HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	波長多重光トランスポートシステムにおける長距離、高速大容量伝送に関する研究
Author(s)	前田, 英樹
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14121号
Issue Date	2020-03-25
DOI	https://doi.org/10.14943/doctoral.k14121
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78225
Type	doctoral thesis
File Information	Hideki_Maeda.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

博士学位論文

波長多重光トランスポートシステムにおける長距離、高速大容量伝送に関する研究

Study on long-distance, high-speed and large-capacity transmission in wavelength-division multiplexing optical transport systems

北海道大学大学院 情報科学院

メディアネットワークコース　ユビキタスネットワーク学講座

2020 年3 月

前田　英樹

学位論文　波長多重光トランスポートシステムにおける
長距離、高速大容量伝送に関する研究
(Study on long-distance, high-speed and large-capacity transmission in wavelength-division multiplexing optical transport systems)

目次

第 1 章　序論 4

1.1　背景 4

1.2　WDM 光トランスポートシステムにおける長距離、大容量化の課題 ..8

1.3　本研究の狙い・意義と本論文の構成 11

参考文献 14

第 2 章　光増幅中継伝送網における長距離、高速大容量伝送技術..... 16

2.1　概要 16

2.2　長距離光増幅中継伝送網における信号波形最適化 17

2.3　Beyond 100 G 光伝送の方向性について..... 24

2.4　100 Gbp と 400Gbps 信号との混在 WDM 光伝送実験 27

2.4.1 新規デジタルコヒーレント光伝送方式 29

2.5　長距離 400 GbpsWDM 光伝送実験..... 36

2.6　まとめ 40

参考文献 41

第 3 章　超高速 400Gbps/λ 光増幅中継伝送技術 44

3.1　概要 44

3.2　400Gbps/λ 1,000km WDM 光伝送実験 45

3.2.1 高ボーレートデジタルコヒーレント光伝送方式およびデバイス周波数特性補正技術 47

3.2.2 高出力ラマン光増幅技術 48

3.3　400Gbps/λ 2,000km WDM 光伝送実験 52

3.4　まとめ 55

参考文献 57

第 4 章　WDM 光トランスポートシステムの光合分波器および光監視信号による伝送特性劣化とその抑圧技術 59

4.1　概要 59

4.2　WDM 光トランスポートシステムにおける光合分波フィルタによる伝送特性劣化 60

4.3　広いフラットな信号通過帯域を有する光合分波技術 68

4.3.1 提案方式の概要 68

4.3.2 提案方式を用いた長距離 WDM 光伝送実験 72
4.3.3 実験結果 74
4.3.4 光合分波器の波長分散による伝送特性劣化 79
4.4 WDM 光伝送システムにおける光監視信号による伝送特性劣化 . 88
4.4.1 光監視信号による伝送特性劣化とその抑圧技術 88
4.4.2 実験、シミュレーションによる検証 90
4.5 まとめ 94
参考文献 96
第 5 章 総括 101
謝辞 105
研究業績リスト 106

第1章　序論

1.1 背景

インターネットをはじめとする様々なデータ流通を支える情報通信基盤インフラにおいて、光トランスポートシステムは、近年の通信トラヒックの急激な需要増加に伴い、今後更なる大容量化と高機能化が求められている。総務省が示す統計によれば、日本における通信トラヒックは年々増加しており、2019年5月時点の国内ブロードバンドのインターネットトラヒックは前年比で約20%増加している（図1.1(a)）[1]。また、スマー トフォンなどのモバイル端末の普及によるモバイルトラヒックの増加が世界的にも顕著であり、2017年から2022年の年平均成長率は40%と予測されている[2]。今後の第5世代移動通信システム(5G)の商用化後は、さらなる通信トラヒック増加が見込まれる。加えて、ウェアラブル端末やビッグデータ、4K/8Kの超高精細テレビ／ビデオを通じたコンテンツ配信、IoT(Internet of Things)の普及が今後更に加速的に増加していくことが想定され、インターネットを流通する通信トラヒックは爆発的に増大することが予想される。

通信キャリアにおいては急増する通信トラヒックに対応し、より安価で付加価値のある通信サービスを提供するため、通信インフラの設備コスト低減、ならびに通信設備の大容量化が求められている。

