

令和元年6月24日現在

機関番号：82636

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2018

課題番号：16K12420

研究課題名（和文）重畳符号化伝送による全光ネットワークの高効率化に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Highly-Efficient All-optical Networks Using Superposition Coding based Transmission

研究代表者

廣田 悠介（Hirota, Yusuke）

国立研究開発法人情報通信研究機構・ネットワークシステム研究所ネットワーク基盤研究室・主任研究員

研究者番号：20533136

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：5Gや超臨場感映像配信などのためには、基幹系の超大容量化が必要不可欠である。本研究では、無線通信分野で研究開発が進められている信号の重畳符号化に注目し、全光ネットワークへの適用による高効率化の可能性について検討を進めた。重畳符号化光パス伝送のネットワークレベルでの特性を明らかにするとともに、高効率な光パス重畳化アルゴリズムを確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、高度無線通信技術である重畳符号化を全光ネットワークに応用展開するものであり、従来のポイントツーポイントでの通信に対して、複数のノード間の通信を同一の光パスで伝送することにより光ネットワークの周波数利用効率向上を目指したものである。本研究によって重畳符号化の可能性が明らかになったことから、今後、実デバイスを用いた伝送実験による特性評価や、より高度なリソース割当アルゴリズムの開発への契機となる意義を本研究結果は有している。

研究成果の概要（英文）：For future network services such as 5G and ultra-high resolution video streaming, it is necessary to improve network capacity in backbone networks. In this research, we study superposition coding technique, which is developed in wireless communication field, in optical fiber networks. Our purpose in this research is to clear whether the superposition coding technique is useful or not for optical fiber networks from network perspective and propose a novel superposition coding based resource assignment algorithm.

研究分野：光ネットワーク

キーワード：光ネットワーク エラスティック光ネットワーク 全光パス 重畳符号化 周波数資源割当 プロテクション

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

光通信ネットワーク分野では、直交周波数分割多重技術や多値変調技術など、無線通信技術として数多く研究・開発が行われてきた様々な技術が光ネットワークへも導入されてきている。これは、光デバイス技術と電子処理技術の発展により、193THz などの光通信の周波数帯域でも実現可能になってきたことによる。これまでの歴史を鑑みると、現在無線通信ネットワーク分野で研究開発が行われている技術は、将来的に光通信ネットワークにも応用されると予想される。中でも、重畳符号化(Superposition Coding)は、複数の端末に同時に異なる情報を伝送することが可能な技術であり、周波数利用効率の向上が期待できるため、無線通信では重畳符号化を用いた通信プロトコルなどの研究が進められている [参考文献 1]。一方で、光通信における重畳符号化はこれまでほとんど研究がなされておらず、2014年に[参考文献 2]において重畳符号化信号の光ファイバを用いた伝送実験が報告された程度である。光ネットワークの伝送容量拡大は今後も必要とされる中、単一光ファイバで伝送可能な容量には限度がある。そのため、ポイントツーポイントでの伝送容量拡大とともに、複数ノード間の通信というネットワークの観点からの周波数利用効率の向上が求められている。

### 2. 研究の目的

5G や超臨場感映像配信などのためには、基幹系の超大容量化が必要不可欠である。光デバイス技術の発展により、直交周波数分割多重技術や多値変調技術などのこれまで無線通信分野で用いられてきた技術が光ネットワークにも応用利用され、光通信ネットワークの通信容量拡大に役立っている。本研究では、無線通信分野で研究開発が進められている信号の重畳符号化に注目し、全光ネットワークへの適用による高効率化の可能性を探索する。重畳符号化光パス伝送のネットワークレベルでの特性を明らかにするとともに、高効率な光パス重畳化アルゴリズムの確立が本研究の主な目的である。また、伝送容量が大きくなるとともに、障害が発生した際の影響も大きくなる。そのため、効率的な耐障害性能向上のための重畳光パスを用いた光パスプロテクション手法の研究も実施する。

