

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：16201

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630163

研究課題名(和文) 光再生中継器仮想化によるエラスティック光ネットワークの超広域化の研究

研究課題名(英文) Geographic scaling of elastic optical network by introducing virtualized elastic regenerators

研究代表者

神野 正彦 (Jinno, Masahiko)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：10503550

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)： トランスルーセント・エラスティック光ネットワークを実現するために必要なプログラマブル・マルチキャリア発生器(PMG)と仮想化光再生中継器配置(VER)アルゴリズムの開拓に取り組み、以下の成果を得た。(1) 共通光周波数基準器を用いて、高精度なサブキャリア間隔と柔軟なサブキャリア周波数配置を両立する方式を考案し、波長可変レーザダイオードと集積化Mach-Zehnder干渉計を用いて原理動作を確認した。(2) VER配置と経路計算スペクトル割り当てアルゴリズムの考案を考案し、予備経路を含めたネットワーク収容計算において、有効性を検証した。

研究成果の概要(英文)： In future translucent elastic optical networks, a programmable multi-carrier generator (PMG) and virtualized elastic regenerator (VER) replacement algorithm will be key technologies. We proposed PMG based on common optical frequency references that achieve both the precise sub-carrier spacing and the flexible center frequency assignment, and demonstrate a proof of concept experiment. In addition, we proposed VER-placement and routing and spectrum assignment algorithms, and numerically evaluated the effectiveness of the algorithms by applying them to protected and un-protected networks.

研究分野：光通信ネットワーク

キーワード：エラスティック光ネットワーク リジェネレータ

1. 研究開始当初の背景

報告者が 2008 年に世界に先駆けて提唱したエラスティック光ネットワークは、トラフィック需要に応じたスペクトル帯域・変調フォーマットの光信号を発生させ、これを光信号のままトランスペアレント（透明）にルーティングするため、光スペクトルとエネルギー利用効率に優れるという特長を有し、世界中で精力的な研究開発が展開されている。次のステップとして報告者は、エラスティック光ネットワーク技術を世界規模の超広域ネットワークに適用するための検討に着手し、仮想化光再生中継器（VER: Virtualized Elastic Regenerator）とそれに基づくトランスルーセント（半透明）エラスティック光ネットワークの新概念を提案している（M. Jinno et al, OFC/NFOEC 2012, PDP5B.6）。

仮想化光再生中継器とトランスルーセント・エラスティック光ネットワークの新概念は、光ネットワーク資源の柔軟で経済的な利用を可能にする一方で、ハードウェア制御とネットワーク設計の複雑化を伴うことから、実用に供するためには、ハードウェアとネットワーク設計の両面におけるブレークスルー技術の開拓が必須であるとの考えから、本研究を提案し、2013 年度から 2 年間の計画でこれを実施した。

2. 研究の目的

計画では、トランスルーセント・エラスティック光ネットワークを実現するために取り組むべき課題として、以下の 2 点を掲げた。

- (1) 仮想化光再生中継器では多様なレートの複数のスーパーチャネルを同時再生中継する必要があり、多数のサブキャリアを柔軟かつ高精度な光周波数で発生することが必須である。
- (2) ネットワーク設計においては、多様な光パス間で共有する仮想化光再生中継器をどこに配置すればよいかという問題と、光パスの経路と光スペクトル割り当ての問題を同時に計算しなければならず、これらの問題を実用上許容される時間内に計算可能な設計アルゴリズムのブレークスルーが必要不可欠である。

本研究の目的は、上記 2 点の課題を解決するための要素技術を開拓することである。

3. 研究の方法

本研究では光再生中継器仮想化実現のための第一歩として、プログラマブル・マルチキャリア発生（PMG: Programmable Multi-carrier Generator）という新たな技術を開拓する。従来の光周波数制御は、単一の半導体レーザの発振周波数を周波数グリッドにロックするという単純な仕組みである。仮想化光再生中継器においては、複数のサブチャネル光再生中継器の発振周波数を、入力する複数のスーパーチャネルのサブキャリア間

隔と中心周波数に応じて精度良く制御する必要がある。プログラマブル・マルチキャリア発生は、共通の周期的光共振器を周波数基準として用いることで、高精度なサブキャリア間隔制御と柔軟なサブキャリア周波数配置を両立するという新しいアイデアに基づく。

また、仮想化光再生中継器に基づくトランスルーセント・エラスティック光 NW の高効率設計法として、共有する仮想化光再生中継器の利用率を上げるための最適配置アルゴリズムと経路・スペクトル割り当てアルゴリズムを組み合わせるなどの新しい高効率ヒューリスティック設計アルゴリズムを開拓する。

