



沖縄本島 - 宮古島間に導入した 海底遠隔励起光増幅システムの開発

NTTネットワークサービスシステム研究所

かたおか ともよし な か あきら まつおか しんじ
片岡 智由 / 那賀 明 / 松岡 伸治

本年3月に沖縄本島 - 宮古島間にて運用を開始した350 km無中継海底WDM (Wavelength Division Multiplexing) 伝送システムの特徴と、遠隔励起光増幅技術をはじめとした新技術について紹介します。

宮古島へのブロードバンドサービス開始

昨今の情報通信分野における技術進歩は目覚しく、多彩なジャンルにおける情報通信の利用機会の拡大などを背景にネットワークサービスはブロードバンド化へと急速に変貌を遂げています。NTT西日本は、地域振興・活性化に向けた地域貢献等に寄与するため、沖縄本島 - 宮古島間、宮古島 - 石垣島間への新規海底光ケーブルシステム導入を決定⁽¹⁾し、敷設工事を昨年4月に着手、本年3月よりシステム運用を開始しました。ここではNTTネットワークサービスシステム研究所が開発したシステムが採用されています。本システムにより宮古島、石垣島においてもブロードバンドサービスが可能となりました。

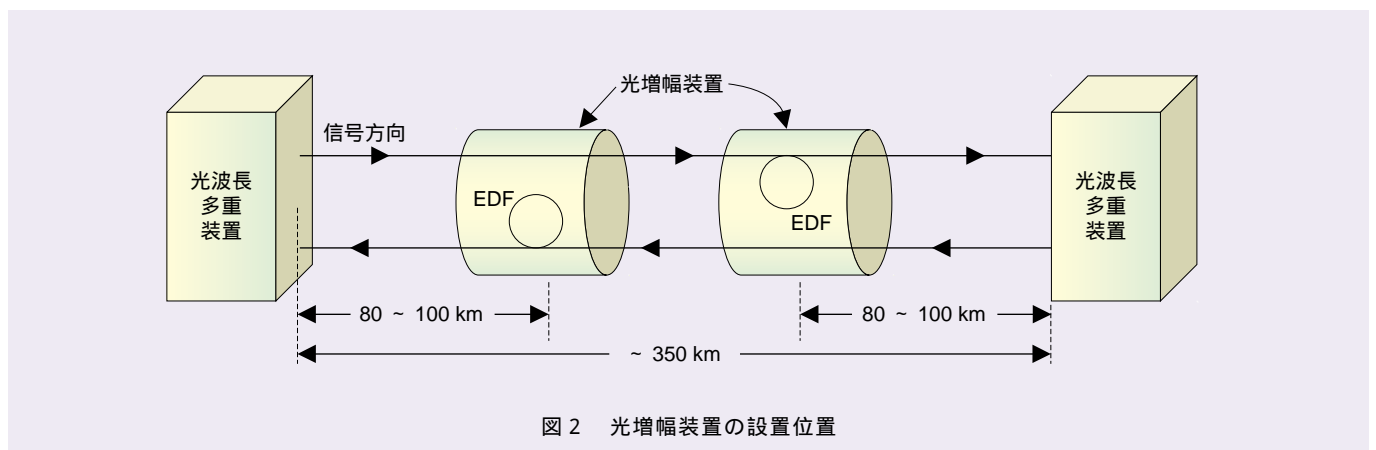
開発の経緯とシステム概要

(1) 開発経緯

沖縄本島と宮古島を結ぶ海底ケーブルルートは約350 kmあります(図1)。陸上用の伝送システムで中継できる最大

距離は160 kmであり、この区間に適用するには性能が不足します。

一方、光中継器による一般的な海底ケーブルシステムを適用する場合には、海底中継器のほかに、局内に給電装置設置、局外に給電装置用アース施設が



必要となり、設備費用も運用費用も高価となることが懸念されました。そこで350 kmを無給電で伝送することを目標に遠隔励起光増幅技術を適用した新たな無中継海底システムを開発することとしました。

