

山崎 創\* 宇藤健一\*\*  
濱田芳彰\*  
高山\*\*

# 88波×8方路 光クロスコネクシステム

88 - Wavelengths and 8 - degrees Optical Cross Connect Systems

Hajime Yamasaki, Yoshiaki Hamada, Shan Gao, Kenichi Uto

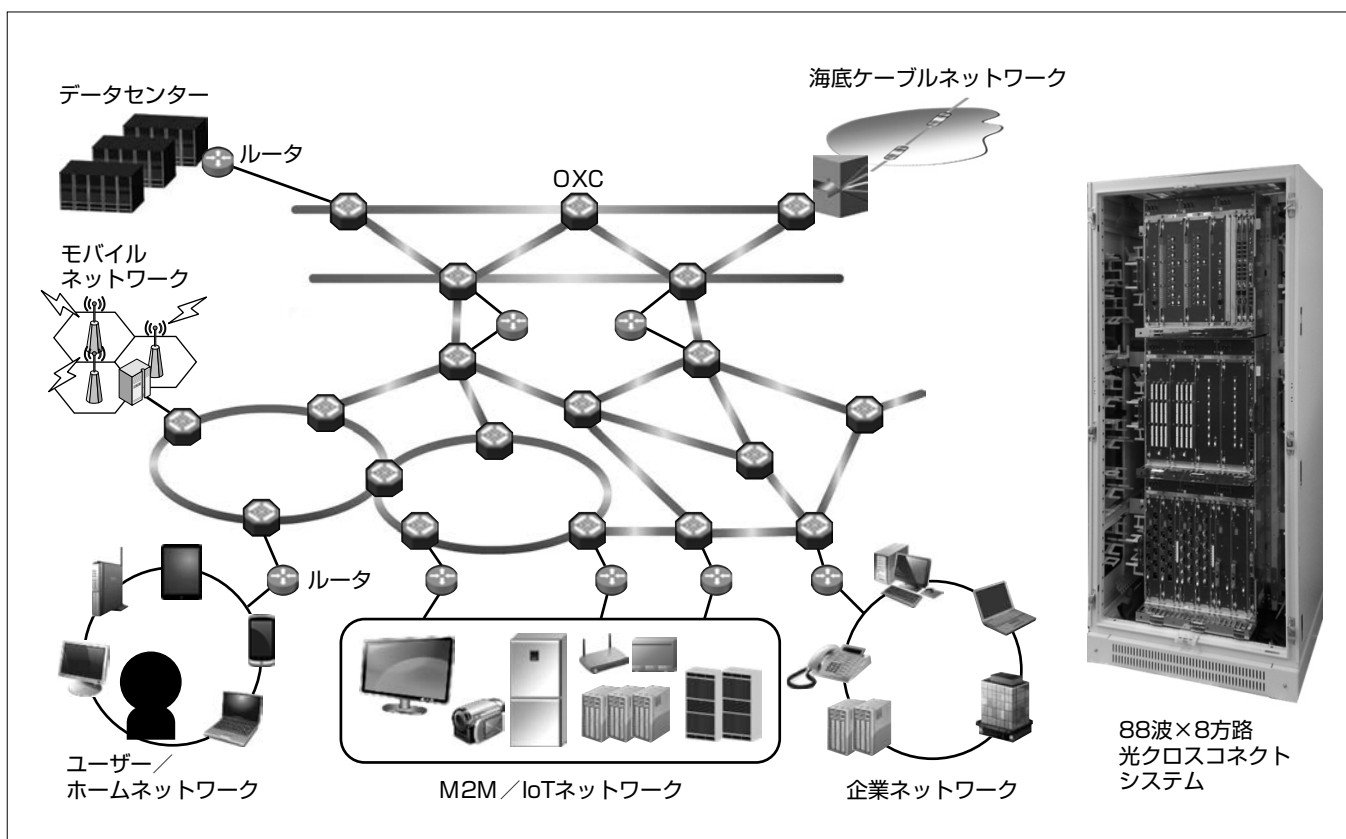
## 要 旨

多様化した携帯型通信端末の複数利用に加えて、M2M (Machine to Machine) / IoT (Internet of Things) ネットワークの導入が進むなど、通信トラフィック需要は継続的に増加している。基幹系ネットワークであるコア・メトロネットワークや海底ケーブルネットワークにおける波長多重伝送システム (Wavelength Division Multiplexing : WDM) では1ファイバ当たりの伝送容量が8 Tbps以上となる大容量化と情報伝達の高信頼化の要求が高まっている。また、大容量化に伴うCAPEX / OPEX (CAPital EXpenditure / OPErating EXpenditure) の増大を抑制する必要がある。これらの要求や課題を解決するため、ネットワークを効率化する多方路化技術及びメッシュ網管理技術が注目されている。

多方路化技術は、波長クロスコネク技術、長距離大容量伝送技術、装置間監視技術によって実現される。これらは情報伝達時の光 / 電気 / 光変換による無駄を抑制し、ネットワークのシンプル化かつ通信設備の高効率運用に寄与する。

メッシュ網管理技術は、多重ルート冗長化技術とレイヤ管理技術によって実現される。震災等のネットワーク多重障害時における遠隔復旧の実現やメッシュ網で複雑化したパスの高度視認性によって、ネットワークの高信頼化、オペレータの負荷の大幅軽減に寄与する。

これらの技術を適用した100Gbps×88波×8方路 光クロスコネクシステム (Optical Cross-Connect : OXC) システムを開発した。今後は400Gbps / 1Tbpsへの高速化と拡張機能の追加によって、超高度情報化社会のネットワーク構築に貢献していく。