4. 研究成果

(1) プログラマブル・マルチキャリア発生器 (PMG)

PMG の 2 キャリア周波数制御の実験構成を図 1 に示す。実験系は 2 台の波長可変 DFB レーザアレイ（TLA: Tunable DFB Laser Array）と、それぞれの光出力を計測系と制御系へ導く光カップラ、光信号を選択する光スイッチ、光周波数間隔基準として用いる導波路型マハチェンダ干渉計（MZI: Mach-Zehnder Interferometer）、MZI の 2 つの出力ポートの出力パワーの差に比例した電気信号を出力するバランスドフォトダイオード（BPD: Balanced Photo Diode）、TLA の発振光周波数を計測する光波長計、2 台の TLA の発振光周波数差を測定する超高速 PD と電気スペクトラムアナライザ、からなる。MZI の温度はペルチェ素子を用いて一定温度に制御した。

PMG を構成する主要要素である MZI と TLA の基本特性について説明する。まず、サブキャリア間隔基準として用いる導波路型 MZI に対して、入力光周波数を変化させて 2 つの出力光ポートの差動出力パワーを測定した。測定には、光波長計（相対光周波数精度 ± 40 MHz）と光パワーメータを用いた。差動出力パワーは入力光周波数に対して、正弦波状に変化し、その周期（FSR: Free Spectral Range）は 21.65 GHz であった。MZI は、石英導波路上の薄膜抵抗に電圧を印加することで、熱光学効果により屈折率を微小変化させ、周期的

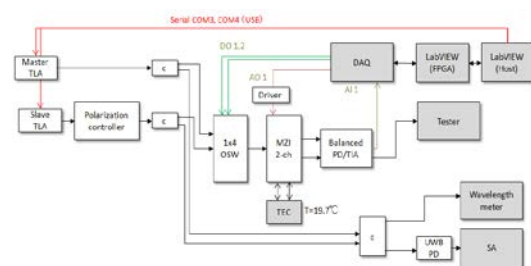


図 1. PMG 実験構成

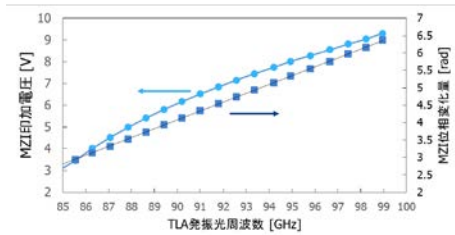


図 2. MZI の入力光周波数追従特性

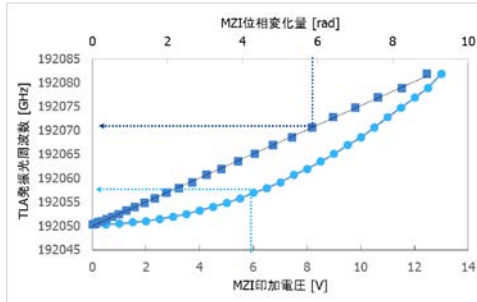


図 3. スレーブ TLA 発振周波数の MZI 追従特性

フィルタ特性を周波数軸上でシフトさせることが可能である。PMG では、この特性を利用して、マスタ TLA の発振光周波数に対して、差動出力がゼロとなるように MZI のフィルタ特性をシフトさせ、フィードバック制御により、このポイントにロックする。次に、TLA の注入電流に対する発振光周波数と出力パワーの関係を測定した。注入電流に対して発振周波数と出力パワーは線形に変化し、PMG では、この特性を利用して、マスタ TLA の発振光周波数に対してロックした MZI の差動出力ゼロクロス点 (FSR 間隔で周期的に存在) に、スレーブ TLA の発振周波数をロックする。

図 2 は、マスタ TLA の発振光周波数変化に対して、MZI の差動出力がゼロになるように MZI の印加電圧をフィードバック制御した場合について、マスタ TLA 発振周波数を横軸にとり、MZI の印加電圧 (左縦軸) と近似式で換算した位相シフト量 (右縦軸) をプロットした図である。マスタ TLA の発振光周波数変化に対して、MZI の位相が線形に変化していることから、マスタ TLA の発振光周波数に対して MZI のゼロクロス点がロックされていることが分かる。

図 3 は MZI 印加電圧変化に対して、MZI の差動出力がゼロになるように、スレーブ TLA の発振周波数をフィードバック制御した場合について、MZI の印加電圧 (下横軸) と換算した位相シフト量 (上横軸) を横軸にとり、スレーブ TLA の発振周波数をプロットした図である。MZI の位相変化に対してスレーブ TLA の発振光周波数が線形に変化していることから、MZI のゼロクロス点にスレーブ TLA の発振光周波数がロックされていることが分

