

超長スパン無中継伝送システム技術

稲田 喜久

要 旨

近年の急速なブロードバンド化に伴う通信トラフィックの増加により、国際ネットワークシステムのバックボーンを支える光海底ケーブルシステムの需要が拡大しています。無中継光海底ケーブルシステムは、有中継光海底ケーブルシステムに比べて、建設コストを大幅に抑えることが可能であるため、無中継海底ケーブルシステムの長スパン化は極めて重要な検討課題といえます。

本稿では、NECにおける長スパン無中継光海底ケーブルシステム技術と最新の無中継端局装置、今後の取り組みについて紹介します。

キーワード

●無中継伝送システム ●変調方式 ●分布ラマン増幅 ●遠隔励起増幅 ●40Gbps伝送システム

1. はじめに

無中継光海底ケーブルシステムは、主に離島-離島間や本土-離島間及び沿岸の陸揚げ地を結ぶ、国内及び地域内のネットワークシステムであり、海底ケーブル内に光増幅中継器がなく、光増幅中継器へ電力を供給する給電装置も不要であるため、有中継ケーブルシステムに比べて建設コストを大幅に低減することができます。本稿では、NECにおける長スパン無中継光海底ケーブルシステムのための伝送技術開発と無中継端局装置SLR320SW LTE、今後の更なる大容量化に向けた40Gbpsシステムへの取り組みについて紹介します。

2. 無中継光海底ケーブルシステムの構成

無中継光海底ケーブルシステムの構成を 図1 に示します。

無中継光海底ケーブルシステムは、主に陸揚げ局に配置される端局装置と海底光ファイバケーブルから構成されます。

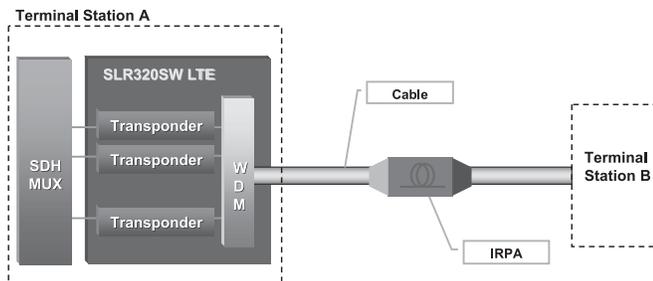


図1 無中継光海底ケーブルシステムの構成

端局装置は、光信号の送受信機能を提供するトランスポンダ部と波長多重分離機能、波長分散補償機能を提供するWDM（Wavelength Division Multiplexing）部から構成されます。

無中継用光海底ファイバケーブルには、ケーブル内に光増幅中継器がなく、また光増幅中継器へ電力を供給するための給電装置も不要であるため、経済的な光海底ケーブルシステムを提供することができます。また、受信特性を改善するための手段として、後述する遠隔励起増幅（IRPA：In-line Remote Pumping Amplifier）技術があります。このIRPAを海底光ファイバケーブル中に配置することで、スパン長を大幅に延伸することが可能となります。

3. 長スパン化のための要素技術

無中継光海底ケーブルシステムで伝送できるスパン長は、端局装置の送信部から伝送路ファイバへの送出する主信号の光レベルと端局受信端で許容される主信号の最小受信光レベルの差から計算されるシステム利得をベースに、伝送路光ファイバの損失、光ファイバ伝播時に受けるファイバの非線形光学効果及び波長分散による波形歪みなどによるペナルティ、ケーブル障害修理によるケーブル割り入れ、機器の経年劣化を考慮して設計されます。無中継光海底ケーブルシステムにおいて、スパン長を延伸するためには、以下のような技術的課題を解決する必要があります。

- ・ 主信号のファイバ入射光パワーの高出力化
- ・ 光ファイバ伝送路内における非線形光学効果（自己位相変調、相互位相変調、四光波混合、誘導ブリルアン散乱）

の低減・回避

- ・ 受信感度の改善
- ・ 光ファイバの損失特性の改善

ここでは、上記課題を克服するための技術について説明します。

(1) 誘導ブリルアン散乱抑圧技術

無中継システムでスパン長を延伸する際、送信パワーを上げることが最も効果的な方法です。しかし、送信パワーを上げる際、その値が一定しきい値を超えると、しきい値を超えた光信号成分のほとんどが送信端方向へ反射され、受信端への到達パワーが飽和してしまう誘導ブリルアン散乱という現象が発生します。このため、一波長当たり+10dBmを超える高出力信号を扱う無中継システムでは、誘導ブリルアン散乱の抑圧が必須となります。この抑圧手段として、信号レーザの光スペクトル線幅を拡大する方法や誘導ブリルアン散乱しきい値の高い変調方式の適用が有効です。例えば、光スペクトル線幅を1GHz程度まで拡大することにより、一波長当たり約+15dBm以上の高出力信号光を光ファイバへ送出することが可能になります。