## 基幹系ネットワークを支える光クロスコネクシステム

陸上のコア・メトロネットワークから海底ケーブルネットワークに至る基幹系ネットワークの通信トラフィック需要は増加している。光クロスコネクシステムによってWDM (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方式) の高速大容量化と多方路化技術、メッシュ網管理技術によるネットワーク効率化を実現した。今後の通信トラフィック需要増に貢献していく。

### 1. ま え が き

通信トラフィック需要は1.4~1.8倍/年で継続的に増加しており、コア・メトロネットワークの波長多重伝送システム(WDM)では更なる高速大容量化と高信頼化が求められている。一方で、増大し続けるネットワークのCAPEX/OPEXの低減が課題であり、ネットワーク効率化への要求が高まっている。これらの要求に対する最適なソリューションが、1ファイバ当たり8Tbps以上の大容量波長多重伝送を実現するとともに、光スイッチング機能を具備した多方路光クロスコネクシステムである。このシステムの実現には、光信号を直接スイッチングする波長クロスコネク技術、高度な信号劣化抑制性能を備えた長距離大容量伝送技術などの多方路化技術が重要となる。また、メッシュ状に構築されたネットワーク管理を容易にするメッシュ網管理技術やネットワーク多重障害時の迂回(うかい)路確保等で信頼性を確保する多重ルート冗長化技術が必要となる。これらの技術を適用し、拡張性に富んだコア・メトロネットワーク向け88波×8方路光クロスコネク(OXC)システムを開発した。

### 2. 多方路化技術

従来のコア・メトロネットワークでは、2方路波長多重伝送システムによるリング・リニアトポロジーが主流であった。このため、2方路以上の通信経路を構築するには、同一局舎に複数台の波長多重伝送装置の設置が必要であり、装置スペース、供給電力の確保が深刻化している。これらを背景に、多方路光クロスコネクシステムによるメッシュトポロジーへの移行が加速している(図1)。

多方路化には、既存光信号に影響を与えることなく遠隔から波長や方路を設定変更可能な波長クロスコネク技術が必須である。また実運用化に向け、自在なルートでの通信を可能とする長距離大容量伝送技術や、複数のルート経由で装置間の情報授受を実現する装置間監視技術が不可欠となる。

#### 2.1 波長クロスコネク技術

波長クロスコネク技術は、異なる方路同士、又は自局で合分波される波長をシステム側の要求に応じて波長単位や波長群単位で任意の方路に切り替える技術である。一般的に、波長クロスコネクの実現方式には光信号切替方式と光電変換後の電気信号切替方式がある。光信号切替方式では、大規模なM×Nの光メッシュスイッチ

