

	つり たに たけ ひろ
氏 名	釣 谷 剛 宏
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成18年9月13日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学 位 論 文 題 目	大容量光海底伝送システムの高品質化に関する研究
指 導 教 員	東北大学教授 伊藤 弘昌
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 伊藤 弘昌 東北大学教授 中沢 正隆 東北大学教授 横山 弘之

論 文 内 容 要 旨

第1章 序論

インターネット技術の急速な進展と爆発的なインターネットユーザの増加により国際間のデータトラフィックは急激に増加しており、国際間のデータトラフィック交換を担う光海底伝送システムの重要性は増している。また、これらを背景に容量増大は急務な課題となっている。一方、光信号を電気に変換せずに光のまま中継伝送可能とする光ファイバ増幅器（以後光増幅器）が1990年代半ばに商用システムに導入され、その後、数 THz に及ぶ光増幅器の広帯域性を利用した光波長多重技術が急速に進展し、容量拡大の要求を容易にかつ経済的に実現してきた。しかしながら、光海底伝送システムは、特有の制約条件（光中継器筐体サイズの制限や供給電力の制限など）により、陸上システムのようにLバンドさらにはSバンドへと増幅帯域を拡大することが容易でないため、既存の約4THzのCバンド帯域を、如何に有効的に利用（周波数利用効率の向上）し波長多重数を増大するか、また、その帯域の伝送路品質を高品質化し、多波長信号の信号品質を高品質に均一化するかが重要である。さらに、波長多重数が増大した伝送システムを効率的に運用していくかが課題となっている。

そこで、本研究は、より多くの光信号を高品質に波長多重（以後WDM）伝送し、効率的にその波長を運用するために、新たなシステム（光送受信端局と伝送路）設計手法とネットワーク化手法について提案を行い、それらの手法を理論と実験の両面から検討実証を行うことによって、将来の大容量光海底伝送システム及びネットワーク化の研究開発の促進に寄与することを目的としている。

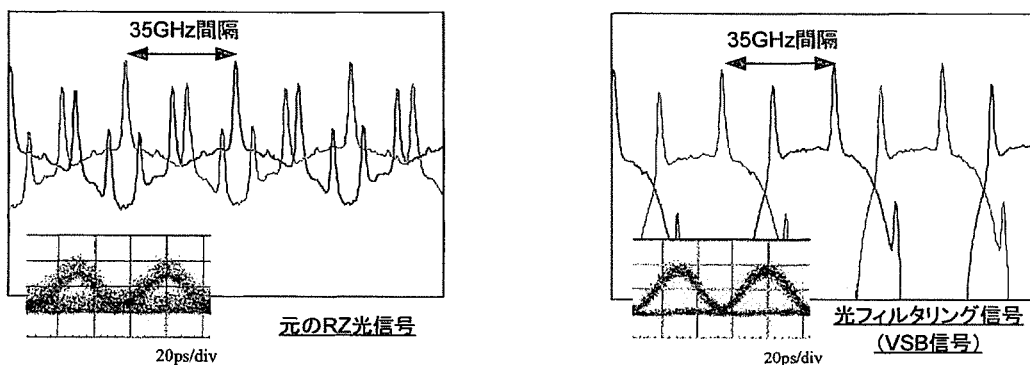
第2章 大容量光海底伝送システムの設計と高品質化のための課題

本章では、信号品質を表す光信号対雑音比（OSNR）とQ値との関係を示し、設計における重要なパラメータを明らかにするとともにシミュレーションによって算出することが難しい非線形劣化量などのパラメータを実験的に評価するために重要となる周回伝送実験系について詳細を示した。また、伝送距離4000km以上の波長多重光海底伝送システムにおいて、波長間隔を狭窄化したときのリニアクロストークの問題、利得等化残の累積によるOSNR劣化の問題、累積分散による非線形劣化の問題を明らかにし、課題の抽出を行った。さらに、多くの波長を効率的に管理し運用するためのシステムのネットワーク化に関して、現状ネットワーク構成の課題を明らかにした。