(2) 変調技術

現在の光海底ケーブルシステムには、変調方式として、光強度に対してデータ変調を施すOn-Off-Keying変調方式のNon-Return-to-Zero (NRZ) とReturn-to-Zero (RZ) が一般的に使用されています。近年、これらの変調方式に加えて、光位相に対してデータ変調を施すDifferential Phase Shift Keying (DPSK) 変調方式が非線形光学効果や波長分散に対する耐力及び受信感度の改善に効果的な方式として着目されており、これにRZ変調方式を組み合わせたRZ-DPSK変調方式の実用化が進められています。具体的には、RZ-DPSK変調方式では、従来のRZ変調方式に比べて約2.5dB程度の受信感度の改善効果が得られます。RZ-DPSK変調方式では、この優れた受信感度特性により、伝送路ファイバへの所要送信光パワーを低減することが可能になります。このため、ハイパワー無中継伝送の課題であった非線形光学効果を低減することが可能となり、無中継システムにおける受信特性を改善することができます。

(3) 分布ラマン増幅及び遠隔励起増幅技術

無中継システムにおいて送信パワーを増加させることなく、受信特性を改善するための有効な手段として、分布ラマン増幅技術及び遠隔励起増幅技術があります。図2に、分布

ラマン増幅及び遠隔励起増幅を適用した無中継伝送システムにおける伝送路ファイバ内での主信号光レベルダイアグラムの概念図を示します。

(a) は、分布ラマン増幅を適用しない場合と適用した場合の比較を表しています。分布ラマン増幅では、受信端から逆方向に1,450nm帯の励起光を送出することにより、伝送路光ファイバ内にラマン増幅利得を誘起し、励起光波長に対して約100nm長波長側の1,550nm帯の主信号光を増幅する方法です。分布ラマン増幅により、受信側付近での信号光レベルの減衰を抑えることができるため、受信特性を大幅に改善することが可能となります。このため、送信パワーの極度の高出力化に伴う非線形光学効果を回避することが可能となり、受信特性を改善することができます。

(b) の遠隔励起増幅は、受信端から数十kmから百km程度離れた位置にEDFを配置し、受信端から1,480nm帯の励起光を送出することにより伝送路内に配置されたEDFを励起して1,550nm帯の主信号光を増幅する方法です。遠隔励起増幅技術により、システムゲインを最大化するためには、受信端からの供給される1,480nm帯の励起光到達パワーと送信端からの主信号のEDF到達パワーのバランスを考慮したEDFの配置が重要となります。遠隔励起増幅も分布ラマン増幅

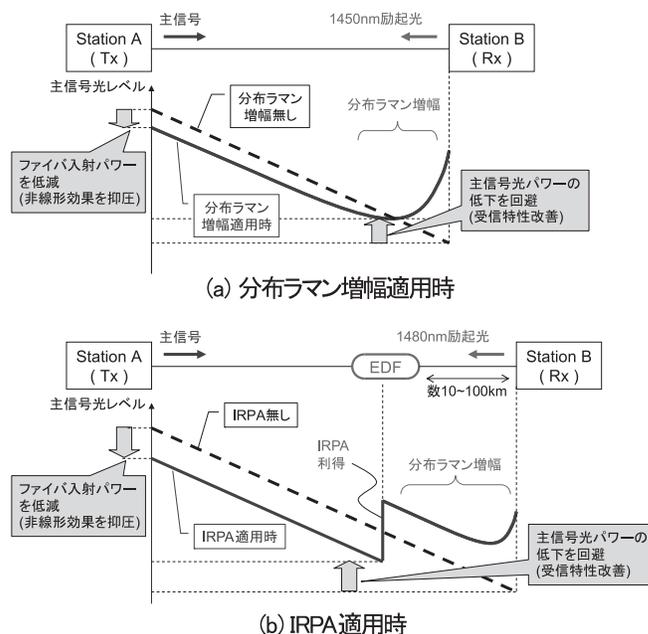


図2 無中継システムの主信号光レベルダイアグラム

と同様の受信特性改善効果が期待できますが、遠隔励起増幅の方が分布ラマン増幅に比べて励起光に対する増幅効率が高いため、スパン長の延伸により大きな効果が期待できます。