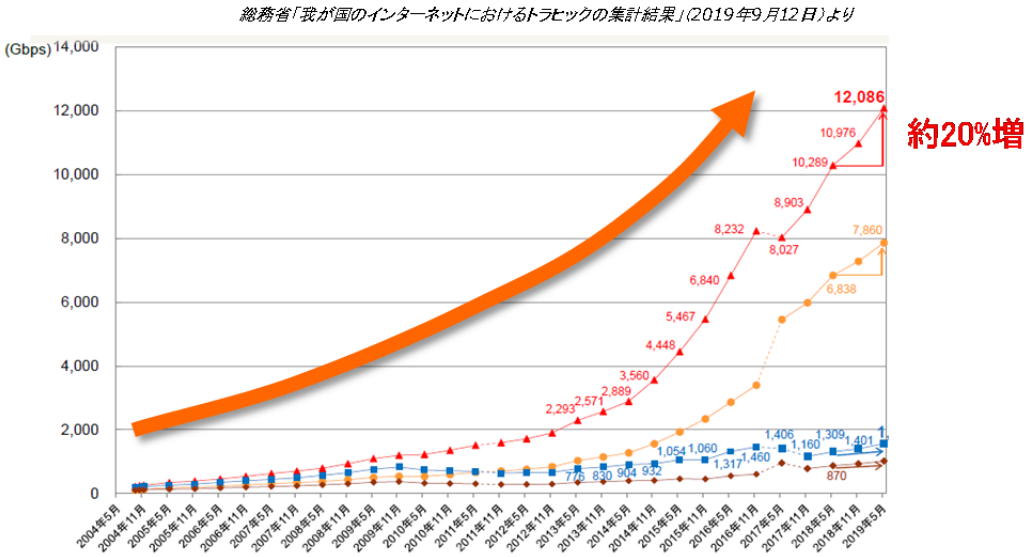


図 1.1: トラヒック動向

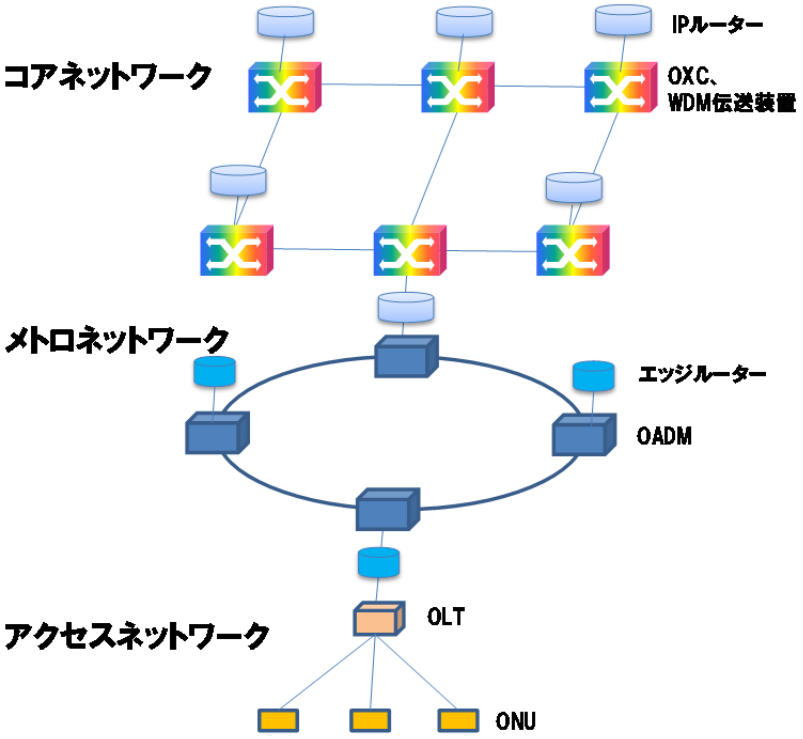


図 1.2: 通信インフラの構成

通信インフラは、図1.2に示しようにアクセス網、メトロネットワーク、コアネットワークに大別することが出来る。アクセス網は、加入者と通信キャリアの通信網を接続し、メトロネットワークは加入者トラヒックを集約し、コアネットワークに転送する。コアネットワークは、東京から大阪などの拠点間のトラヒックを中継する役割を果たす。メトロネットワークとコアネットワークにおいては、一本の光ファイバに複数の波長を多重化する波長多重(Wavelength Division Multiplexing, WDM)光伝送システム、ならびに光信号の方路切替を行う光クロスコネクト(Optical Cross Connect, OXC)、光信号の分岐・挿入を行う光分岐挿入装置(Optical Add/Drop Multiplexer, OADM)が導入され、これらは光トランスポートシステムと呼ばれ、光パスを切替、および分岐挿入すことを可能とする光トランスポートネットワークを実現している。

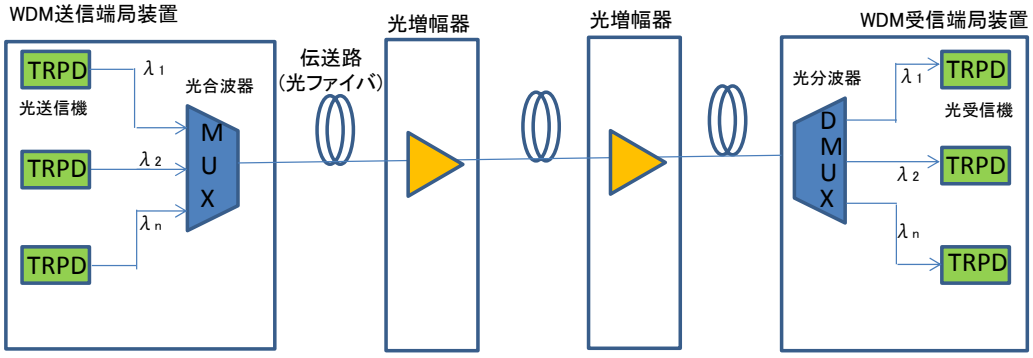


図 1.3: 波長多重光伝送システム

特に、中継網の通信システムは、アクセス網からのトラヒックが集約されることから長距離大容量な通信伝送システムが求められ、図1.3に示す光ファイバを伝送路に用いたWDM光伝送システムが2000年頃から実用化され、現在、OXC機能を有する1波長当たり100 Gbps × 80 波長の伝送容量8TbpsのWDM光トランスポート(100G光トランスポートシステム:100G-PTS)が2013年から中継網にて商用運用されている[3]。WDM光伝送システムは、異なる光信号波長を送受信する複数のトランスポンダ(TRPD)と、AWG(アレイ導波路回折格子、Arrayed waveguide gratings)等の光合分波器、光ファイバ伝送路、光増幅器から構成される。複数の光波長信号を1本の光ファイバにて、電気変化することなく、長距離光伝送することが可能である。図1.2の中継網において、

OXCは、図1.5に示すようにAWG等の光合分波器と、光スイッチから構成され、入力された光信号の方路を光スイッチにより設定でき、光信号を柔軟に様々な対地に伝送することが可能となる[4]。

WDM光伝送システムは、トラック需要に対応するために、光伝送の容量を飛躍的に高める新技術が実用化されてきた。図1.5に、NTTにおける大容量光トランスポートシステムの研究開発動向を示す[5]。TDM(時分割多重化、Time Division Multiplexing)技術による高速化、WDM技術、光増幅技術による大容量、長距離化、上述の100G-PTSには、デジタルコヒーレント光伝送技術[6]が適用され、従来の光の強度変調で通信を行っていたのに対し、光の位相かつ光の偏波も多重して送受信できる点が大きく異なり、1波長当たり100Gbpsの光伝送を実現している。年率20%増のトラヒック増加に対応するため、100Gbpsを超えるByond 100G光伝送技術を確立し、伝送容量16Tbps以上のシステムが求められている。

