特集論文

メトロ・海底ケーブル向け 40Gbs WDMシステム

杉原浩平*　石田和行***
臼井喜宏**
末岡英樹**

40Gbps WDM Systems for Metro and Submarine Cable Networks

Kohei Sugihara, Yoshihiro Usui, Hideki Sueoka, Kazuyuki Ishida

要　旨

大容量コンテンツの急増によって，ネットワークのブロードバンド化が急速に進む中，メトロエリアや国際間の通信需要も指数関数的な増加を遂げている。一方で，通信の大容量化は，局舎におけるネットワーク機器の消費電力急増と実装スペース不足をもたらし，深刻な問題となりつつある。

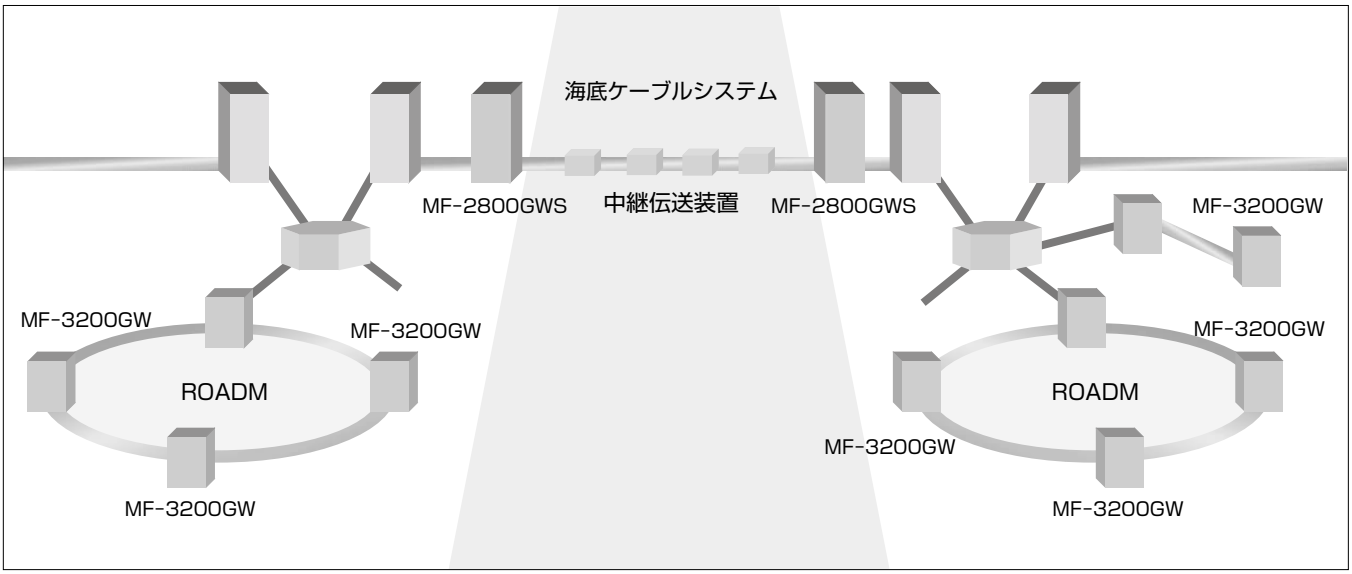
メトロエリア網及び国際通信網を始めとした基幹系ネットワークでは，10Gbps/波の波長多重伝送（WDM：Wavelength Division Multiplexing）が主流であるが，需要に合わせて波長を増やしていく従来の手法では，設計最大波長数を超えると多数の新たな中継伝送装置や合分波装置を導入することが必要になり，消費電力と実装スペースの大幅な増加が避けられない。そのため，伝送速度を40Gbps/波に上げて，導入済みの中継伝送装置や合分波装置をそのまま有効活用できれば，省電力化，省スペース化，大容量化及び低コスト化を両立できるが，40Gbps伝送には多くの技術課題が伴う。三菱電機は予等化技術と非線形抑圧伝送技術を用いて，これらの課題を克服し，10Gbps用に設計されたシステムに40Gbps光信号を伝送することに成功した。