### 3. 研究の方法

本研究が対象とするエラスティック光ネットワークでは、任意の送受信端末間に異なる周波数帯域幅の光パスを設定し、安定した大容量通信を実現する。従来の波長分割多重型ネットワークでは、十分に大きな帯域を波長として各光パスに割り当てていたが、エラスティック光ネットワークでは、周波数帯域幅を必要な分だけ各光パスに割り当てる。そのため、種々の変調方式が適用された結果様々な周波数帯域幅が割り当てられた光パスがネットワーク内に混在することとなる。そのため、各光パス設定要求に対して、経路・変調方式・周波数帯域の割り当てはネットワークの観点から非常に重要かつ困難な問題となる。

本研究では、まずは、無線通信ネットワーク関係での重畳符号化の最新研究動向調査と、全光ネットワークに適用する上での理論面の検討を行う。並行して、性能評価用シミュレータを作成し、(1)小規模な直線型・リング型トポロジを用いた動作確認、(2)研究代表者らが提案している日本のトポロジでの有効性の確認、(3)経路選択を最短路固定にして性能評価、(4)他の経路選択方式も含めたリソース割り当てアルゴリズムの設計を順に実施する。これらの性能評価を通して、エラスティック光ネットワークに重畳符号化通信を適用することによる光パス棄却率などの性能向上度合を明らかにする。比較的シンプルなアルゴリズムでの評価をまず行うが、トラヒック収容効率 10%以上性能向上が得られない場合には、経路選択との組み合わせにより性能向上を目指す。また、耐障害性能向上の観点から、プロテクション光パス設定アルゴリズムの確立を行う。具体的には、障害発生時にビットレートを落として迂回路を利用するエラスティック光ネットワークのプロテクションを参考に、障害発生時に利用する 1+1 プロテクションの予備経路を重畳符号化光パスとして設定することを考える。このとき、どのような迂回路設定を行うか、また、どのように周波数資源を割り当てるかは工夫する必要がある。そのため、効率的にプロテクションを行えるような資源割当アルゴリズムの確立を行う。

### 4. 研究成果

本研究では、まずは同一送信ノードから送信される2つの異なる受信ノードに対して光パスの重畳化を行う周波数資源割当アルゴリズムを提案するとともに、光パスの重畳化を行った場合の周波数資源節約効果を、ネットワークの観点から評価した。

図1に、本研究で取り組んだ光パスの重畳化の概要図を示す。中継ノードでは、周波数多重された信号をスプリッタによりブロードキャストし、波長選択スイッチを用いて必要な周波数帯域を選択する。重畳符号化された信号に対する2つの宛先ノードのうち、伝送距離が短いノード (Dst. 1) では、スプリッタを用

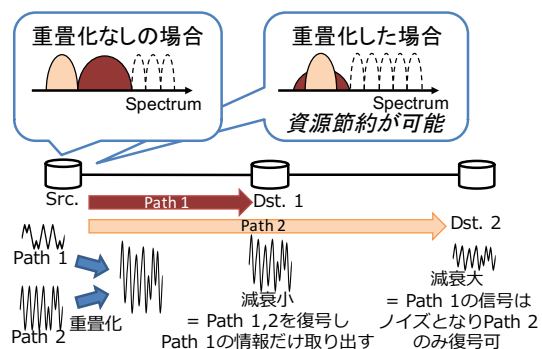


図1: 光パス重畳符号化の概要図

図1に、本研究で取り組んだ光パスの重畳化の概要図を示す。中継ノードでは、周波数多重された信号をスプリッタによりブロードキャストし、波長選択スイッチを用いて必要な周波数帯域を選択する。重畳符号化された信号に対する2つの宛先ノードのうち、伝送距離が短いノード (Dst. 1) では、スプリッタを用