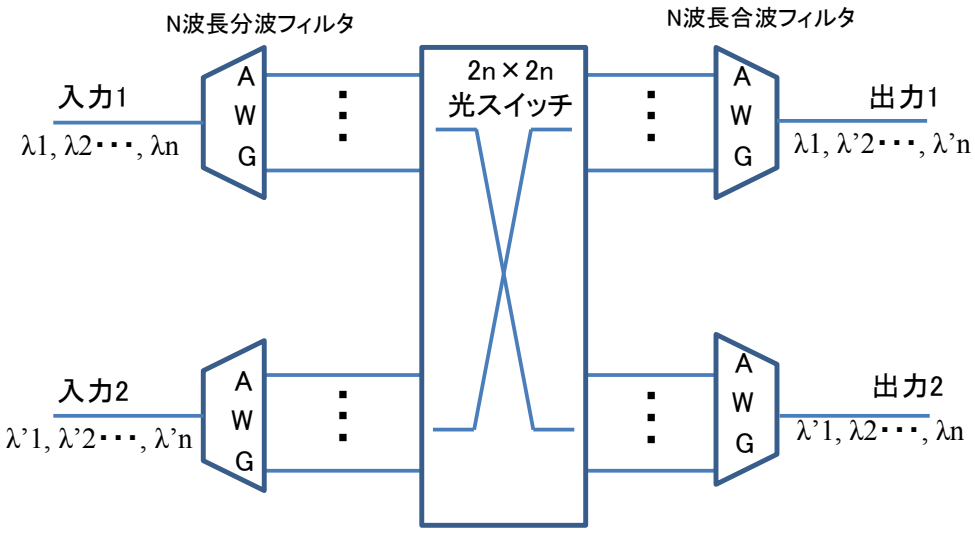


図 1.4: 2×2 OXC の基本構成

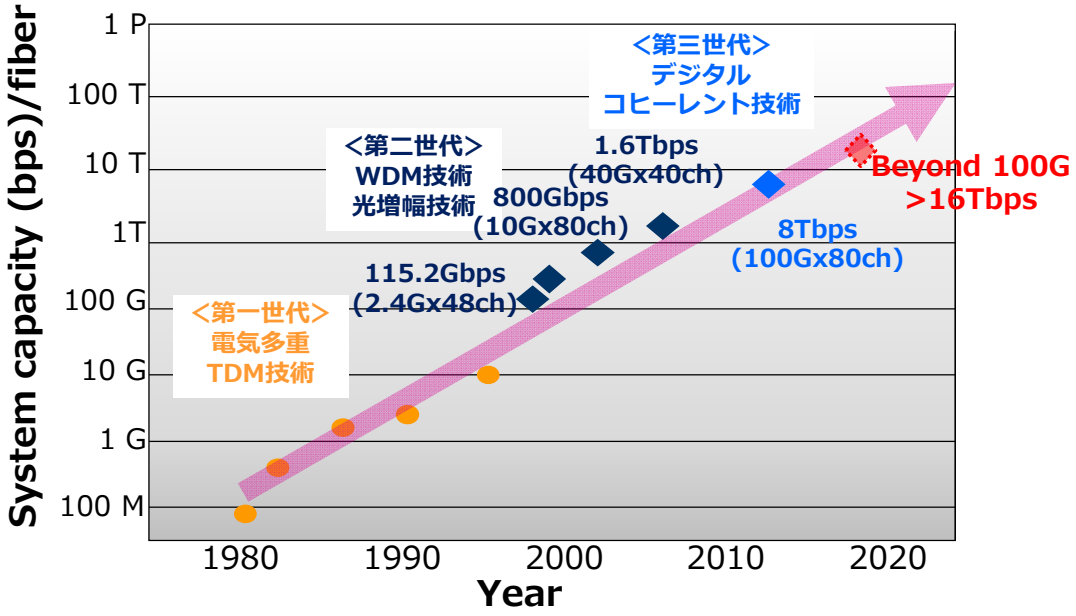
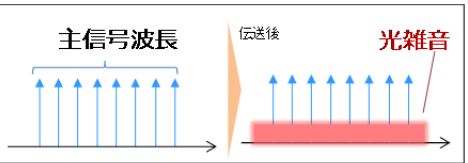
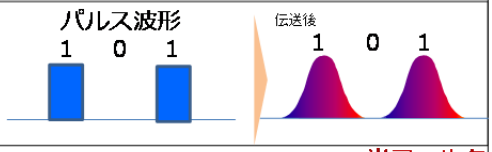
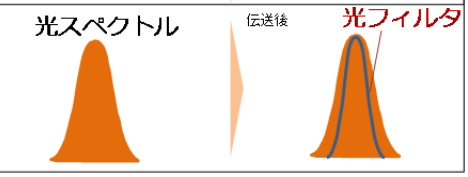


図 1.5: 大容量光トランスポートシステムの研究開発動向

1.2 WDM 光トランスポートシステムにおける長距離、大容量化の課題

本節では、WDM光トランスポートシステムにおける長距離、大容量化の課題について説明する。今後の急激なトラヒック需要に対応するために、1波長当たり100Gbpsを超える長距離Byond 100Gシステムの実現のためには、WDM光伝送における主な信号品質劣化となる表1.1に示す課題について克服する必要がある。

表 1.1: WDM 光トランスポートシステムにおける主な信号品質劣化

■光増幅器雑音 光増幅器で発生するASEノイズが光信号に付加され、信号品質が劣化する。	
■非線形光学効果 光信号の強度に応じて、光ファイバの屈折率が変化し、光信号波形が劣化する。	
■光合分波器での光フィルタリング OXC、OADMの光合分波器の光フィルタにより光信号スペクトルが狭窄化され、信号品質が劣化する。	