本稿では，第1に，メトロ向け40Gbps WDM／ROADM（Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexing）システム“MF-3200GW”について述べる。予等化技術によって，10Gbps用に設計されたシステムのファイバ，中継伝送装置や合分波装置を変更することなくMF-3200GWに備え，4倍に大容量化できる。

第2に，海底ケーブル向け40Gbps超長距離伝送システム“MF-2800GWS”の概要と特長を述べる。光ファイバ中の非線形光学効果の影響によって生じる信号劣化を抑圧することによって，10Gbps用に導入された海底ケーブルに40Gbps光信号を伝送できる。また，大容量化する海底ケーブルで任意に張られる複数のパスをエンドツーエンドで監視するために，NMS（Network Management System）を導入した。

最後に，さらなるネットワーク機器の省電力化と省スペース化のために開発を進めている，次世代100Gbps伝送システム向けデジタルコヒーレント受信技術と誤り訂正技術について述べる。当社独自のLDPC（Low Density Parity Check Codes）符号とEnhanced FEC（Forward Error Correction）を連接した誤り訂正符号技術は100Gbps伝送のキー技術となりえる。

グローバルネットワークの省電力化と省スペース化に貢献するため，当社は今後も新技術を導入していく。



当社のメトロ・海底ケーブル向け40Gbps WDMシステム

1本の光ファイバに複数の異なる波長の光信号を多重して伝送するため，大容量通信を低コストで実現できる。また，通信需要に応じて波長数を増減することもできる。

*コミュニケーション・ネットワーク製作所（工博）　**同製作所　***情報技術総合研究所

1. まえがき

近年のアクセス系通信ネットワークにおけるブロードバンドサービスの普及やモバイルコンテンツの多様化・高度化に伴い，基幹ネットワークであるメトロネットワークやグローバルな国際通信を担う海底ケーブルでも，通信需要が増え続けている。ネットワーク機器の消費電力の急増や実装スペースの不足が世界的な問題となりつつあり，持続的なネットワークの大容量化には，ビットレートあたりの省電力化と省スペース化が不可欠である。10Gbps向けに設計された既存のWDMシステムに40Gbps光信号を伝送できれば，波長資源を有効活用でき，中継伝送装置や合分波装置の追加が不要であるため，大容量化のみならず，省電力化，省スペース化及び低コスト化も期待される。

本稿では，まず，既存のインフラを活用できるメトロ向け40Gbps WDM／ROADMシステムについて概要と特長を述べる。次に，海底ケーブル向け40Gbps超長距離伝送システムの概要と特長を述べる。最後に，次世代向けに開発中の100Gbps伝送システム技術について述べる。

2. メトロ向け40Gbps WDM／ROADMシステム

メトロ向けネットワークでは，10Gbps/波のWDM／ROADMシステムが広く導入されている。中継伝送装置や合分波装置(以下“共通部装置”という。)を数10kmごとに配置し，通信需要に応じて10Gbps/波のトランスポンダを追加している。しかし，設計最大波長多重数を超えて大容量化するには，新たな光ファイバや共通部装置を追加しなければならない。

トランスポンダのラインレートを40Gbps/波に高速化することによって，共通部装置を追加せずに，ネットワークを4倍に大容量化できる。また，ビットレートが4倍になっても，微細化技術進展の恩恵によって，使用しているデバイスの消費電力は2倍程度に留(とど)まる。したがって，40Gbps化は省電力化に有効と言える。しかし，10Gbps伝送時と同じ共通部装置を用いるには，40Gbps/波のトランスポンダに，高い受信OSNR(Optical Signal to Noise Ratio)耐力が求められる。また，40Gbps伝送には，10Gbpsに比べて4倍のスペクトル線幅を持つため，光信号が合分波装置を多段伝送した際に，光信号スペクトルが削られる効果への耐力(光スペクトル狭窄(きょうさく)化耐力)が1/4になるという課題がある。