第3章 高密度光波長多重伝送における光送受信端局の高品質化

本章では、経済的にかつ高品質に容量を増大する（波長多重数を増大する）ための波長多重化手法を提案し、その光信号の基本特性を理論と実験の両面で検討を行った。一般的に光信号は、光変調方式によって決定される固有の光スペクトラム幅によって、有限な伝送路帯域内に波長多重化できる波長数は制限されるが、光フィルタを用いてオリジナルの光変調信号の帯域を削減する光フィルタリング手法に

よって、原信号を Vestigial Side Band(VSB)化 (図 1) することによって、波長間隔を狭窄化しても隣接光波長からのリニアクロストークを抑圧でき、従来の 1.5 倍の周波数利用効率を実現できることを示した。また、光フィルタの中心波長を原 CS-RZ 光信号の中心波長から適切にディチューニングしオリジナルの品質から顕著な劣化なく帯域を制限することができることを明らかにした(図 2)。逆に、光フィルタリングは、光ファイバへの入力パワーの増大や長距離伝送の場合において、非線形効果による品質劣化が大きくなる課題も明らかにした(図 3)。以上より、光フィルタリング波長多重信号では、リニアクロストークの抑圧効果と非線形効果による品質劣化のトレードオフにより伝送距離が決定されることを明らかにした。さらに、これらの知見をベースに、従来 40%の周波数利用効率しか実現できなかった 40Gbit/s ベースの光海底伝送システムを光フィルタリング CSRZ-DPSK 光信号を用いて、高周波数利用効率(約 60%)な 40Gbit/s x40WDM 太平洋横断級(9000km 以上)の伝送に成功した。なお、この光フィルタリング手法については、他の多くの研究グループにて検討が進められており、高密度光波長多重伝送において有効であることが実証されている[1][2]。



(a) RZ 光波長多重信号のスペクトラムとアイ波形 (b) VSB-RZ 光波長多重信号のスペクトラムとアイ波形
 図 1 周波数利用効率 57%の 20Gbit/s RZ(原信号)及び光フィルタリング RZ 光波長多重信号