(1)光増幅器雑音

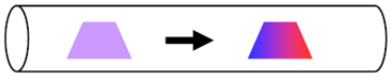
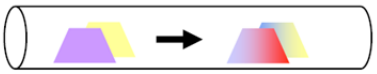
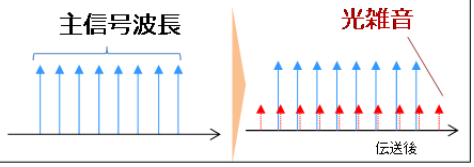
光増幅器で発生する自然放出光(ASE: Amplified Spontaneous Emission)雑音音[7]が光信号に付加されることにより、伝送品質が劣化する。これは光信号が雑音に埋もれてしまうためであり、その度合いは一般に信号パワーと雑音パワーの比である信号対雑音比(SNR: Signal to Noise Ratio)で表される。多中継伝送で用いられる EDFA では、発生する雑音量は光増幅器の利得、すなわち光ファイバ損失に比例する。したがって、その損失値が大きいほど雑音量が増加し、特に多中継時には、光増幅器が多段に接続されることから雑音が累積されることとなる。したがって、SNR の観点からは、ASE 雑音の影響を低減するため、信号光パワーをできるだけ大きくすることが望ましいことになる。

(2)非線形光学効果

表1.2に示す光ファイバの非線形光学効果[8]は、光の強度に比例して、光ファイバの屈折率が変化する現象である。この現象は、Kerr効果と呼ばれ、信号光パワーが大きい場合に顕著に現れ、様々な影響を引き起こす。まず、信

号光が自分の強度変化により周波数変動を受けてしまう。この効果を自己位相変調（SPM: Self Phase Modulation）[8]という。SPM は、光パルスの立ち上がり、立ち下がりの周波数変動と重畳して、波長分散を通して波形劣化を引き起こすこととなる[9]。さらに WDM 化した場合には、他のチャネルの強度変化により、同様に周波数変動を受けてしまう。この効果を相互位相変調（XPM: Cross Phase Modulation）[8]といい、同様に波長分散を通して波形劣化を引き起こす。 また、WDM 伝送時には、周波数の異なる 3 つの信号光から、新たに別の周波数の光が発生する、四光波混合（FWM: Four-Wave Mixing）[8]という現象が生じ、伝送特性を劣化させる。

表 1.2: 光ファイバにおける光線形光学効果

■自己位相変調(SPM) 自身の光信号の光強度に依存した 位相変調がかかり波形が歪む	
■相互位相変調(XPM) 他の光信号の光強度に依存した 位相変調がかかり波形が歪む	
■四光波混合(FWM) 2つ以上の信号光によって 別の波長の光が生じて雑音になる	

(3)光合分波器での光フィルタリング

WDM光伝送システム、OXC、OADMには、光合分波器が必須となる。光信号の合波および分波は、光フィルタである波長合分波器を介して行うため、その際に劣化が発生する可能性がある。例えば、信号スペクトル幅に比べて狭い透過帯域の光フィルタを使用した場合、あるいは光源の波長安定度が悪い場合には、信号成分が光フィルタにより除去されることにより、波形歪をもたらすこととなる。また、波長合分波器の不完全性に起因して、隣接チャネルから

強い光が漏れこむと、クロストークとなり、伝送劣化をもたらす可能性もある。これは、特に高密度化する際には影響が大きくなると考えられる。

他、WDM伝送における信号品質劣化要因としては、光送受信機の熱雑音等の回路雑音、光フィイバーのレイリー散乱等が考えられるが、これらは、上記に比べて影響が小さい。

1.3 本研究の狙い・意義と本論文の構成

通信トラヒックは、現在、年率約20%で増加しており、トラヒックの増加に対応するためメトロネットワーク、コアネットワークにおいて経済的な光トランスポートシステムの研究開発を進めてきた。今後の5G商用化後は、さらなるトラヒック増加が見込まれる。このトラヒックの増加に対応するために、1波長当たり100GbpsのWDM光伝送システムが2013年からコアネットワークに導入され商用運用されている。今後、さらなる大容量化に対応するためには、既存100 Gbps伝送システムの増設等の設備の増強が必要となるが、ネットワークコストの増加、電力消費の増加、さらには、設備数増加に伴う故障数の増加等によるサービスの信頼性低下が問題となる。このため、WDM光伝送システムにおける長距離、大容量化の課題を克服し、既存光ファイバにも適用可能な1波長当たり100 Gbpsを超えるBeyond 100G大容量伝送技術を確立する必要がある。また、トラヒックの変動に応じ動的に波長の分岐・挿入、方路の切替を行うためにOXC、OADMが用いられる。これらは、光合分波器を用いており、その光フィルタ特性によりWDM信号の特性を劣化させる。本研究では、波長多重光伝送技術を適用した光トランスポートシステムにおける長距離、高速大容量伝送技術として、Beyond 100Gを実現する要素技術とWDM光伝送方式を確立するとともに、光合分波器、光監視信号による伝送特性劣化を評価し、その劣化抑圧技術を確立することを目指す。

本論文は、全5章で構成される。構成図を図1.6に示す。

第 1 章では、研究背景と本論文の位置づけ、および課題について述べる。

第 2 章では、光増幅中継伝送系における長距離、高速大容量化技術として、信号波形最適化技術、および、新規デジタルコヒーレン光伝送技術とマル

チキャリア光伝送方式を用いた高速大容量WDM光伝送方式について提案する。信号波形最適化技術は、10Gbpsの2値の強度変調方式を用いた場合における信号波形のデューティーファクタによる伝送特性依存性を明らかにし、長距離伝送において最適なデューティーファクタを明らかにする。新規デジタルコヒーレント光伝送技術は、光ファイバの非線形光学効果による波形劣化を低減する機能と高性能な符号誤り訂正機能を有し、従来のデジタルコヒーレント技術よりも優れていることを明らかにする。試作したトランスポンダを用いてマルチキャリア400Gbps長距離伝送実験を行い、その実現性を実証する。