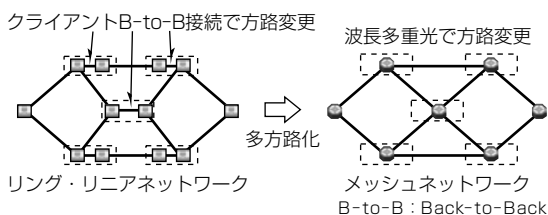


図1. ネットワークの多方路化

を使用したものと小型の波長選択スイッチ(Wavelength Selective Switch : WSS)に代表される光デバイスを組み合わせて実現するものがある。

三菱電機は、WSSを用いて、方路単位での増減設可能な経済的な波長クロスコネク技術を開発した。図2に波長クロスコネク技術を実現した機能構成を示す。波長クロスコネク技術はWSSを搭載したWXC(Wavelength Cross-Connect)機能部で実現される。WXC機能部は方路単位に配備され、それぞれが装置内の光ファイバで接続されることでメッシュスイッチを形成することができる。トラフィック需要に応じて、遠隔から方路切替えが可能であり、かつ切替え対象外への信号品質に影響を与えないため、柔軟なネットワーク構築に貢献できる技術である。キーデバイスであるWSSはポート単位に透過波長を任意に設定することが可能であり、ポート独立性、波長独立性が高いデバイスである。なお、WSSには、将来のフレキシブルグリッドに拡張可能なLCOS(Liquid Crystal On Silicon)素子を適用した。

また、より柔軟なネットワーク構築に適したCDC(Colorless(カラーレス), Directionless(ディレクションレス), Contentionless(コンテンションレス))機能を開発した。従来はパス構築のたびに人手でファイバを再接続して波長や方路を切り替えていたが、CDC機能によって任意のポートにあらかじめファイバを接続しておくだけで全て遠隔から波長や方路を自由に切り替えることができる。また、これらを実現するMUX/DEMUX機能部、MSW機能部を機能ごとに独立した物理構成とすることで、波長及び方路の独立性を高くし、物理的な波長干渉を抑制して自由度を高く保つコンテンションレス技術を開発した。これによって、CDC機能のそれぞれをミニマムコストで実装可能とし、波長・方路増減設時や障害発生時の他方路への主信号影響を抑止可能とした。

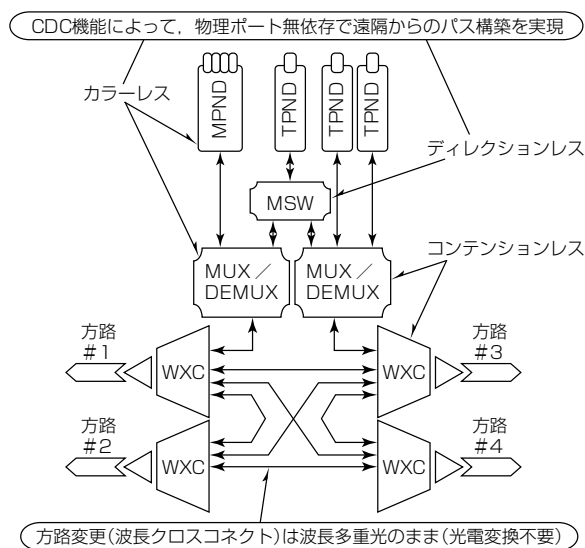


図2. 波長クロスコネク構成

## 2.2 長距離大容量伝送技術

メッシュネットワークでは、光信号の始点から終点まで複数経路が存在し、伝送性能が不足すると光電変換を伴う3R再生中継が必要となり、メッシュネットワークの利点が損なわれてしまう。このため、3R再生中継箇所を削減できる長距離大容量伝送を実現する技術が必須である。特にWDMで100Gbps以上の信号を伝送する場合、ルート内のOXCノードを多段中継した際に生じる光信号帯域の狭窄(きょうさく)化及びOSNR(Optical Signal to Noise Ratio)低下に伴う光信号劣化に対する補償が課題である。当社は、光信号送信スペクトル波形整形技術と誤り訂正技術を開発して長距離大容量伝送を実現した。