これらの課題を解決するため，新技術を採用したWDM／ROADMシステムMF-3200GWの40Gトランスポンダの外観と主要諸元を，それぞれ**図1**と**表1**に示す。MF-3200GWと10Gbpsの伝送速度を持つ従来機種の“MF-800GW”では，共通部が同一である。このため，運用中の主信号に影響を与えることなく，MF-800GWをMF-3200GWにアップデートし，10Gbps光信号と40Gbps光信号を混在伝送することもできる。次に，MF-3200GWの特長を示す。

(1) DQPSK(Differential Quadrature Phase Shift Keying)変復調技術，予等化技術[1]，及び高性能誤り訂正技術によって，40Gbpsで既存の10Gbps光信号と同等の伝送性能を達成

(2) ビットレート当たりの消費電力を伝送条件によって15～50%削減

(3) 19インチラック1架当たり最大3シェルフを，また1シェルフ当たり最大10枚の40Gトランスポンダを実装可能。従来機種比50%の省スペース化を実現

(4) STM(Synchronus Transport Module)-64や10GbE LAN(Local Area Network) PHY(PHYsical layer)等多様なクライアントインタフェースをサポートし，異種インタフェースの混在収容を実現。また，既存トランスポンダとの混載収容を実現

3. 海底ケーブル向け40Gbps超長距離伝送システム

グローバルな国際通信を支える海底ケーブルシステムでも，通信需要が堅調に増加している。このため，新規海底ケーブルシステムが活発に計画・敷設されている。一方，経済性と工期の観点から，既に導入された光ケーブルや海底中継器等の海中設備をそのまま活用し，陸上端局装置のみの追加・交換によって伝送容量を拡大する波長増設にも旺盛(おうせい)な需要がある。当社でも10Gbps DPSK(Differential Phase Shift Keying)変調方式などの採用に

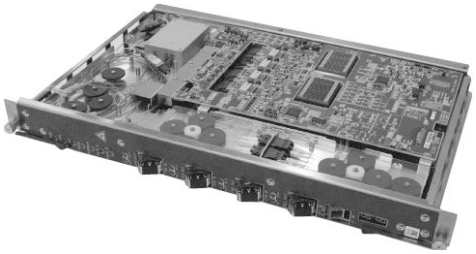


図1．MF-3200GWの40Gトランスポンダ外観

表1．MF-3200GWの主要諸元

項目	諸元
ライン側インタフェース	
伝送速度	40Gbps(Typ)
変調方式	予等化DQPSK
FEC	Ultra FEC
クライアント側インタフェース	
対応インタフェース	STM-64／OC-192 10GbE LAN PHY & WAN PHY×4ch(異種混在収容可)
その他	
電源電圧	DC－48V
動作温度範囲	5～40℃
波長収容数	最大30波@40G TPND/架(3ユニット/架)
ユニットサイズ	528(H)×483(W)×350(D)(mm)

TPND：TransPoNDer
WAN：Wide Area Network

よって陸上端局装置の送受信性能を向上させ，波長間隔の高密度化と通信容量増加を実現している[2]。

40Gbps化は大容量化のみならず，陸上端局装置の省電力化と省スペース化の点でも有効である。しかし，10Gbps光信号と比較して6dB高い受信OSNRを必要とする上，光ファイバ中の非線形光学効果の影響にも敏感であるため，長距離伝送性能の確保が40Gbps化の課題となる。

当社は，この課題を克服するため，新たな変復調技術と高性能誤り訂正技術を採用した40Gbps陸上端局装置MF-2800GWSを開発した。MF-2800GWSには，トランスポンダ以外に，合分波装置や監視システムが備わる。主要諸元と装置の外観を，それぞれ**表2**と**図2**に示す。