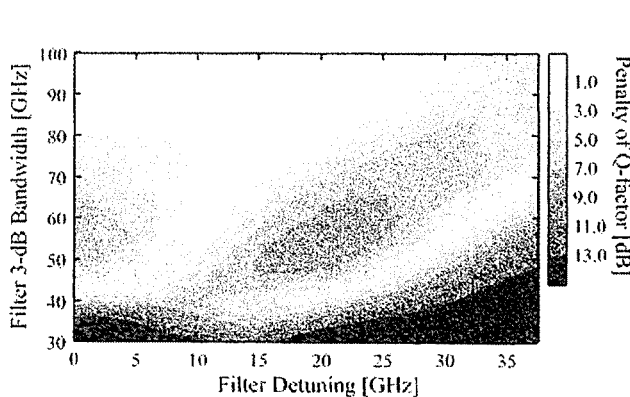


図 2 40Gbit/s CS-RZ 光信号の光フィルタリングによる Q 値劣化量

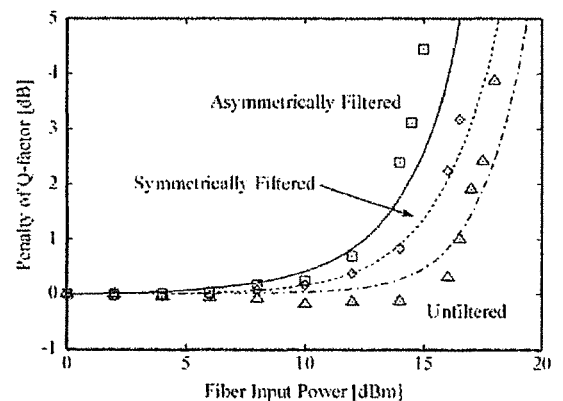
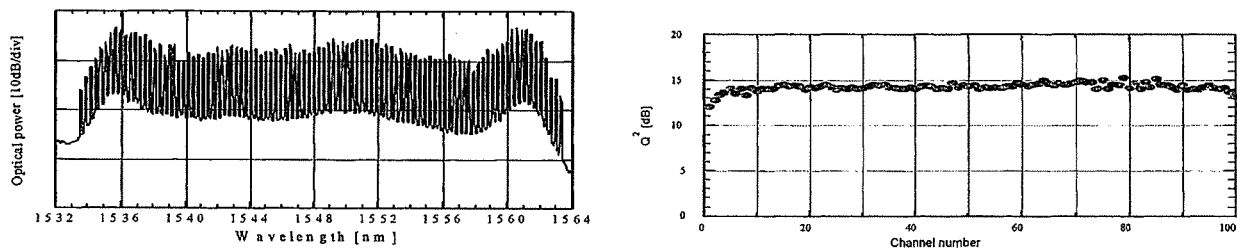


図 3 40Gbit/s 光フィルタリング CS-RZ 光信号の光ファイバ入力パワー依存性

第 4 章 大容量光海底伝送システムの伝送路の高品質化

本章では、3 章で提案した高密度光波長多重信号を波長依存性なく均一な信号品質で長距離伝送させるために、大容量光海底伝送システムの伝送路(光中継器と光ファイバにより構成)の高品質化について検討を行った。多段中継伝送路では、中継器毎に発生する僅かな利得等化残が累積し伝送後の信号品質に大きな影響を及ぼすため、精密な利得等化残補正(2次利得等化器)が必須である。そこで、従来の Math Zehnder(MZ)フィルタを用いた 2 次利得等化設計手法を提案し、より少ない段数で精密な利得等化が可能であることを確認するとともに、4 段の MZ フィルタ群で構成された 2 次利得等化器を 9 中継毎に挿入し、10000km 伝送後においても 30nm の均一な利得帯域が実現可能であることを確認した。

また、コア拡大正分散ファイバ(EE-PDF)と分散スロープ・分散補償ファイバ(SCF)とで構成される分散フラット伝送路[3]を非線形効果低減の観点から、理論と実験によって比較検討を行い、10Gbit/s WDM 伝送において、単位長さ当りの波長分散がより大きな SCF を用いた方が非線形効果による品質劣化が少ないことを明らかにするとともに、本伝送路のスパン平均分散とシステム平均分散の最適設計ポイントを明らかにした。これらの技術を用いて、10Gbit/s x 100WDM テラビット太平洋横断伝送実験に成功しており (図 4)、後に商用化技術として採用されたことは重要な成果である。



(a) 7800km 伝送後の光スペクトラム (b) 100 波長の Q 値特性

図 4 10Gbit x 100 波長多重 7800km 伝送実験結果

第 5 章 大容量光海底伝送システムのネットワーク化に関する研究

本章では、多波長化された複数の光海底伝送システムを統合的に運用管理し、効率的かつ高信頼な波長ネットワークを構築するための手法・機能について提案・検証を行った。複数の伝送システムの波長を、全光スイッチングベースの光クロスコネクタ (Photonic Cross Connect:PXC)装置を用いて収容するモデルにおいて、光送受信端局(WDM 装置)と PXC 装置とが Generalized Multi-Protocol Label Switching(GMPLS)プロトコルを用いて連携動作し、波長を運用する方式を提案した (図 5)。この方式において、ケーブル障害や信号品質低下においても、WDM 装置からの情報をトリガに自動で別の伝送システムへ障害復旧する機能を実現した (図 6)。また、運用保守性の観点から、予備波長の正常性確認機能や、WDM 装置の警報抑止機能、PXC 装置の自動警報解除機能の制御アルゴリズムを提案し、実験においてその有効性を確認した。これらの機能の実現により、複数の光海底伝送システムの波長を効率的に運用し、かつ高信頼な波長ネットワークの構築が可能であることを実証した。