(2) システム概要

本システムは、遠隔励起光増幅機能を用いて、2.4 Gbit/sの信号を最大8波長、多重して、最大350 km以上を無給電で伝送します。光増幅装置（海底装置）、光波長多重装置、光監視制御端末、および別途構築される海底光ファイバケーブルとで構成されます（図2）。

本システムの主要諸元を表に示します。また本方式は、長距離化伝送技術をオプション化して、ケーブル距離に適したシステムを選択できるように設計さ

れています。選択可能な3つのシステムを次に示します（図3）。

最大350 kmまで伝送可能な「遠隔励起光増幅システム」

最大300 kmまで伝送可能な「ラマン増幅システム」

最大240 kmまで伝送可能な「無中継システム」

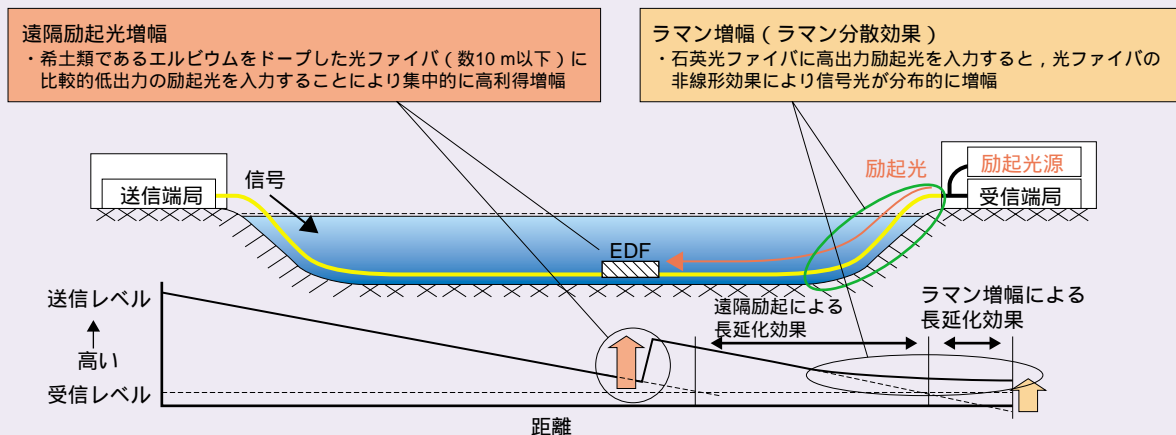
表 開発したシステムの主要諸元

装置	項目	仕様
伝送装置	伝送距離	最大350 km
	光波長多重装置（端局）	1波長当り伝送速度 最大波長多重数 陸側インタフェース
	光増幅装置（海底装置）	機械的特性 収容システム数
	NE-OpS	シャットダウン/装置起動機能、警報履歴機能、線路監視補助操作機能等

STM: Synchronous Transfer Mode

FSA: Fiber Submarine Transmission using In-line Optical Amplifiers

NE-OpS: Network Element-Operation System



ルート長に即した長延化技術

システム	従来技術	追加技術
無中継 (距離: 240 km以下)	低損失ケーブル 高出力高感度WDM送受信器	
ラマン増幅 (距離: 300 km以下)	低損失ケーブル 高出力高感度WDM送受信器	ラマン増幅
遠隔励起光増幅 (距離: 350 km以下)	低損失ケーブル 高出力高感度WDM送受信器	ラマン増幅 遠隔励起光増幅

図3 適用した海底伝送方式の伝送距離長延化技術

なお、3つのシステムの最大伝送距離には、ケーブル敷設工事時の接続損失、あるいは運用期間中の修理等による損失を十分に見込んでいます。いずれも給電装置を必要としないシステムですが、最大伝送距離を実現するのシステムでは遠隔励起光増幅用エルビウム添加ファイバ（EDF: Erbium Doped Fiber）を収容した光増幅装置を海底に設置する必要があります。