第 3 章では、超高速400Gbps/λ光増幅中継伝送技術として、高ボーレートデジタルコヒーレント光伝送方式、デバイス特性補正技術、および高出力ラマン光増幅技術を用いた超高速大容量WDM光伝送方式について提案する。試作したトランスポンダを用いて400Gbps/carrier長距離波長多重光伝送実験を行い、その実現性を評価する。

第 4 章では、WDM光トランスポートシステムにおいて、OXC、OADMの光合分波器による伝送特性劣化のメカニズムを解明するとともに、伝送特性劣化を改善する新規の光合分波器を用いたOXCについて提案する。さらに、長距離WDM光伝送実験により、提案のOXCの効果を実証する。さらに、光監視信号によるWDM主信号に与える影響を実験ならびにシミュレーションにより評価し、光監視信号の信号パターン依存性があることを明らかにすることでシステム設計指針について言及する。

第 5 章で本論文を総括し、今後の展開についてまとめる。

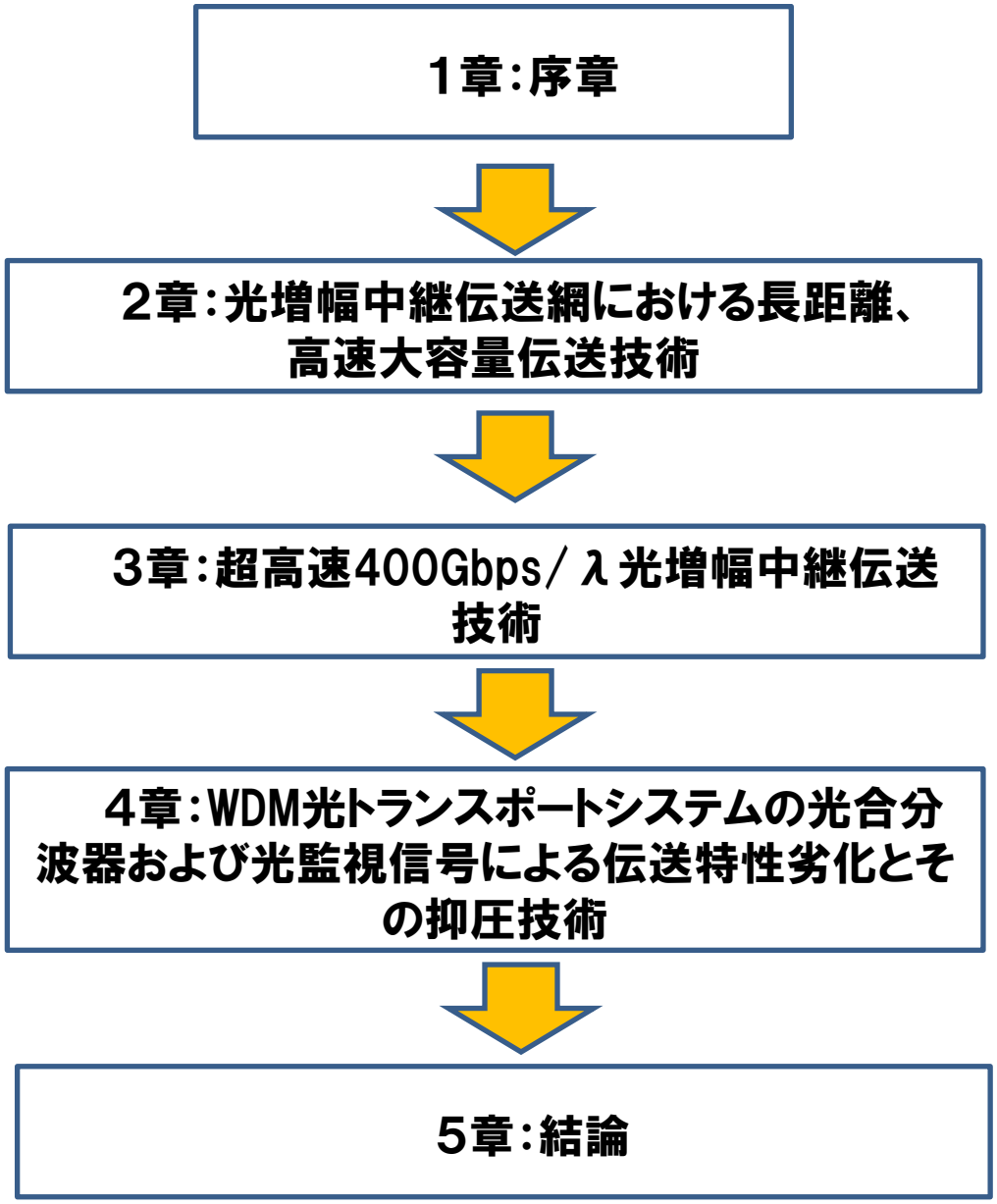

1章：序章
2章：光増幅中継伝送網における長距離、高速大容量伝送技術
3章：超高速400Gbps/λ光増幅中継伝送技術
4章：WDM光トランスポートシステムの光合分波器および光監視信号による伝送特性劣化とその抑圧技術
5章：結論

図 1.6: 本論文の構成

参考文献

[1] 総務省,”我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試 算 (2019年5月集計版),” https://www.soumu.go.jp/main_content/000644015.pdf, Sep. 2019.

[2] Cisco, “Cisco Visual Networking Index 全世界のモバイルトラフィックに関する最新予測、2017年～2022年,” Cisco Public White paper, https://www.cisco.com/c/dam/global/ja_jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.pdf, 2019.

[3] 川崎岳, 井波政則, 島崎大作, 行田克敏, “100Gbit/s高速大容量パケットトランスポートシステムの実用化開発,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol.J99-B No.4 pp.275-282, Apr. 2016.

[4] 前田英樹, 角田正豊, 多田康彦, 今井崇雅, “広いフラットな信号通過帯域と優れた多段接続性を持つ2×2波長選択光クロスコネクト,” NTT R&D, Vol.50, No. 12, Dec. 2001.