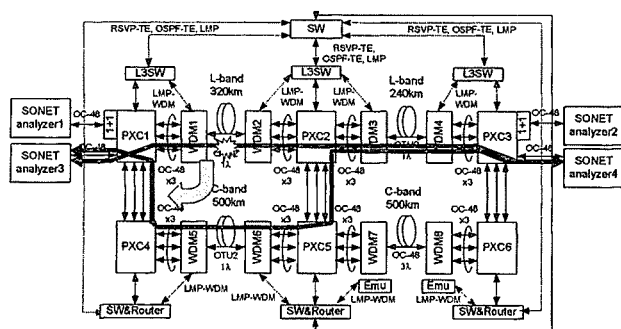


図 5 PXC 装置を用いた海底伝送システムのネットワークモデル

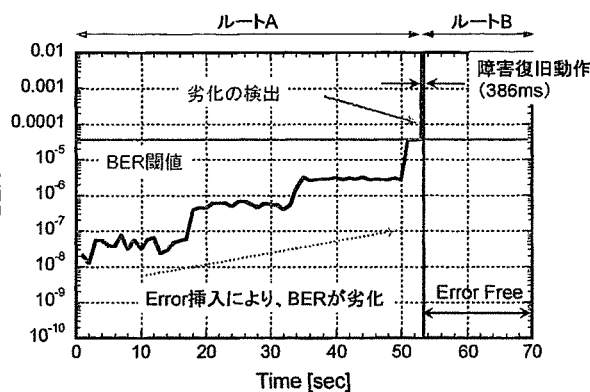


図 6 品質劣化前後の BER の時間変化

第 6 章 結論

以上、本研究の成果を纏めると

- (1) RZ, CSRZ, CSRZ-DPSK 光信号の光スペクトラム帯域を削減し、高密度に波長多重化する光フィルタリング手法を提案した。元の光変調信号を適切にディチューニングし VSB 化することによって、元の信号品質とほぼ同等の光フィルタリング信号を生成可能であることを明らかにした。また、この手法を用いることにより、従来よりも 1.5 倍以上高周波数利用効率化した波長多重信号の生成が

可能であることを実証した。しかしながら逆に VSB 化は、非線形劣化を増大させることを伝送実験によって明らかにし、伝送距離によって、適切なフィルタディチューニングが存在することを明らかにした。以上の結果を基に、適切な光フィルタリング CSRZ-DPSK 信号を用いて周波数利用効率 57% の 40Gbit/s x 40WDM 太平洋横断伝送実験に世界に先駆け成功した。

- (2) 波長多重信号の品質を伝送帯域に渡って高品質に均一化するために、多段光中継器の利得帯域を精密に平坦化する 2 次利得等化設計手法を提案するとともに、累積分散の波長依存性を削減する分散フラット伝送路の最適構成を実験的に明らかにした。これらの技術を用いて、伝送帯域 30nm に渡って高品質化された伝送路を構築し、10Gbit/s x 100WDM 伝送において、世界に先駆け商用化レベルの品質を確保した C バンド帯域のみを利用したテラビット太平洋横断伝送に成功した。
- (3) PXC 装置を用いて、多波長化された複数の光海底伝送システムを統合的に管理するネットワークモデルにおいて、PXC 装置と伝送端局を GMPLS プロトコルによって連携させることによって、伝送区間の品質やケーブル障害を自律的に監視管理し、動的に別の伝送システムへ障害復旧可能な高信頼な波長ネットワークを構築可能であることを実験的に明らかにした。また、運用性の向上の観点から、予備波長の正常性確認機能や、WDM 装置の警報抑止機能、PXC 装置の自動警報解除機能の制御アルゴリズムを提案し、実験においてその有効性を確認した。