主な適用技術

本システムでは多くの新技术を開発し適用しています。その中でも重要な技術を次に紹介します。

ラマン増幅効果を併用した遠隔励起光増幅技術

最大パワー1Wの波長 $1.48\ \mu\text{m}$ の励起光を、信号光とは逆に受信局側から伝送用光ファイバに送出し、海中に設置した光増幅装置内のEDFを遠隔励起して、送信局から伝送されてきた信号光を増幅します。EDFは、低励起パワー（約5mW）で所要利得（16dB）と低雑音指数（5dB）が得られる世界最高性能クラスのものを使用しています。また高出力の励起光をファイバケーブルに送出することにより、副次的に発生するラマン増幅効果も利得改善に活用しています。遠隔励起用EDFで約16dB、ラマン効果で約10dB合計約26dBの利得が得られるように設計しています。

波長分散補償の適用による受信SNR改善技術

本システムでは伝送距離の長延化のために、1波長当りの出力パワーを20dBmと高くしています。このため信号速度は2.4Gbit/sとそれほど高速信号ではありませんが、ファイバの非線形光学効果により許容される波長分散値は約1500ps/nm程度に低下してしま

います。一方、適用した低損失ファイバ350kmの総波長分散値は約+6500ps/nm（波長 $1.55\ \mu\text{m}$ のとき）と大きく、そのままでは信号の波形が大きく歪んでしまい伝送できません。そこで、本システムではマイナスの分散を持つ分散補償ファイバを適用し、伝送ケーブルの波長分散値を相殺するようにしています。

識別点自動調整機能を用いた高感度受信技術

本システムでは、世界標準ITU-T G.709に準拠した誤り訂正符号を用いて、約5.5dBの受信SNR（信号対雑音比）改善を実現しています。また受信側の信号の1, 0を識別する識別回路では、識別点最適化技術を用いてSNRの改善を行っています。識別点の最適化には、位相と振幅との2つのパラメータをそれぞれ最適化することが望まれますが、今回のシステムでは位相についてはトレランス（tolerance：許容誤差）が十分に大きいことから、振幅についてだけ識別点自動調整機能を持たせるように設計しています。

送信部の高出力光増幅技術、および受信部の励起光源構成技術

送信用の光増幅器は、マルチモードサイド励起方式のEDFA（Erbium Doped Fiber Amplifier）を用いて、1波当たり最大0.13W、8波合計で1Wを得ています。

また遠隔励起光源にはラマンファイバレーザを適用することで最大1Wの出力を達成しています。遠隔励起光増幅システムでは、励起光波長はEDFAの励起効率が高い $1480\ \text{nm}$ としていますが、遠隔励起光増幅装置を持たないラマン増幅システムでの使用を考え、ラマン増幅率が信号光波長域でもっとも高くなる $1450\ \text{nm}$ で出力できるように、励起光源には $1450\ \text{nm}$ と $1480\ \text{nm}$ の切り替えができるものを用いています。

高光パワー取り扱いに関する安全対策技術

このシステムでは、送信局からは信号光が約1Wで出力され、受信端からも励起光が約1Wで出力されます。このような高出力光の光通信システムでの取り扱いについては、IEC（International Electrotechnical Commission）で議論が行われ勧告がなされています。本システムは、IEC60825-2（光ファイバ通信システムの安全）に定められる安全基準に準じた機能を有しています。具体的には、全波長の信号断を検出し、伝送路ファイバの途中どこかで保守者にやけど等の被害を与えるおそれのある高光パワーの光が漏れている（露光している）可能性が判明したら、直ちに（1Wの高光パワーに許容された最大露光時間の約500ms以内に）全システムがシャットダウンするようになっています。

ファイバ非線形光学効果による信号劣化

本システムでは信号光のファイバへの入力レベルが高いため、非線形光学効果の影響を考慮した設計をしています。非線形光学効果には自己位相変調（SPM）、四光波混合（FWM）、相互位相変調（XPM）、信号間ラマン増幅等があり、そのうちFWM、XPMの影響が支配的です。

例えば、信号光パワー $-19.5\ \text{dBm/CH}$ のときの非線形光学効果による伝送ペナルティは、FWM 2dB、XPM 3dB、その他0.2dBで合計5dB以上となります。それでも送信パワーが0dB程度の一般的な伝送システムに比べて送信パワーを約20dBと大きくすることで、非線形光学効果によるペナルティ5dBを差し引いても15dB相当の長距離化が可能となります。

