位相感応増幅器のコンパクト化、利得の広帯域化、低雑音化、超高速光信号処理や量子光学応用への適用。EDFAリンクに比べて位相感応増幅器で構成されたリンクでは6dBのNF改善効果が得られることを証明、またQPSK信号の増幅実証。

以上2つの欧州プロジェクトは、いずれも高非線形ファイバを非線形媒質として用いているため、本質的に線形に増幅出来るダイナミックレンジが狭く、高次のQAM信号の増幅に問題を残している。