[5] 前田英樹, “招待講演:400G超大容量光伝送システムの研究開発,”電子情報通信学会技術研究報告PN2019-15, Aug. 2019.

[6] 木坂由明, 富澤将人,宮本裕,“Beyond 100G 光トランスポート用デジタル信号処理回路(DSP),”NTT技術ジャーナル, Jul. 2016.

[7] 石尾秀樹監修, 中川清司, 中沢正隆, 相田一夫, 萩本和男著, “光増幅器 とその応用,” オーム社, 1993.

[8] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic, 1989.

[9] A. Naka and S. Saito, "In-line amplifier transmission distance determined by self-phase modulation and group-velocity dispersion," J. Lightwave Technol., vol. 12, no. 2, pp. 280-287, 1994.

第2章　光増幅中継伝送網における長距離、高速大容量伝送技術

2.1 概要

本章では、光増幅中継伝送系における長距離、高速大容量伝送技術として、信号波形最適化技術[1]、および、新規デジタルコヒーレン光伝送技術とマルチキャリア光伝送方式を用いた高速大容量の波長多重(WDM)光伝送方式[2]について提案する。

信号波形最適化技術は、長距離WDM光伝送方式において、10Gbpsの2値の強度変調方式を用いた場合における信号波形のデューティーファクタによる伝送特性依存性を明らかにし、デューティーファクタが0.5以下でWDM光伝送特性が改善されることを実験、シミュレーションにより明らかにする。

新規デジタルコヒーレント光伝送技術は、1波長当たり100Gbpsを超えるBeyond 100G伝送技術について述べる。商用グレードにおけるBeyond 100Gとなる400Gbps伝送実験が報告されている[3-6]。商用グレードシステムでの高速および長距離伝送の実験的デモンストレーションも報告されている[4-7]。WDM装置を新規に構築することなく、トランスポンダのみの交換で400Gbpsにアップグレードすることも検討されており[6]、これはネットワークリソースをより効果的に利用でき、コストを節約できるため、通信キャリアにとって有用な手段となる。従来のデジタル信号処理技術[8]と比較して、新規デジタルコヒーレント技術、ならびに2つのサブキャリア(2SC、2 Sub Carriers)と2つの偏波(DP、Dual Polarization)を用いたを用いた16値の直交振幅変復調方式（2SC-DP-16QAM）をを提案する[2]。実験では、従来の100 Gbps信号に400 Gbps信号を混合した波長多重伝送実験により評価する。さらに、4スパン100 Gbpsおよび400 Gbps信号の同時伝送に関する長期安定性テストの結果を示す。これにより、新規のデジタルコヒーレント光伝送技術の優れた伝送特性を確認する。新規デジタルコヒーレント方式は、デジタル後方伝搬信号処理を使

用した非線形歪み補償機能と、コヒーレントデジタル信号処理（DSP）の高性能な軟判定前方誤り訂正（SD-FEC）機能を有する。これらの高度なデジタルコヒーレント技術と低光雑音なラマン光増幅技術を適用して、WDM光伝送システムにおける長距離、大容量化の課題を克服し、コアネットワークでの最長伝送距離である500kmにて十分な商用マージンにて運用可能な1900 kmを超える長距離400 Gbps伝送実験結果について示す。

2.2 長距離光増幅中継伝送網における信号波形最適化

10 Gbpsクラスの光伝送システムは、非ゼロ復帰（NRZ）信号パルス形式を採用している[9]。 ただし、波長分散マネジメントとWDM技術を適用した大容量海底WDM伝送実験では、5～10 Gbps/chのデータレートでゼロ復帰（RZ）信号パルス形式を使用しています[10-12]。 これは、RZ信号パルス形式には、相互位相変調（XPM）や4光波混合（FWM）などのファイバの非線形性に起因するチャネル間相互作用の抑制、信号対雑音比(SNR)の増加など、NRZ信号パルス形式よりもいくつかの潜在的な利点があるためである。これらの利点の実現は、ターゲットシステムのパラメータと構成に大きく依存するため、詳細に説明する必要がある。

光増幅器システムの伝送性能は、直接検出後の電気的SNR（またはビットエラーレートから算出されるQファクタ）で示すことが可能である[9]。シミュレーションにおいては、光増幅器のASE雑音(自然放出光雑音)によって決定される基本理論SNRからアイ開口ペナルティを引くことで推定する[13]。群速度分散（GVD）と伝送ファイバの伝搬中の非線形性によるアイ開口ペナルティは、スプリットステップフーリエ法[14]によって非線形Shr-odinger方程式を数値的に計算することで取得できる。 送信機から生成された信号パルスは、10 Gbs/chのデータレートで64ビットのランダムデータパターンで強度変調されていると仮定する。 各信号パルス形状はスーパーガウスであり、α パラメータは1.436である[15]。この値により、信号パルス幅の0.5倍の立ち上がり時間と立ち下がり時間（10%～90%）が得られます。信号パルスのデューティーファクタは、信号パル

ス幅とビット持続時間（100 ps）の比として定義する。WDM伝送の場合、チャネル間隔は1.0 nmで、チャネル間隔は等間隔である。アンプ間のスパン長は50 km、分散パラメータ1 ps/nm/ km（β_2=1.29×10^{-27} s^2/m）、分散スロープ0.07 ps/nm^2/km、非線形係数2.15×10^{-3} m^{-1} W^{-1}、ファイバ損失は0.21 dB/kmとする。これらのファイバパラメータは、信号チャネルの中心波長で定義されている。各増幅器の雑音指数と光出力（平均）は、それぞれ4 dBと3 dBm/chです。伝送後、信号は、1 nmの帯域幅とGVD補償器を備えた光学バンドパスフィルターを用いて、波長選択を行う。受信機は、2乗検波器と、それに続く6.5 GHzの3 dB帯域幅を持つ5次ベッセルトムソンフィルターで構成される。