光信号帯域の狭窄化による信号劣化を抑圧するため、送信スペクトル波形整形技術を適用した。送信器内部の電気フィルタを用いて光信号の高周波成分を強調することで、OXCノードにおけるスペクトル波形の狭窄化を補償する<sup>(1)</sup>。図3に狭窄化補償有無による多段中継時の伝送性能を示す。伝送速度128Gbps、変調方式DP-QPSK(Dual Polarization Quadrature Shift Keying)の信号を多段中継伝送させた場合の狭窄化補償有無のQ値(信号品質パラメータ)ペナルティを計算した。OXCノード内のWSSの通過帯域は周波数間隔50GHzとした。図3(a)にOXCノード構成、図3(b)に光スペクトル波形を示す。図3(c)に示すとおり、OXCノードの通過段数が増えるに従い狭窄化補償の効果が現れ、通過ノード数10個の場合には0.5dB以上のQ値ペナルティの改善が見込める。

低OSNR条件での光信号受信を可能とするため、誤り訂正技術を適用した。多重空間結合方法を用いた軟判定低密度パリティ検査符号(Low-Density Parity-Check: LDPC)を開発し、硬判定符号を組み合わせた接続符号とすることで、符号化利得12dBとなる高い訂正能力を実現した<sup>(2)</sup>。また、ルート長や伝送路種別に応じた最適な信号速度と訂正能力を選択するため、誤り訂正符号の冗長度を可変とする方式を開発した<sup>(3)</sup>。

## 2.3 装置間監視技術

メッシュ網化に伴い、複数障害発生時にも装置間監視を継続できるネットワーク管理の実現が課題である。装置の外部回線を使用するアウトバンド通信と装置間の空き通信領域を使用するインバンド通信を組み合わせ、それぞれで同報する構成を適用することによってメッシュ網の装置間監視技術を実現した。装置のアウトバンド通信では任意に定義可能なサブネットワークごとにGNE(Gateway Network Element)を2か所設置し、NMS(Network Management System)に対して2経路で同報する構成とした。インバンド通信では装置から各経路に対して同一メッセージを同報し、受信側で重複する通知を削除することでロバストな経路冗長構成とした。これらの構成によって、複数の障害発生時でも光信