参考文献

- [1] T. Tsuritani, A. Agata, I. Morita, K. Tanaka and N. Edagawa, "Performance comparison between DSB and VSB signals in 20Gbit/s-based ultra-long-haul WDM systems," presented at the OFC2001, Anaheim, CA, 2001, Paper MM5.
- [2] B. Zhu, L.E.Nelson, S.Stulz, A. H. Gnauck, C. Doerr, J. Leuthold, L. Gruner-Nielsen, M. O. Pedersen, J. Kim, R. Lingle, Jr., Y. Emori, Y. Ohki, N. Tsukiji, A. Oguri, S. Namiki, "6.4-Tb/s (160 x 42.7Gb/s) transmission with 0.8bit/s/Hz spectral efficiency over 32 x 100km of fiber using CSRZ-DPSK format," OFC2003, postdeadline paper PD19, 2003.
- [3] M. Murakami, T. Matsuda, T. Imai, "Quarter Terabit (25x10Gb/s) over 9288km WDM Transmission Experiment using Nonlinear Supported RZ Pulse in Higher Order Fiber Dispersion Managed Line," ECOC'98, Post Deadline Paper, pp.79-81,1998.

論文審査結果の要旨

近年のブロードバンドの普及により、国際間のデータトラフィックは急増しており、大容量光海底伝送システムの重要性は増している。一方、波長多重技術はその大容量化の要求を迅速にかつ経済的に実現可能な技術として非常に重要である。本研究は、光海底伝送システムの特長要件を勘案しながら、高品質で経済的に波長多重化を実現する新たな提案を行い、さらに、その波長多重信号を効率的に運用する手法を提案し、その効果を理論および実験の両面から初めて明らかにしたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の意義および目的について述べている。

第2章では、信号品質の評価手法を述べ、波長多重化に伴う品質低下と運用性の課題を明らかにしている。

第3章では、狭い光スペクトラム帯域を持った光信号の生成法について、新たな手法の提案を行い、その光信号の基本特性を理論と実験の両面で検討を行っている。オリジナルの光変調信号は固有の光スペクトラム幅を有しているが、経済的にその帯域を削減するため光フィルタリング方式を新たに提案している。この方式では、光フィルタとオリジナルの光変調信号のフィルタリングする位置を信号の中心波長からディチューニングすることによってオリジナルの品質から顕著な劣化がなく帯域を制限することができることを初めて明らかにした。さらに、非線形効果による品質劣化が大きくなる課題も明らかにした。以上のトレードオフにより伝送距離が決定されることを明らかにしたことは、重要な新たな知見である。

第4章は、波長多重信号を波長依存性なく均一な品質で伝送させるために、伝送路特性の精密な平坦化技術について述べている。長距離多段中継による利得等化残特性を精密に補正し、平坦化する2次利得等化器の設計手法を新たに提案している。また、非線形効果低減の観点から、理論と実験によって、分散フラット伝送路の最適な光ファイバ構成を明らかにしている。これらの2つの技術を用いて、(10Gbit/s × 100WDM) テラビット太平洋横断伝送実験に成功したこと、さらに商用化された技術として採用されたことは重要な成果である。

第5章は、光海底伝送システムに收容されている多波長信号を効率的にかつ高信頼に運用するためのネットワーク化方式について新たに提案し、その動作手法の検討を行っている。光クロスコネクタ装置(PXC)を用いて複数の光海底送受信端局に跨る波長を統合的に收容し、端局が持っている情報をPXCと連携しながら、波長を運用する方式を新たに提案している。この方式では、予期せぬ品質低下やケーブル障害時に、障害波長を自動で障害復旧できる機能や、予備系リンクの管理機能などを初めて実現している。これらの成果は、光海底伝送システムをメッシュネットワーク化し運用する技術を初めて実験的に明らかにしたもので、非常に重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、波長多重伝送方式を光海底伝送システムに適用したときの問題点を明らかにしてその解決手法を提案し、実験的検証を通してその可能性を明らかにしたものであり、電子工学、光通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。