4. SLR320SW LTEの特徴

NECの無中継光海底ケーブルシステム向け端局装置SLR320SW LTEは、第3章で紹介した長スパン化のための伝送技術を適用することにより世界最高レベルの長スパン無中継伝送性能を実現しています。SLR320SW LTEは、トランスポンダ部であるSLTM (Submarine Line Terminal Module) とWDM部であるWME (Wavelength Multiplexing Equipment) から

表 SLR320SW LTEの主要諸元

項目	仕様
波長多重数	最大66波長
波長間隔	50GHz, 100GHz
波長帯域	1539.4 ~ 1565.5nm
伝送速度	10.709 Gbps 11.096 Gbps (10GbE)
変復調方式	NRZ, RZ, RZ-DPSK
最大光送信パワー	最大+30dBm
遠隔励起光源	1,000mW以上 (1,450nm/1,480nm帯)
電源電圧	DC -48V
使用環境条件	温度: +5°C~+40°C 湿度: 5%~85%

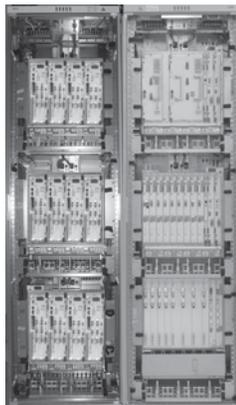


写真 SLR320SW LTEの外観 (左: SLTM, 右: WME)

構成されます。SLR320SW LTEの主要諸元を表に、装置の外観を写真に示します。

(1) SLTM

SLTMラックには、10GbpsトランスポンダであるSLTMを1ラック当たり最大12台まで搭載することができます。SLTMのライン側インタフェースとして、NRZ、RZ、RZ-DPSKの3種類の変調方式をサポートしています。また誤り訂正符号 (FEC) には、接続BCH符号を適用しており、従来のリードソロモン符号と同等の約7%の冗長度を維持したまま、約8.5dBの誤り訂正利得を有する高性能FEC技術を備えています。

(2) WME

WMEは、波長間隔50GHzでの最大66波長まで信号光を波長多重分離する機能を提供します。また、長スパン無中継伝送システムに必要となるシステムゲインを確保するため、最大+30dBmの高出力の光ブースターアンプ機能を備えています。受信部では、ファイバ伝送後の光信号の減衰を補償するためのプリアンプ機能のほか、伝送路ファイバで累積する波長分散の補償も行います。また、300kmを超える長スパン無中継システムの用途として、最大出力1,000mW以上の1,450nmあるいは1,480nm波長帯励起光源を備えており、分布ラマン増幅及び遠隔励起増幅による大幅なシステムゲインの改善を実現しています。

(3) 無中継システムと適用範囲

SLR320SW LTEの伝送容量と適用可能距離を図3に示します。伝送容量により適用可能距離は若干異なりますが、分布ラマン増幅及び遠隔励起増幅を適用しない通常の無中継

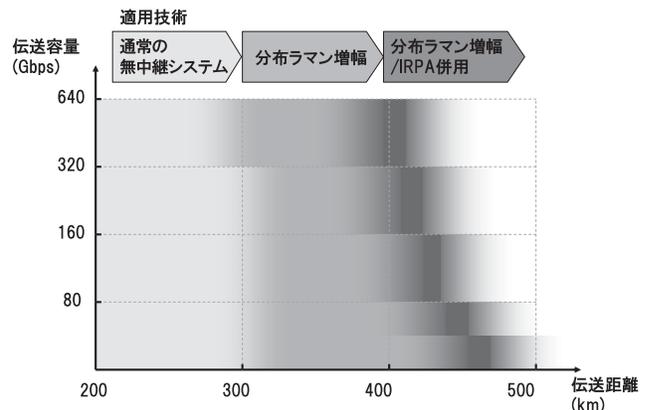


図3 SLR320SW LTEの適用領域

システムの適用距離は約300km、分布ラマン増幅技術を適用した場合は約400km、分布ラマン増幅技術と遠隔励起増幅技術を併用した場合には、400km以上の伝送距離を実現することが可能となります。