図2.1は、6000 kmの単一チャネル伝送後の信号パルスのデューティ比に対する電気SNRのシミュレーション結果を示している。 伝送ファイバの累積分散は、各GVD補償間隔Lcompで完全に補償されている。これより、SNRのデューティーファクタへの依存性は、GVD補償間隔によって異なることがわかる。

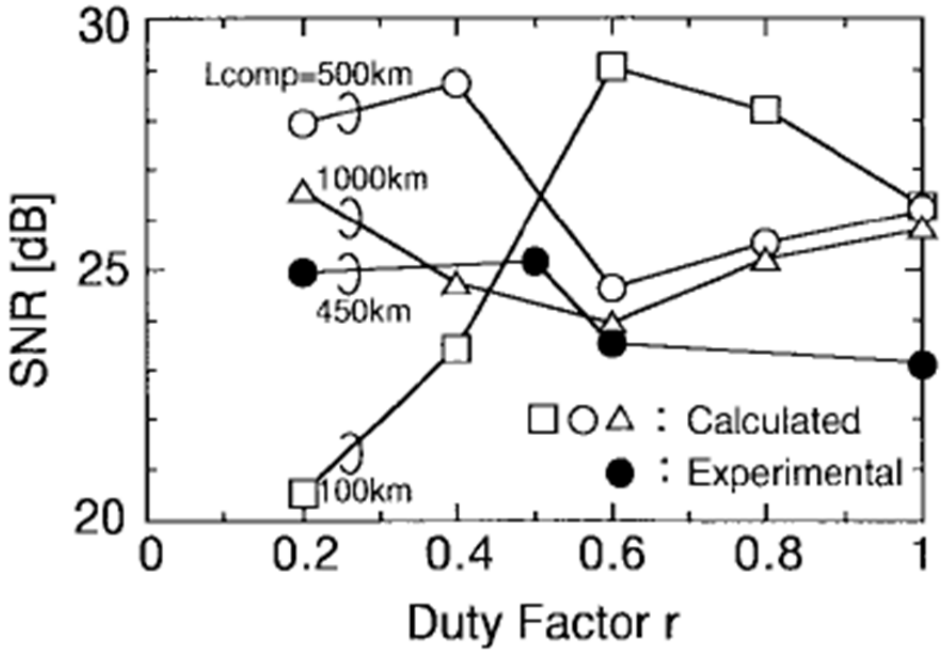


図 2.1: 6,000km 伝送後の SNR 対デューティーファクタ

GVD補償間隔が100 kmの場合、最適なデューティーファクタは0.6であった。平均光パワーが一定の場合、信号のピークパワーが増加するため、デューティーファクタが減少するとSNRは増加する[13]。一方、信号のデューティ比が低下

するにつれて、波形劣化はより顕著となる。 100 kmなどの比較的短い補償間隔では、ゼロ分散ファイバを用いた場合と同様に、高次のGVDが支配的になると考えられる。高次GVDと自己位相変調（SPM）の複合効果による波形の歪みは、伝搬後のSNRを低下させる。 その結果、信号のピーク電力の増加と、高次のGVDとSPMの複合効果による波形歪みとのトレードオフにより、最適なデューティーファクタが決定される。

500 kmおよび1000 kmの長いGVD補償間隔では、デューティーファクタ0.5が適切であった。 図2.2は、500 kmのGVD補償間隔に対して計算された伝搬後の信号波形を示す。 デューティーファクタが0.6の場合、「111」パターンでは大きな波形歪みが観察されるが、「01」パターンでは歪みは確認されなかった。

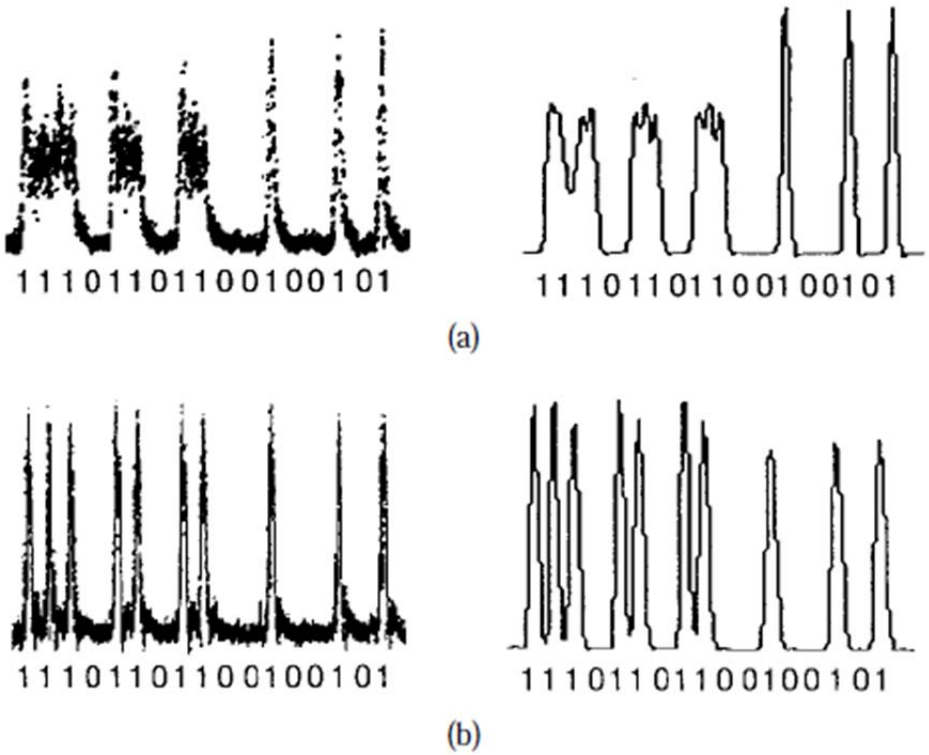


図 2.2: 受信波形(a) r =0.6、(b) r = 0.2

このようなパターン依存の波形歪みは、SPM起因のチャーピングとGVD補償の相互作用によるパルス圧縮に起因すると考えられる。これは、GVDの補正間隔が長くなるにつれて重要となる。 対照的に、このような波形の歪みは、デューティーファクタが0.2の信号パルスでは観察されなかった。これは、デューティ