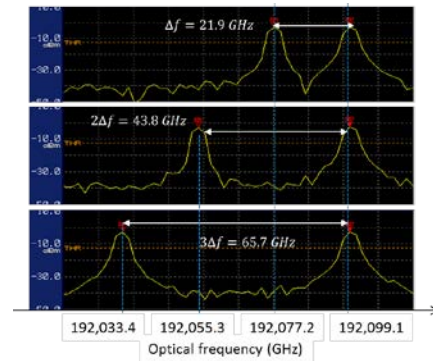


図 4. サブキャリア光周波数間隔制御時の光スペクトル

かる。

以上説明した 2 段階の周波数制御を用いることで、マスタ TLA の発振周波数に対して、一定間隔シフトした光周波数に、スレーブ TLA の発振周波数をロックすることが可能になる。図 4 は、マスタ TLA の発振周波数 192.1 THz に対して MZI のゼロクロス点の一つをロックし、それより、FSR、 $2 \times \text{FSR}$ 、 $3 \times \text{FSR}$ だけ低いゼロクロス周波数にスレーブ TLA をロックさせたときの、光波長計で観測した光スペクトルである。21.9 GHz の整数倍だけ低い周波数にスレーブ TLA の発振スペクトルが観測され、2 段階周波数制御が期待通りに行われていることを確認した。

(2) トランスルーセント・エラスティック光ネットワーク高効率設計法

本研究で取り組む設計法の問題は、VER の数を最小限にしつつ、すべてのパス需要 (Demand matrix) を収容する VER 配置 (Regenerator placement) と経路 (Routing)、スペクトル割り当て (Spectrum Assignment)、VER 帯域割り当て (Sub-regenerator Assignment)、を求めること、と定義される。

エラスティック光ネットワークにおいては利用可能スペクトルを FSU (Frequency Slot Unit) と呼ばれる最小スペクトル単位に分割し、トラフィックデマンドに応じて必要な数の FSU を割り当てる。この際、トランスペアレントセグメントにおけるスペクトル連続性制約と、周波数軸上のスペクトル隣接性制約が課せられる。また、送信元ノードあるいは宛先ノードとリジェネレータ設置ノード、ならびに再生中継ノード間の距離は、光信号のままでは伝送可能な距離 (OR: Optical Reach) を超えてはならない。

次に考案したヒューリスティックアルゴリズム SP-FN (Shortest Path-Farthest Node) を説明する。まず、全てのノードペア間の最短経路を求める。最短経路上で、OR を越えない最遠ノードで再生中継し、そこで VER を共有で

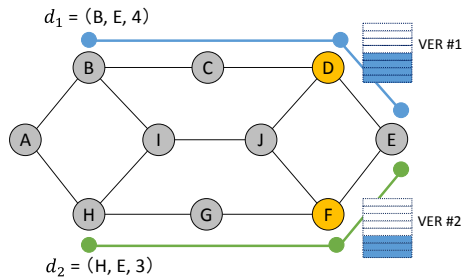


図 5. SP-FN アルゴリズム (予備系なし)

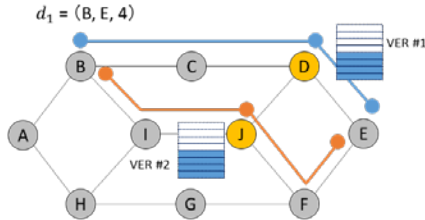


図 6. SP-FN アルゴリズム (予備系あり)

きれば共有するという方式。この際の宛先ノードから再生中継ノード、再生中継ノード同士を繋ぐ経路、再生中継ノードから宛先ノードの経路をそれぞれトランスペアレントセグメントパスと呼ぶ。スペクトル割り当ては、VERに波長変換機能が備わっていることから、トランスペアレントセグメントパス毎に FF (First-Fit) で割り当てる。SP-FN の VER 設置方法を図 1 に示す。図 5 はノードが 10 個、リンクが 13 個のネットワークである。OR = 2 hops、ノード間の距離は全て 1 hop、VER のサブリジェネレータは 8 とする。 $d_1 = (B, E, 4)$ と $d_2 = (H, E, 3)$ それぞれ必要なサブリジェネレータ数は 4 と 3 となるデマンドが発生したとき、伝送可能な最遠ノードで再生中継することから、ノード D と E の 2 つに VER を配置する。

