

論文の内容の要旨

論文題目 波長多重光増幅中継を用いた
大容量長距離伝送システムの研究

氏名 内藤 崇 男

波長多重光増幅中継伝送方式は、波長多重信号光を一括光増幅するエルビウムドープファイバ増幅中継器(Erbium doped fiber amplifier、EDFA)を用いるため、光通信システム大容量化および長距離化を実現する有力な光伝送方式である。光増幅中継器は従来の再生中継器と比較して構成が簡単であり、部品数が少なく経済的、高信頼、低消費電力という特長を持つ。また、光送信端局および光受信端局において波長多重数を増加させることにより容易に伝送容量のアップグレードが可能である。

現在、この波長多重光増幅中継伝送方式は、数千キロメートルを越える大洋横断の光海底ケーブル伝送システムへ適用されている。しかし、光増幅中継器は線形中継器であり、その中継器数が数百に達するために、光増幅器が持つ利得偏差の累積（自己フィルタリング効果）による信号光波長帯域幅の制限、光増幅器から発生する自然放出光の累積による光 SN 比の低下、光ファイバが持つ非線形効果である自己位相変調、相互位相変調および四光波混合による伝送波形歪み、光ファイバが持つ波長分散およびそのスロープの補償などの新しい課題が指摘されている。

そこで本論文は上述したような背景に基づき、大容量長距離波長多重光増幅中継伝送方式、特に光海底ケーブル伝送システムへの適用における諸問題の解決に関してこれまでに行った研究成果について述べ、波長多重光増幅中継伝送方式の更なる性能改善ための指針を示すことを目的としている(図 1、2 参照)。

第 2 章では、Al-Ge-SiO₂ EDFA 向け利得等化法を用いて信号光波長帯域幅を拡大できることを実証した。まず、EDFA の利得波長特性を精度良く補償するために 2 つの異なる波長周期を持つ光フィルタを階層的に用いる利得等化法を提案し、利得等化器の波長周期および最大損失波長などの最適設計法を明らかにした。特に第 1 利得等化器の最大損失を与える波長よりも第 2 利得等化器の最小損失を与える波長を短く設計することにより、EDFA が持つ非対称な利得波長特性を補償できることを実証した。次に、周回伝送路を用いた伝送実験において、第 1 利得等化器の挿入台数をパラメータとして信号光波長帯域幅と光 SN 比の間におけるトレードオフ関係を評価し、最適な挿入比率を示した。更に、10,000 km 伝送後の信号光波長帯域幅を 12 nm まで拡大できることを確認するとともに、この利得等化法が信号光波長帯域幅の拡大に有効であることを明確にした。利得等化の補償間隔が異なる階層的な利得等化法の提案は、その後に数十中継毎にまとめて補償するブロック利得等化へと発展する点で意義が大きい。

第 3 章では、利得媒体であるエルビウムドープファイバ(EDF)自体の性能改善を図り、光増幅中継器の信号光波長帯域幅拡大および高出力化を実証した。まず、大容量長距離波長多重伝送システム向けに 1480 nm 励起 Al 高濃度添加 EDFA を設計し、その開発を行った。特に、EDF 長をパラメータとして利得平坦度と出力光パワーの間におけるトレードオフ関係を明確にするともに、1550 nm において+0.04 dB/nm の小さい利得偏差、4.7 dB の雑音指数および+11.5 dBm の高い出力光パワーを持つ EDFA を実現した。次に、48 nm のフリースペクトラルレンジ(FSR)を持つ Mach-Zehnder 型光フィルタを利得等化器として適用して、1550 nm 帯における利得の谷と山を含む EDFA 利得波長特性を精度良く補償できることを示した。更に上記の EDFA と長い波長周期を持つ利得等化器を用いて、10,000 km 伝送時の信号光波長帯域幅を 18 nm まで拡大できることを確認し、Al 高濃度添加 EDFA が 1.55 μm 帯における信号光波長帯域幅拡大に有効であることを明らかにした。最後に、更なる信号光波長帯域幅の拡大を目指して、1.55 μm 帯および 1.58 μm 帯を同時に用いる EDFA において Raman 増幅の併用を実現した。