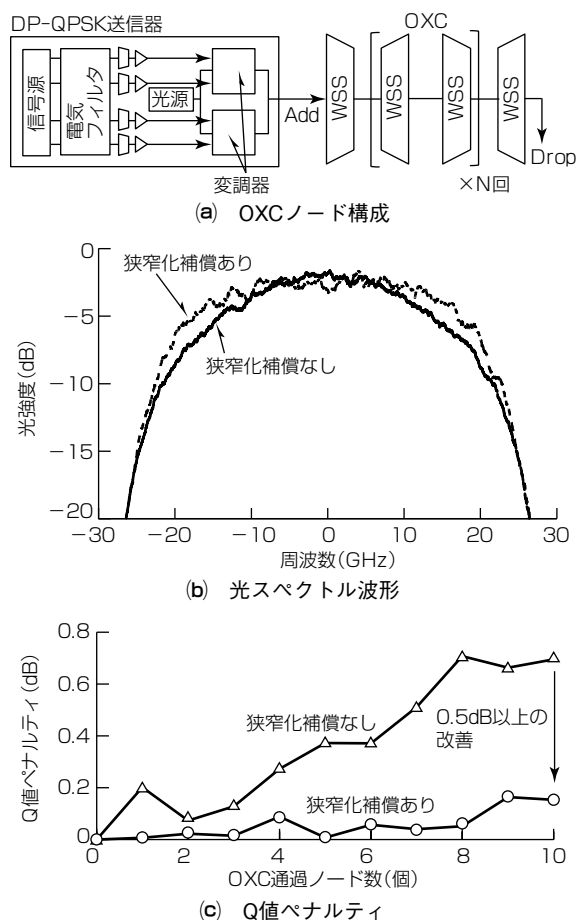


図3. OXCノード多段中継時の伝送性能

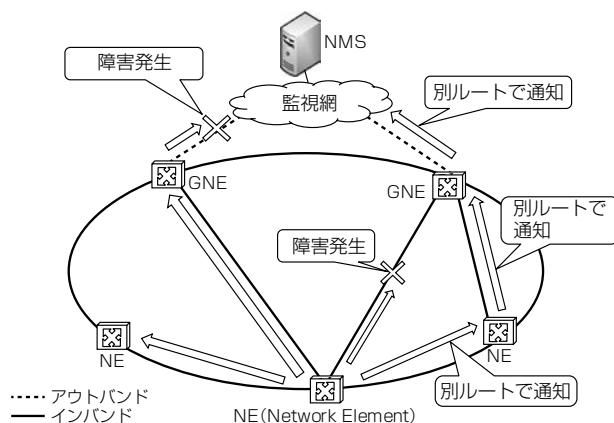


図4. メッシュ監視ネットワーク

号の監視制御に影響を与えることなく、継続管理可能な装置監視を実現した(図4)。

## 3. メッシュ網管理技術

従来のリングトポロジーでは1+1プロテクションによる冗長構成で信頼性を確保していた。また、ネットワークと装置の監視制御を行うNMSはリングごとに独立したネットワークに適した分散監視型であった。一方、メッシュトポロジーでは多数のルート構成が構築可能なため、多重ルート冗長化技術によって多重障害時のサービス継続

が可能となる。また、シームレス接続に伴うネットワークの複雑化に伴い、オペレータの保守運用作業を軽減するレイヤ管理技術が重要となる。

### 3.1 多重ルート冗長化技術

予備ルートのリソースを共有する波長レストレーション技術と1+1プロテクション技術の組合せによって、信頼性と経済性を両立させた多重ルート冗長化技術を実現した。

#### 3.1.1 波長レストレーション技術

波長レストレーション機能を図5に示す。波長レストレーション機能として事前予約型に対応した。事前予約型では、現用ルートの光パスに対してあらかじめ迂回ルートと迂回波長をNMSに登録しておき、障害発生時に登録した迂回ルートで予備の光パスを確立し、現用ルートの光パスを切り替える。現用ルートの光パスに対して、複数の予備ルートの光パスを登録することで、多重障害発生時での信号復旧を可能とした。また、事前予約型の波長レストレーション機能では、現用ルートの光パスで障害検出した後にシグナリングを行い、予備ルートの光パスを設定する。そのため、複数の現用ルートの光パスに対して予備ルートのリソース共用化が可能であり、波長資源の高効率活用を実現した。波長レストレーション技術によって、単一障害発生時には100%復旧可能である。

#### 3.1.2 3ルートプロテクション技術

1+1プロテクションと事前予約型の波長レストレーションを組み合わせることで3ルートプロテクション技術を実現した。図6に光パスの3ルートプロテクションを示す。1+1プロテクションの現用ルートの光パス及び予備ルートの光パスに対して、それぞれ複数の迂回ルートを経由してNMSに事前登録しておく。現用ルートの光パス又は予備ルートの光パスで障害発生した場合には、1+1プロテクションで自動的に光パスを切り替える。事前登録済みの迂回ルートが波長レストレーションで新たな予備ルートの光パスとして確立される。そのため、多重障害発生時でも常時1+1プロテクションを維持することを可能にした。