いてブロードキャストされたデータを自身宛として復調部に送る(dropする)とともに、もう一つの宛先へも同時に転送する。伝送距離が長い宛先ノード(Dst.2)では、自身宛のデータとして復調部に送る。遠方ノード(Dst.2)では、近隣ノード(Dst.1)宛のコネクションの信号は減衰しているためノイズとして扱われる。一方の近隣ノード(Dst.1)では、遠方ノード(Dst.1)宛のコネクションの信号を取り出し、入力信号から近隣ノード(Dst.1)宛のコネクションの信号を取り除くことで、自身宛の信号を復調する。光パスの重畳化は、単一送信ノードから伝送距離の異なる複数のノードに別々の情報を同一周波数帯域を用いて同じ空間上で伝送するものであり、単一ファイバリンクでの伝送容量向上技術、あるいは、同じ情報を別々の任意の端末に同時伝送する光マルチキャスト技術とは本質的に異なる。

重畳符号化によって、伝送距離の短いコネクションを、伝送距離の長いコネクションに収容することが可能となる。このとき、重畳符号化を行うためには、(1)送信ノードが共通しており、(2)片方のコネクションの伝送経路がもう一つの伝送経路に完全に含まれる、の2点を満たす必要がある。伝送距離の短いコネクションを割り当てる際には、伝送距離の長いコネクションに重畳できるかを確認し、重畳可能である場合には、できる限り重畳していくのが良いと考えられる。一方で、そもそもエラスティック光ネットワークでは、伝送する経路と周波数スロットを割り当てる際に、周波数軸上の速速性制約と、伝送経路上の連続性制約という2種類の周波数連続性制約を満たす必要がある。

そこで、本研究では、以下の手順に従って、静的な要求トラヒックリストから、各コネクションに対して経路・変調方式・周波数スロットをそれぞれ割り当てて光パスを設定する。この際、割り当てを行う光パスの順序によって、重畳可能な光パスの候補が変わることとなる。光パス重畳処理を行うフローチャートを図2に示す。上記提案方式の手順では、長距離光パスに対して重畳可能な範囲でなるべく伝送距離の差が小さい光パスを重畳することとしている。そのため、(1)の選択規律として、伝送距離の長い光パスから降順に選択する。