陸上端局装置MF-2800GWSは，次の特長を持つ。

(1) 40Gbps光信号の7,000km以上の伝送が可能。非線形効果を有効に抑圧し，**図3**に示す良好な受信波形を実現。周回伝送試験系及び商用海底ケーブルシステムを用いたフィールド試験で実証済み

(2) 4系列の10Gbps光信号を1台の40Gbpsトランスポンダで送受信することによって，10Gbps伝送あたりの消費電力を39%削減

また，システムの大規模化に伴い，多数の波長パスをエンドツーエンドで管理する監視システムが求められている。そこで，MF-2800GWSではNMS(Network Management System)を提供して，各局内でクライアントIF同士を直接接続するDWA(Direct Wavelength Access)パスを管理する機能を追加した。特長は次のとおりである。

(1) 各局内の各種装置を監視するEMS(Element Management System)を集約監視し，最大5,000のDWAパスに対し，エンドツーエンドで構成管理，警報管理や性能管理の機能を提供

(2) 10Gbpsと40Gbpsの混在システムや，複数のケーブル区間を跨(またが)るDWAパス構成も，1つのNMSで統合管理が可能

(3) 利用者の直感的な操作性と容易な保守性を実現して，多数パスを簡便に管理するために，**図4**に示すWebベースのNMSクライアントを提供(縦軸が各DWAパスの名称を，横軸はパスの経路を示している。)

表2．MF-2800GWSの主要諸元

項目	諸元
ライン側インタフェース	
伝送速度	40Gbps(Typ)
FEC	Ultra-FEC
最大波長数	64波(Typ)
波長範囲	1,540～1,560nm(Typ)
クライアント側インタフェース	
対応インタフェース	STM-64／OC-192×4ch 10GbE LAN PHY & WAN PHY×4ch OTU2／OTU2e×4ch
その他	
電源電圧	DC－48V
動作温度範囲	5～40℃
波長収容数	最大18波/架(Typ)
筐体サイズ	1,800(H)×795(W)×600(D)(mm)