5. 大容量化に向けた取り組み

更なる伝送容量増大の要求及び陸上システムの40Gbps導入を背景に、無中継光海底ケーブルシステムの40Gbps化の検討が急速に進められています。以下に、40Gbps無中継光海底ケーブルシステムの実用化に向けて実施した伝送テストベッド評価の一例を紹介します。

(1) 40Gbps-16WDM-320km無中継伝送テストベッド

図4に、43Gbps-16WDM信号を用いた320km無中継伝送評価

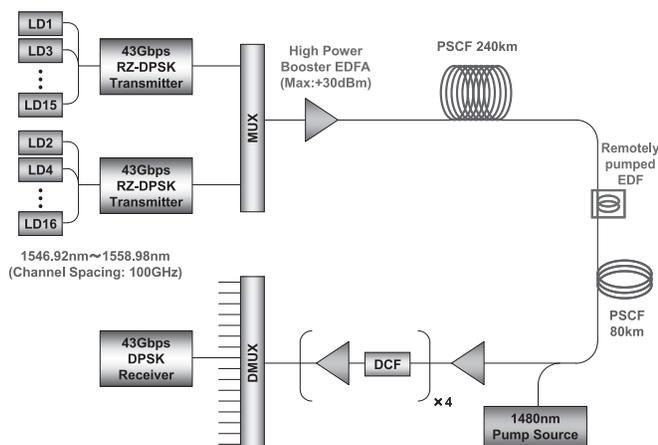


図4 40Gbps無中継伝送テストベッドの構成

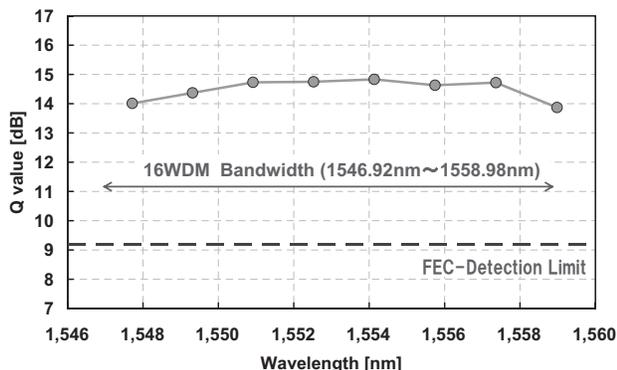


図5 320km伝送後のQ値測定結果

系を示します。送信部では、100GHz間隔で配置した16波長の43GbpsのRZ-DPSK変調信号を使用しています。更に、高出力のブースターEDFAを用いており、WDM信号光を+29dBmまで増幅した後に、伝送路光ファイバへ送出しています。伝送路光ファイバには、320kmの純石英コアファイバ(PSCF)を使用しています。また、伝送路内には、遠隔励起増幅用のEDFを受信端から80km地点に配置しています。受信部には、遠隔励起増幅用EDFを励起するための1,480nm帯光源を配置しています。伝送特性を評価する際には、320km伝送後のWDM信号光に対して受信側で分散補償を行い、光フィルタにより測定波長を抽出し、DPSK受信器により受信します。受信信号のビットエラーレートを測定し、伝送品質の指標の1つであるQ値の評価を行います。

(2) 伝送特性評価結果

図5に320km伝送後のQ値評価結果を示します。320km伝送後においても13.9dB以上の良好なQ値特性が得られています。この結果は、40GbpsトランスポンダのFECの誤り訂正限界であるQリミット9.2dBに対しては、4.7dBというシステム設計上、十分なマージンがあることを示しています。以上の評価により300km以上の長スパン無中継システムにおいて40Gbps技術を適用した大容量化が技術的に実現可能であることを検証しています。

6. むすび

以上、無中継海底ケーブルシステムにおける長スパン化の要素技術と無中継海底端局装置SLR320SW LTEの特徴について紹介しました。また今後の大容量化を目指した40Gbps化への取り組みの一例として、40Gbps-320km無中継伝送検証結果について紹介しました。今後も、本稿で紹介した無中継海底ケーブルシステム伝送技術を発展させ、更なる長スパン化、大容量化のニーズに対応した高性能、高品質、高信頼性を備えた製品、システムを提供し続けていきます。

執筆者プロフィール

稲田 喜久
ブロードバンドネットワーク事業本部
海洋システム事業部
システム開発グループ
主任