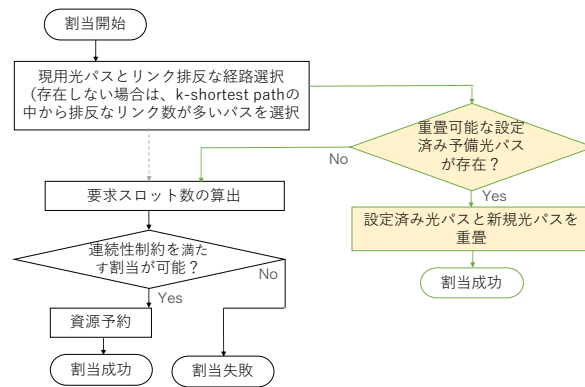


図2: 光パス重畳処理のフローチャート

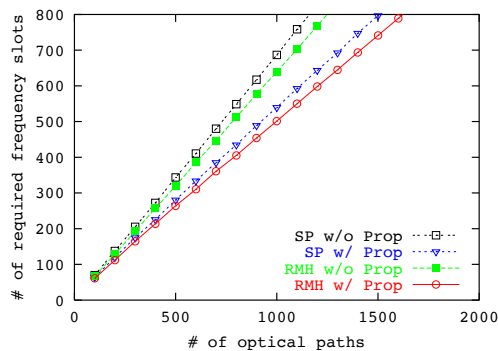


図3: JPN25 トポロジにおける性能評価

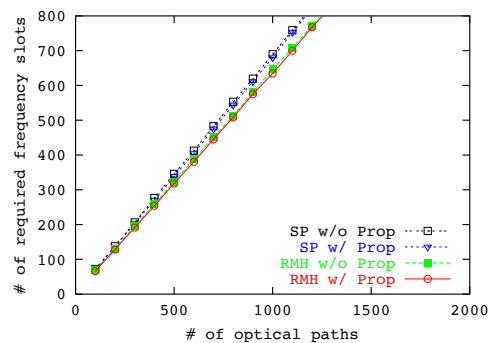


図4: ランダムに重畳を行った場合の性能評価

ホップ数降順で割り当てた場合の結果を図3に、ランダムな順序で資源割り当てを行った場合の結果を図4にそれぞれ示す。図3より、JPN25 トポロジの場合、最短経路と同ホップ数での迂回候補経路があまり存在しないため、経路選択による改善効果は薄くなるものの、光パス重畳による周波数資源節約効果が得られていることが確認できる。また、図4より、JPN25 トポロジにおいても各光パス設定要求に対してランダムな順序で周波数資源割り当てを行った場合、光パスの重畳が可能なケースが減少するため、節約効果は得られない。これらの結果より、光パス重畳はトポロジによらず周波数資源節約効果が得られるものの、その効果の度合いは、周波数資源割り当てを行う順序に依存することが分かる。

続いて、収容可能光パス数を増加させるための、光パス重畳化における線形計画法 (Integer Linear Programming, ILP) を用いた光パスの組合せ最適化手法を提案した。重畳符号化を用いることによって、伝送距離が短いコネクションを伝送距離が長いコネクションに重ね合わせることが可能となる。ここで、重畳符号化を行うためには、(1) 送信ノードが共通する、(2) 片方のコネクションの伝送経路がもう一つの伝送経路に完全に含まれる、の2点を満たす必要がある。重畳符号化によって、伝送距離の短いコネクションを伝送距離の長いコネクションに重ねて収容することが可能となり、長距離光パスを収容することによるネットワーク全体の通信容量減少を抑制できる。本手法では静的な要求トラフィックリストから ILP を用いて最も重畳回数が最大になるような組み合わせを選択する。JPN25 トポロジ(ノード数 25、リンク数 43)を用いて、比較方式として先に提案したヒューリスティックな手法(Heuristic)を用いて評価を行った結果の一部を表 1 に示す。このことから、Heuristic 手法を用いた場合でも、ILP に十分近い性能を達成可能であることを明らかにした。

表 1: ヒューリスティック手法と ILP 手法における必要周波数スロット数の比較

光パス数	Heuristic	ILP
200	28.4	28.6
400	73.4	74.0
600	122.8	123.4
800	168.2	169.0
1000	224.0	224.8
1500	354.4	355.8
3000	739.4	741.6

更に、単一故障に対して迅速に光パス伝送の復旧が可能な、光パス重畳化を用いたプロテクション方式を提案した。重畳符号化を用いることによって、伝送距離が短いコネクションを伝送距離が長いコネクションに重ね合わせることが可能となる。現用パスと予備パスで同一の伝送経路を用いた場合、現用パスと予備パスが同時に利用不能となる可能性が非常に高くなるため、それぞれの伝送経路はできる限り異なる方が望ましい。また、平常時の光パス伝送品質向上を優先するため、現用パスの伝送経路は最短路とし、予備パスの伝送経路は現用パスとリンク排反な経路とした上で重畳化を行う。なお、トポロジの特性上リンク排反な経路が存在しない場合は、最短路の次に最短の経路とする。