第 4 章では、光増幅中継器の利得波長特性を安定化する目的で、可変型利得等化器を用いたインライン自動利得傾斜補償を提案し、その効果を初めて実証した。まず、プリエンファシスによる利得補償の限界を計算機解析により示した。次に、新しい可変型利得等化器を提案し、実際にその開発を行った。1535 nm から 1565 nm の波長範囲において-7 dB から+7 dB まで損失傾斜を可変できることを確認するとともに、開発した可変型利得等化器が光増幅中継器の累積利得傾斜を自動的に補償できることを明らかにした。本提案技術は波長多重伝送システム全体の安定化に着目した新技術であり、将来に大容量伝送を実現するには必須と考えられる。

第 5 章では、伝送路の波長分散スロープによる累積波長分散が与える伝送特性劣化について理論および実験の両面から検討を行った。まず、光受信機において各波長毎に分散補償を行う後置分散補償では伝送波形歪み補償に限界があることを示した。次に、光送信機お

よび光受信機において各波長毎に前置および後置分散補償を行うことを提案した。この提案が分散スロープによる SPM-GVD 波形劣化を低減できることを計算機解析により確認するとともに、5.3 Gbit/s、1 波 4,760 km 直線伝送路実験において前置および後置分散補償により Q 値が改善することを実証した。また、光送信機において光強度変調器において発生するチャープングを併せて用いると、伝送波形が更に改善することを計算機解析および実験の両面から明らかにした。この分散補償技術は実現が容易であり、現在広く一般に用いられている。一方、伝送路自体の分散スロープを低減することを目的とした正分散ファイバおよび負分散ファイバの組み合わせにおいて、その低損失化および非線形実効断面積拡大を実現した。

第 6 章では、高速偏波スクランブラを用いた四光波混合発生抑圧法を提案し、5.3 Gbit/s、4 波長多重 4,713 km 伝送実験において本提案の効果を確認した。特に Q 値長時間連続測定を行ない、Q 値の時間揺らぎを定量的に評価することにより四光波混合発生が十分に抑圧されることを明らかにした。また、計算機解析により得られた結果は実験結果と良い一致を確認するとともに、システム設計ツールを確立した。

第 7 章では、相互位相変調による伝送波形歪みについて理論および実験の両面から検討を行った。まず、5.3 Gbit/s、2 波長多重 2,740 km 伝送実験において相互位相変調による伝送波形劣化の時間方向に着目してその時間方向の揺らぎなどを測定するとともに、計算機解析を行い良い一致を得た。次に、隣接チャネルとの相対的な遅延時間差が与える伝送波形歪みに関して計算機解析および実験の両面から検討を行い、良い一致を得た。相互位相変調による伝送波形歪みが波長多重光増幅中継伝送方式における支配的な制限要因の一つであることを明らかにした。更に、相互位相変調による伝送波形歪みを低減する分散マネジメント法について提案した。

第 8 章では、AI 高濃度添加 EDFA および長い波長周期の光フィルタを用いて伝送容量 170 Gbit/s (5.3 Gbit/s、32 波長多重) 9,879 km 波長多重伝送実験を行った。AI 高濃度添加 EDFA と長い波長周期を持つ利得等化器の組み合わせは、大容量長距離波長多重伝送システムに有効であることを明確にした。本提案の前置および後置分散補償を用いることにより SPM-GVD による伝送波形歪みを改善することを実証した。本提案の偏波スクランブラを用いることにより四光波混合発生を抑圧できることを確認した。相互位相変調による伝送波形歪みが支配的な要因であることを明らかにした。10.7 Gbit/s、32 波長多重 4,987 km 伝送実験において、伝送路の修理および経時劣化による中継区間あたりの伝送損失が増大する時に、本提案の自動利得傾斜補償器を用いることにより光 SN 比劣化および Q 値劣化を最小限に抑圧できることを初めて示した。最後に、1.55 μm 帯および 1.58 μm 帯を併用した光増幅器、広帯域、コア径拡大および低損失な伝送路、相互位相変調による伝送波形歪みを低減する分散マネジメントを用いて、1 Tbit/s (10 Gbit/s、104 波長多重) 10,127 km 伝送実験を確認した。大きなマイルストーンである 1 Tbit/s、10,000 km 伝送を世界に先駆けて実験したことは大いに意義がある。