実際のネットワークでは通常時に通信を行う現用経路 (PP: Primary Path) に障害が発生したときのために、予備経路 (BP: Backup Path) を確保することが多い。上記のアルゴリズムについて予備経路を含めた経路計算と VER 割り当てが可能なように拡張したアルゴリズムを次に説明する。まず、オリジナルグラフで最短経路となる PP を設定する。その後、オリジナルグラフから PP で使用されたリンク、中間ノード、中間ノードに接続されているリンクを削除した修正ネットワークで最短経路を探索することで BP を設定する。全ての SD ペアの PP と BP を求め、それぞれのパスについて VER 配置とスペクトル割り当てを行う。VER 配置方法とスペクトル割り当て方法は予備経路なしの SP-FN (UnProtected) と同様に行う。SP-FN (Protected) の BP の設定例を図 6 に示す。 $d_1 = (B, E, 4)$ に対して設定する PP を青色のパスとすると、BP は PP

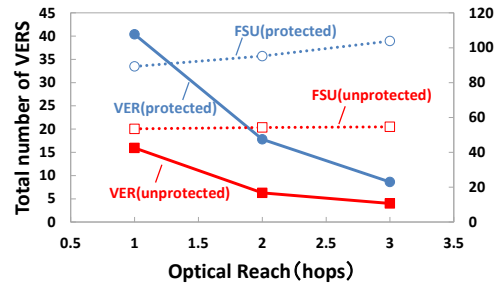


図 7. SP-FN(UP)と SP-FN(P)比較(2×5Ladder NW)

のリンクとノードを避けるため、橙色のパスを設定する。BP の VER 配置は PP と同様に行うため、ノード J に VER 配置を行う。

アルゴリズムの性能評価のため、2×5 Ladder ならびに 3×5 Mesh のレギュラー構造のネットワークと、日本ならびにドイツのネットワークモデル JP13、DE14 の 4 つについて、トラフィックデマンドの収容計算を実行した。レギュラーネットワークにおいては OR を 1, 2, 3 hops、日独のネットワークについては OR を、600, 700, 800, 900 km とした。また、サブリジェネレータのユニット数は 12 とした。以上の条件で、OR をパラメータとして、ランダムに生成されたデマンドに対して 100 回の試行を行い、VER 設置数と最大使用 FSU 数の平均値を求めた。

図 7 に、計算結果の例を示す (2×5 Ladder ネットワーク)。予備経路なし (UP) と予備経路あり (P) のいずれについても、OR が長くなるにつれて、必要な VER の数は減少している。これは、OR が長くなるほど再生中継なしで、あるいはより少ない回数の再生中継で伝送可能となるノードペアの数が増加するためである。一方、必要なスペクトルの量は、OR が長くなるほどわずかに増加する傾向があることが観測される。この理由は、トランスペアレントセグメントにおけるスペクトル連続性制約のため、OR が長くなるほど、同一のスペクトルを占有する区間が長くなり、未使用の FSU を発見できる可能性が低くなるためと考えることができる。また、図 7 から、予備経路あり (P) の場合に必要な VER と FSU の数は、予備経路なし (UP) の場合のその 2 倍以上が必要であることが分かる。この理由は、予備経路は、必ずしも現用経路 (最短経路) と同じ距離の経路を設定できるとは限らず、より長い経路が設定される場合があり、これが必要な VER と FSU の増加を招いていると考えられる。

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

①神野正彦、エラスティック光ネットワーク

におけるネットワーク高信頼化技術、日本信頼性学会誌「信頼性」、査読有、36巻、2014、427-432

〔学会発表〕(計 4件)

- ① 神野正彦、高木智彦、京河巨亮、Minimal Virtualized-Elastic-Regenerator Placement and Least Congestion Resources Assignment for Translucent Elastic Optical Networks、Optical Fiber Communications Conference 2015、2015.3.22、Los Angeles (USA)
- ② 神野正彦、エラスティック光ネットワーク、そしてその先に向けて、IEEE Photonics Society Japan Chapter 講演会、2014.12.11、東レ研修センタ(静岡県三島市)、招待講演
- ③ 神野正彦、光ネットワークの将来展望—コヒーレント技術と SDM 技術の視点から—、第 22 回シリコンフォトニクス研究会、2015.1.22、湯坂温泉ホテル賀茂川荘(広島県広島市)、招待講演
- ④ 神野正彦、光ネットワークにおける仮想化、電子情報通信学会 2015 年総合大会、2015.3.10、立命館大学(滋賀県草津市)、招待講演

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神野 正彦 (Jinno, Masahio)
香川大学・工学部・教授
研究者番号：10503550

(3) 連携研究者

丸 浩一 (Maru, Koich)
香川大学・工学部・准教授
研究者番号：00530164