以下に提案方式のプロテクション割当手順を示す。本方式では、静的な要求トラフィックリストから、各コネクションに対して経路・変調方式・周波数スロットをそれぞれ割り当てて光パスを設定する。(1) 全コネクションに対して現用光パスを設定する。(2) 予備パスが未割当の光パスリストの中から、割当処理をする光パス(対象光パス)を一つ選択する。(3) 設定済みの予備系光パスリストの中から対象光パスの宛先ノードが伝送経路上に含まれていて且つ他の光パスと重畳化されていない光パスを伝送距離の昇順に一つ選択し候補光パスとする。なお、対象光パスとの伝送距離(ホップ数)が一定値 D 未満の場合、あるいは候補が見つからない場合は、通常の光パスと同様に現時点では重畳しないものとして周波数割当を行う。(4) 候補光パスと対象光パスを重畳化し、設定済み光パスリストを更新する。(5) 全ての光パスに対して予備パスが設定されるまで繰り返す。提案プロテクション手法の性能評価結果を図 5 に示す。重畳符号化を用いない場合は、現用光パスのみのケースの倍以上の周波数スロット数が必要となるが、重畳符号化を用いることで、特に現用光パス数が多い場合に周波数利用効率が向上し、必要周波数スロット数が少なくすむことを明らかにした。

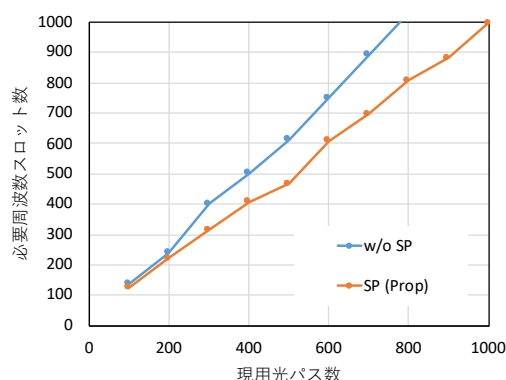


図 5: 重畳符号を用いた光パスプロテクション手法における必要周波数スロット数

重畳符号化技術を光ネットワークに適用することで、周波数利用効率を改善可能であることを本研究を通して明らかにした。一方で、光パスを実際に重畳した場合の影響は使用するトランスポンダや前方誤り訂正符号の性能などにも依存する。本研究では、主にネットワークの観点から重畳符号化による効果を研究したが、伝送実験なども実施してより詳細な特性評価などを進めることなどが今後の研究課題として挙げられる。

#### <参考文献>

- [1] 中川翔, 山崎景太, 杉山佑介, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺尚, “ソフトウェア無線を用いた実証デモンストレーション-重畳符号化と全二重通信-,” DICOMO2013 シンポジウム, DS-9, pp. 2116-2127, July 2013.
- [2] José Estarán, D. Zibar, and I.T. Monroy, “Capacity-Approaching Superposition Coding for Optical Fiber Links,” IEEE J. of Lightwave Technology, vol. 32, no.17, Sep. 2014.

〔雑誌論文〕（計 0 件）

〔学会発表〕（計 5 件）

[1] Yusuke Hirota and Takashi Watanabe, “A Spectrum Assignment Design for 1:2 Transmissions based on Superposition Coding in Elastic Optical Networks,” in Proc. of 24th OptoElectronics and Communications Conference / International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC), WP4-F2, Fukuoka, Japan, July 2019.

[2] 廣田 悠介, “フレキシブルな光ネットワークアーキテクチャとネットワークング技術,” 電子情報通信学会総合大会, BI-7-2, Mar. 2019. (依頼講演)

[3] 廣田 悠介, 渡辺 尚, “エラスティック光ネットワークにおける 1 対 2 通信を用いた光パルスプロテクション手法に関する検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-12-6, Mar. 2019.

[4] 永富 賢, 廣田 悠介, 渡辺 尚, “エラスティック光ネットワークにおける ILP による光パルス重畳回数最大化に関する検討,” 電子情報通信学会総合大会, B-12-13, Mar. 2018.

[5] 廣田 悠介, 渡辺 尚, “エラスティック光ネットワークにおける 1 対 2 通信を用いた周波数資源節約に関する検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 116, no. 498, pp. 125-130, Mar. 2017.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等：なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：渡辺 尚

ローマ字氏名：(WATANABE, Takashi)

所属研究機関名：大阪大学

部局名：大学院情報科学研究科

職名：教授

研究者番号（8 桁）：90201201

### (2) 研究協力者

該当なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。