### 3.2 レイヤ管理技術

NMSの拡張性や可用性を備え、オペレータの保守運用を容易にするレイヤ管理技術を実現した。

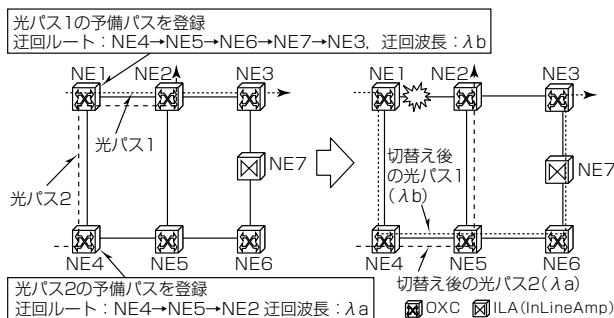


図5. 波長レストレーション機能

#### 3.2.1 拡張性

従来のリングネットワークと異なり、メッシュネットワークではネットワークと装置の監視制御を行うNMSの拡張性及び監視ネットワークの大規模化の実現が課題である。リングネットワークでは、NMSは各リングを独立したネットワークとみなして分散監視していた。一方、メッシュネットワークではネットワーク内の接続に切れ目がなく収容装置数が増えた場合にもシームレスな監視が必須となった。そこで、ネットワーク管理機能を受け持つメインサーバと装置管理を受け持つサブサーバの2つの部位にNMSを機能分割した。図7にNMSサーバの構成を示す。この構成を適用することによって収容装置数が増えた場合にはサブサーバを増加させることでメインサーバによるシームレスなネットワーク管理を可能とし、メッシュネットワークにおける大規模監視を実現した。

#### 3.2.2 高信頼性

大規模ネットワークを監視するNMSでは、サーバ障害が発生した場合でも常時運用継続が不可欠である。高い可用性を実現するため、ホットスタンバイ方式での冗長システムを開発した。ホットスタンバイ方式のため、片系で障害が発生した場合でも監視断状態は発生することなく常に監視継続可能である。また、大規模災害時に対応できるようサーバの異ロケーション設置が可能なシステム構成とした。さらに片系障害発生時のオペレータ作業を軽減するた

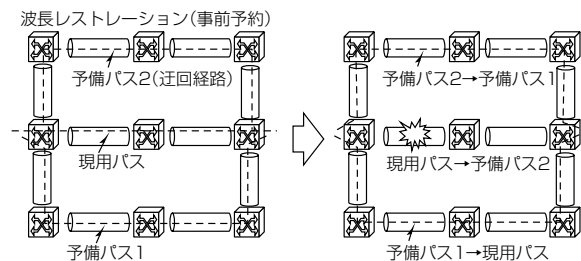


図6. 光パスの3ルートプロテクション

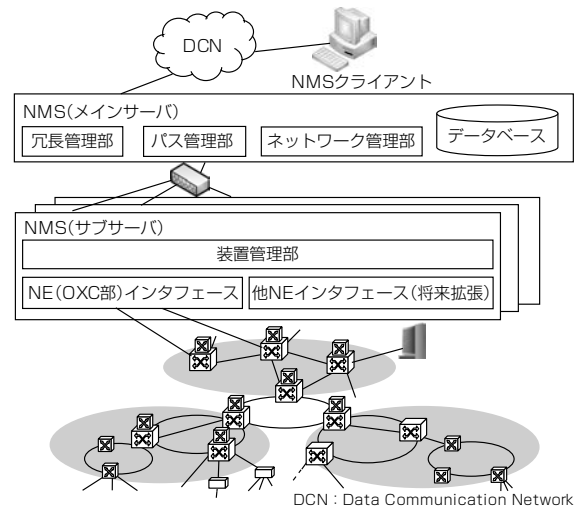


図7. NMSサーバの構成

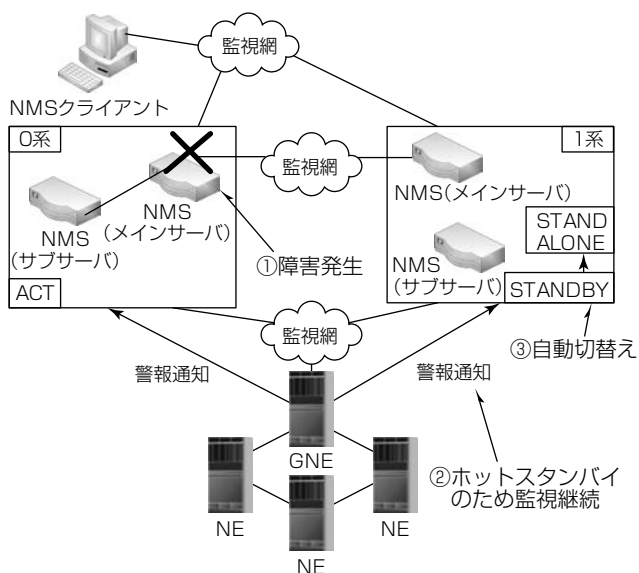


図8. NMSサーバ冗長切替え

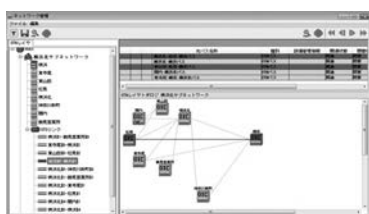


図9. サブネットワーク管理画面例

め、稼働モードの自動切替え機能を実装した。自動切替え機能は通常時に0系ACT, 1系STANDBYの稼働モードで両系サーバがデータ整合して動作する。0系障害発生時に1系STANDBYからSTANDALONE(単独運用)に自動的に移行する。この機能によって運用を継続し、障害による影響を最小化した(図8)。