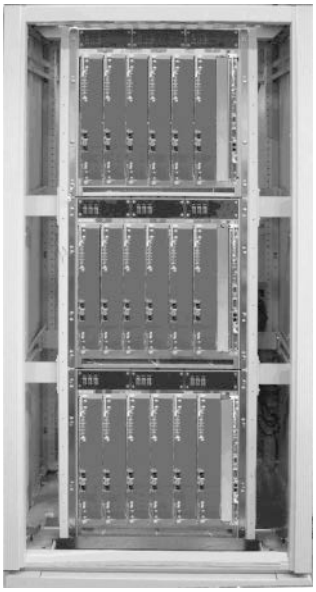


図2．陸上端局装置MF-2800GWSの外観

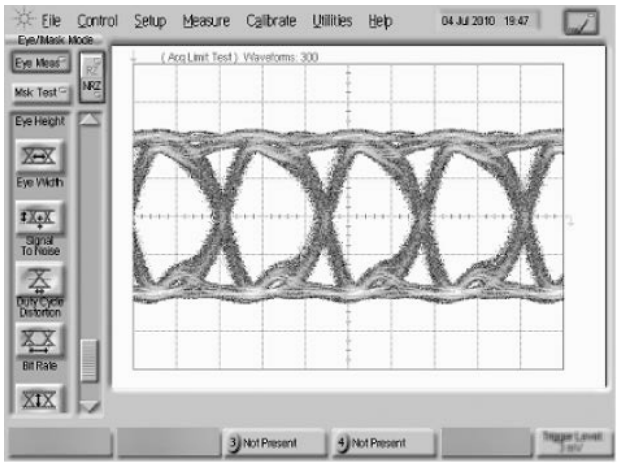


図3．受信波形

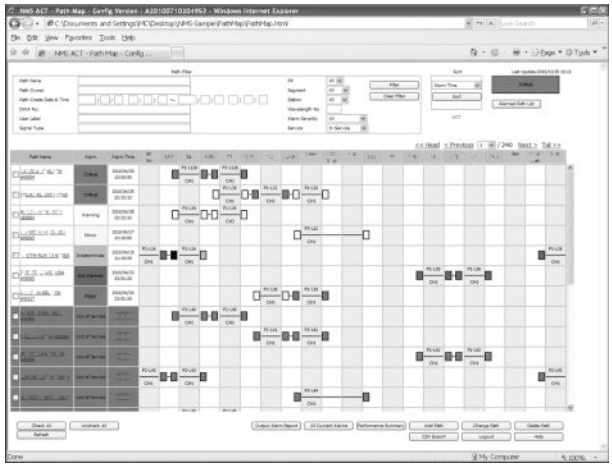


図4．NMSクライアントの表示例

4. 将来への展望

更なるネットワークの大容量化に際しても，ネットワーク機器の省電力化と省スペース化を推進するため，次世代100Gbps伝送システム向けデジタルコヒーレント受信技術と誤り訂正技術を開発している。デジタルコヒーレント受信技術はデジタル信号処理によって受信光信号を復調する方式である。100Gbps伝送システムの実現技術として注目され，既にOIF(Optical Internetworking Forum)で議論がなされている[(3)(4)(5)(6)]。

図5に，機能ブロックを示す。ADC(Analog to Digital Converter)でデジタル化された入力信号は，波形等化，信号再生処理を施された後，誤り訂正される。デジタルコヒーレント受信技術は並列デジタル信号を扱うため，軟判定誤り訂正技術との親和性も高く，LDPC符号等の強力な誤り訂正技術を適用できる。当社では，LDPC符号と従来のRS(Reed-Solomon)符号を連接した誤り訂正符号技術を開発しており，9.0dB(@1E-13)のネット符号化利得を実証した[(7)]。これによって，高雑音下でも優れた訂正能力を発揮できると期待される。

5. む す び

メトロネットワークシステムと海底ケーブルシステムの更なる大容量化と省電力化の両立に向けて，当社が開発したWDM光伝送システムMF-3200GWとMF-2800GWSの概要とその主要技術の特長を述べた。このシステムでは，40Gbps化によって伝送機器を省電力化・省スペース化させながら，大容量化を実現している。また，研究開発中のデジタルコヒーレント受信技術と誤り訂正技術は，次世代装置の100Gbps化とさらなる省電力化に有効と期待されている。

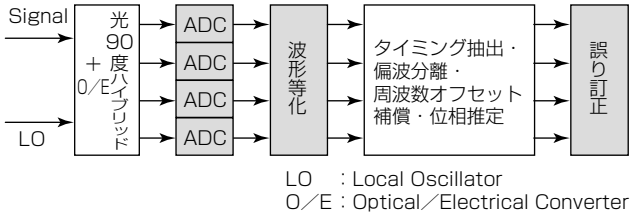


図5．デジタルコヒーレント受信機の機能ブロック

参 考 文 献

(1) Sugihara, T., et al.：43Gb/s DQPSK pre-equalization employing 6-bit, 43GS/s DAC integrated LSI for cascaded ROADM filtering, OFC/NFOEC2010, San Diego, PDPB6 (2010)

(2) 杉原浩平，ほか：長距離大容量光伝送システム，三菱電機技報，**84**，No.8，430～433 (2010)

(3) OIF-FD-100G-DWDM-01.0 100G Ultra Long Haul DWDM Framework Document (2009)

(4) OIF-PMQ-TX-01.0 Implementation Agreement for Integrated Polarization Multiplexed Quadrature Modulated Transmitters (2010)

(5) OIF-DPC-RX-01.0 Implementation Agreement for Integrated Dual Polarization Intradyne Coherent Receivers (2010)

(6) OIF-MSA-100GLH-EM-01.0 Multisource Agreement for 100G Long-Haul DWDM Transmission Module Electromechanical (2010)

(7) Miyata, Y., et al.：A Triple-Concatenated FEC Using Soft-Decision Decoding for 100Gb/s Optical Transmission, OFC/NFOEC2010, OThL3, San Diego (2010)