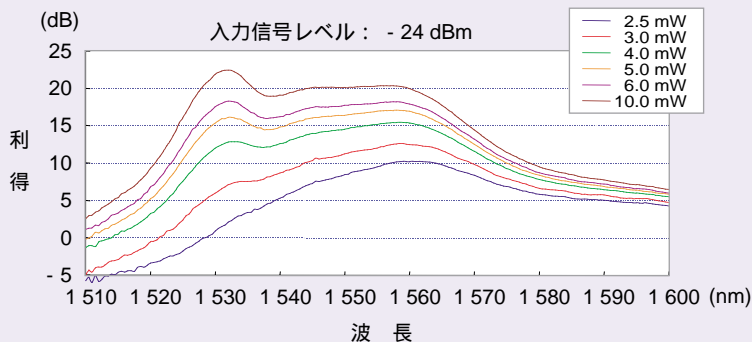


図4 EDFの入力レベルによる利得波長依存性

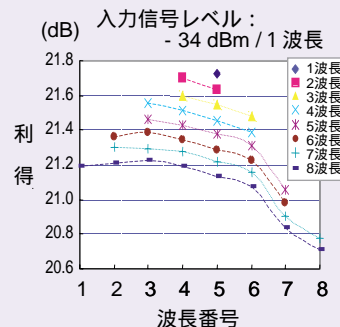


図5 EDFの利得の波長数依存性

高利得EDF

海底無中継遠隔励起のシステム設計は、光ファイバの損失特性、適用するEDFの特性に制約されます。ここでは、適用したEDFの特性を紹介します。

本システムは8波長の波長多重システムですが、需要に応じて波長数を変更可能なように、EDFは1波長から8波長のいずれの波長数でも動作する広いダイナミックレンジが求められます。一般的な光アンプでは、アンプ利得の適応制御を行うことでこの要求にこたえています。本システムでは動作の安定性を重視して利得の適応制御を行わず、波長数によらずに励起光のパワーを一定制御しています。

システムに適用しているEDFの利得と雑音指数の測定結果を図4と図5に示します。図4には、励起光パワーをパラメータに利得の波長特性を示しています。システムで想定される信号光の入力レベル - 24 dBmならびに励起光パワー 5 mWにて利得16 dBが得られていることがわかります。図5は、EDFの利得が波長数が増加したときに、どのように減少するかを示しています。励起光パワー10 mW、1波長当りの入力レベル - 34 dBmにて1波長入力の利得は

21.7 dB (波長番号：5)でしたが、8波長入力した場合には、21.1 dB (波長番号：5)であり、差分は0.6 dBと小さいことがわかります。またすべての波長で利得20 dB以上を得られることもわかりました。

フィールド試験

海底ケーブル敷設およびシステム設置工事終了後に、実システムにてフィールド試験を行いました。フィールド試験では、受光レベル、光信号対雑音比、ビット誤り率等の測定を行いました。誤り率は 1×10^{-12} 以下であり、海底システムとして十分なマージンが確保されていることがわかりました。また受光端近傍での海底ケーブルの切断・修理を模擬する試験等も行いましたが、この場合にも十分な受光レベル、低い誤り率特性が得られています。

今後の予定

無中継海底伝送システムに関して、将来求められるであろうさらなる長距離化・大容量化されたシステム技術の研究開発を進めています。

参考文献

- (1) <http://www.ntt-west.co.jp/news/0312/031224.html>



(左から) 那賀 明 / 松岡 伸治 / 片岡 智由

大容量の海底伝送システムは、ブロードバンド時代の島嶼部の地域振興・活性化に欠かせません。技術革新の速い陸上伝送システムの技術と海底システム独自技術を上手に活用した新世代システムの開発を進めていきます。

問い合わせ先

NTTネットワークサービスシステム研究所
第二推進プロジェクト
超高速光リンクDP
TEL 046-859-3062
FAX 046-859-8569
E-mail kataoka.tomoyoshi@lab.ntt.co.jp