### 3.2.3 操作性

管理ネットワークの複雑化に伴い、オペレータの負荷軽減が必須である。オペレータが直感的に操作できるユーザーフレンドリーなGUI(Graphical User Interface)をコンセプトとしてNMSクライアントを開発した。図9に主要画面例としてネットワーク管理画面を示す。ネットワーク管理画面はネットワークを構成する装置及びそのネットワークを経由する光パスを一元管理する。障害発生時は関連する装置や光パスが警報色(赤色)表示となり、オペレータが一目で障害状況を確認可能である。また、全てのオペレーションはネットワーク管理画面から起動でき、光パスに関してはE2E(End-to-End)での制御をワンクリックで実施可能である。NMSではネットワーク管理だけでなくEMS(Equipment Management System)の機能である装置制御も取り込むことで一元的な操作を実現した。

## 4. 将来技術

400Gbps/1Tbps伝送への高速大容量化を実現する

ため、フレキシブルグリッド機能, DP-16QAM(Dual Polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation)変調, マルチサブキャリア伝送技術を用いた信号伝送方式の開発に取り組んでいる(4)。また, 所要帯域と伝送距離を考慮し, 最適変調方式・周波数グリッド構成を導出して最適な光パス経路を算出するPCE(Path Computation Element)(5)機能によって高効率収容可能なOXCを実現する。

将来的にはSDN(Software Defined Networking), オーケストレータ機能によるIP等を含めたトランスポート網のレイヤ統合監視制御に向け, 上位管理装置との管理インタフェースを拡充する。さらに, レイヤ統合ネットワークで複数レイヤを跨(また)がった最適な障害復旧を実現するためのPCE機能のオンライン化, トランスポートSDNのユースケース議論や相互接続に向けた議論を推進している(6)。

## 5. むすび

88波×8方路光クロスコネクシステムで多方路化技術を実現する波長クロスコネク技術, 長距離大容量伝送技術と装置間監視技術及びメッシュ網管理技術を実現する多重ルート冗長化技術とレイヤ管理技術を述べた。これらの技術がコア・メトロネットワークの高速大容量化と高信頼化につながり, CAPEX/OPEX低減に寄与することを期待する。

この開発成果の一部は, 独立行政法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究“光トランスパアレント伝送技術の研究開発(λリーチ)”から得られたものである。

## 参考文献

- (1) 佐野勇人, ほか: ROADMシステムにおける非ナイキスト型LPFを用いたサブキャリア多重の検討, 電子情報通信学会ソサエティ大会, B-10-48 (2015)
- (2) Sugihara, K., et al.: MSSC-LDPC: Multiple-Structured Spatially-Coupled type LDPC, OFC/NFOEC 2013, OM2B.4 (2013)
- (3) 杉原堅也, ほか: 高速光通信用FECのパンクチャによる冗長度可変方式, 電子情報通信学会, B-10-85(2013)
- (4) 野口由比多, ほか: 偏波多重16QAM信号に対するサブキャリア多重時の光スペクトル整形に関する検討, 第29回OCSシンポジウム, P-8 (2015)
- (5) 堀内栄一, ほか: フォトニックネットワークのネットワーク制御と運用管理, 電子情報通信学会技術研究報告, 111, No.475, PN2011-92, 61~66 (2012)
- (6) 三菱電機ニュースリリース 2015年4月20日: 世界初, 複数の異なる光トランスポートネットワークを相互接続し, マルチSDNコントローラにより全国規模でのフロー/パス設定に成功  
http://www.mitsubishielectric.co.jp/news/2015/0420.pdf