21 世紀に向けて更なる大容量化および長距離化を実現するために必要な主な伝送技術には、新しい光波長帯域を持つ光増幅器、高密度多重化による伝送容量の拡大、広帯域に伝送することが可能な光ファイバなどがある。その他には、光送信機および光受信機の高性能化、小型化および低消費電力化、高性能な誤り訂正符号技術が重要な鍵となる。また、インターネットを直接伝送することが可能な IP over WDM 対応技術も重要である。

以上に述べたように、波長多重光増幅中継伝送方式が将来の情報通信分野において極めて重要な役割を果たすと予測され、これまで以上の大容量化および長距離化を実現する研究開発がますます重要になってきている。

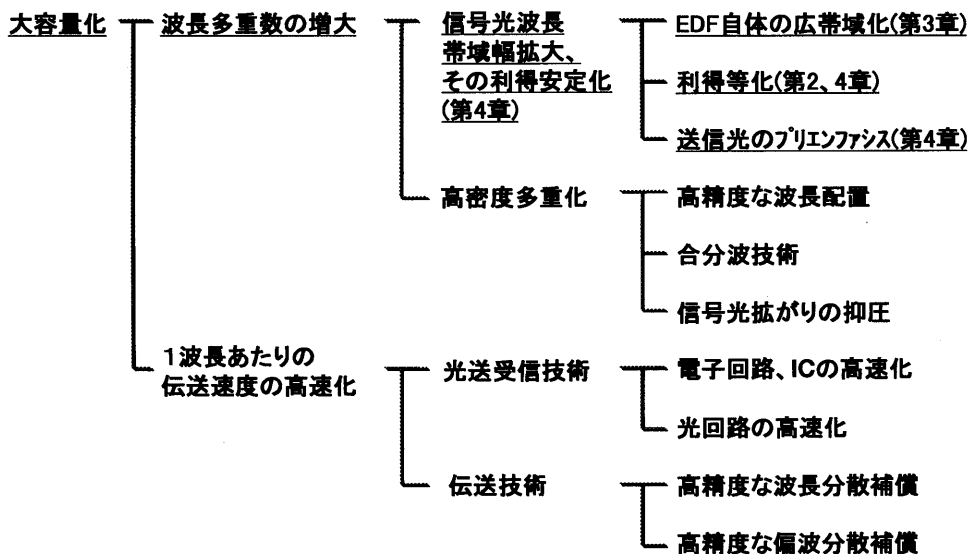


図1 大容量化の課題と対策例(下線部は本論文に関するテーマ)

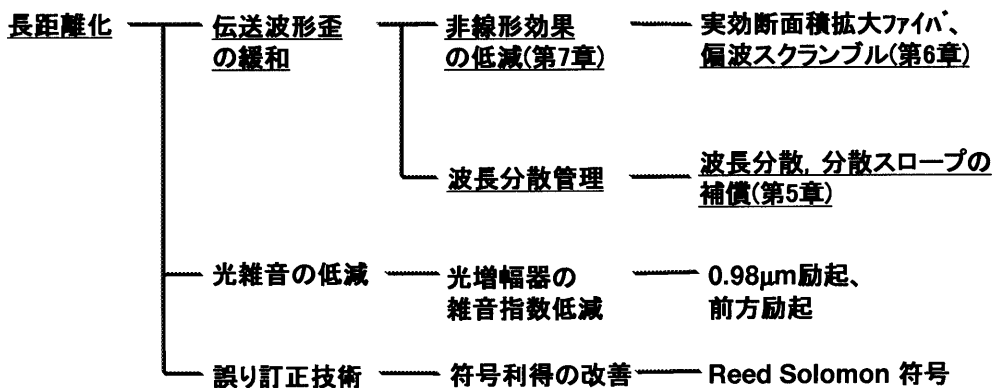


図2 長距離化の課題と対策例(下線部は本論文に関するテーマ)