ーファクタが0.5以下の場合、各信号パルス間が十分に分離されており、パルス圧縮のみを受けるためである。

周回伝送実験系[11]を用いて、これらの結果を実験的に確認した。ループ長は470 kmで、450 kmの分散シフトファイバ（DSF）、20 kmの分散補償ファイバ、0.98 mの励起エルビウムドープファイバンプ（EDFA）で構成されている。光送信機は、NRZまたはRZ形式の2^7-1擬似ランダムビットストリーム（PRBS）を用いた。使用されたファイバと光増幅器のほとんどのパラメータは、数値モデルのパラメータと同様である。 SNR測定では、判定しきい値レベルをスイープしビットエラーレートを測定することにより求めている[9,16]。測定したSNRと、6,110 kmの送信後の受信信号波形を図2.1と図2.2に示す。

シミュレーション結果と実験結果の違いは、約3dBであり、その主な原因は、実験で用いた送受信機の性能の違いである。最大SNRはデューティーファクタ0.5で測定され、数値計算結果と一致する。デューティーファクタ0.6の測定波形は、パターンに依存する波形歪みを示し、両方の測定波形はシミュレーションによって得られた波形をよく再現している。

WDM伝送では、SPM、XPM、およびFWMによる波形の歪みを考慮する必要がある。 XPMおよびSPMによって引き起こされる波形歪みがデューティーファクタにどのように依存するかを調べるために、図2.3（a）に示すように、GVD補償およびファイバ損失のない10 Gbs/ch 2チャネルWDM伝送システムをシミュレーションにより解析した。 XPMを考慮した結合シュレディンガー方程式[6]を用いて解析し、FWMの影響は含まれていない。信号パルス形式はNRZおよびRZ（デューティーファクタ0.4）で、両方のチャネルは同じパターンで同期的に強度変調されている。縦軸は、最悪のチャネルのアイ開口ペナルティが1 dBになったときの伝送距離Leであり、分散長L_Dで正規化されている。横軸は、非線形長L_{NL}に対する比率である。これらを特徴的な長さとして、$L_D=T_0/|\beta_2|$、および$L_{NL}=1/(\gamma P_0)$として定義する。ここで、T_0は1/e強度ポイントでの信号パルス幅であり、P_0は信号のピーク電力である。破線は、非線形シュレディンガー方程式におけるGVDとSPMの複合効果のみ($L_e \propto (L_D \cdot L_{NL})^{1/2}$を考慮してシミュレーションした[7]。実線は、破線を√3のファクタをシフトして作成した。これは、XPMは基本的にSPMの2倍の効果があるためである[14]。

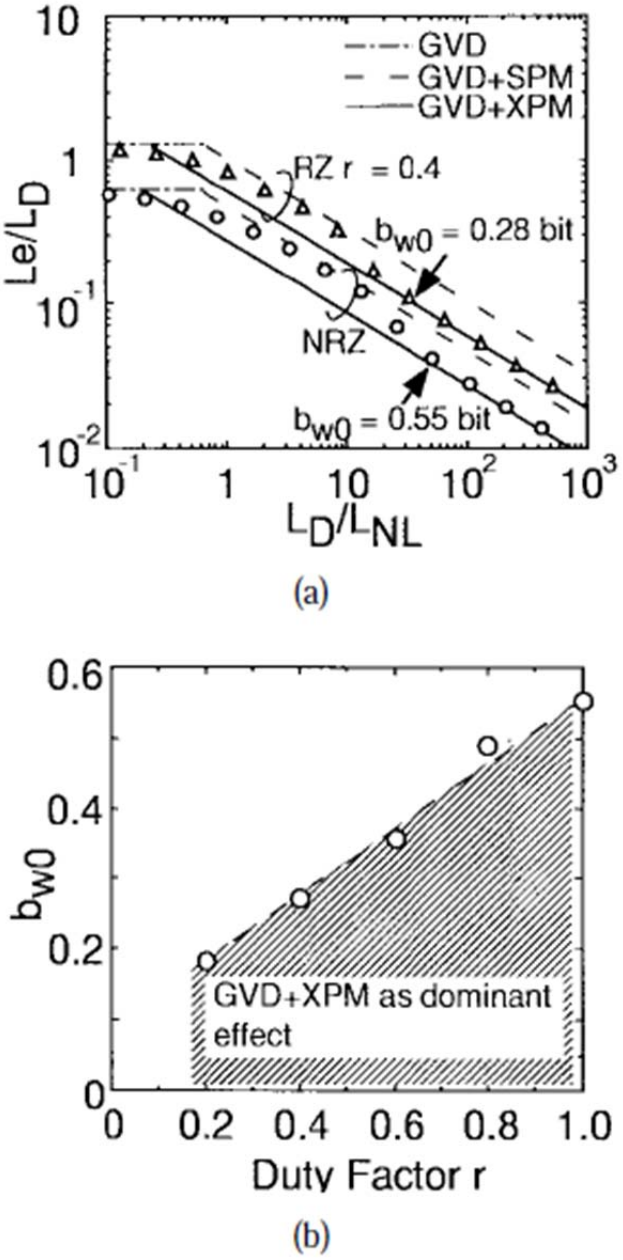


図 2.3: GVD と XPM の影響

NRZ、RZの両方の信号形式において、L_D/L_{NL}パラメータが増加するにつれて、すみなわちGVDが減少するにつれて、破線から実線に向かって移動する。これらの結果は、チャネル間のウォークオフが減少するにつれて、XPMの効果がより顕著になることを示している。

遷移はパルス形式に依存すること着目する。L_D/L_{NL}パラメータが実線に到達するときのビットウォークオフ値をb_{wo}と定義する。そのとき、b_{wo}は、$|D|\Delta\lambda L_e/T_b$として与えることが出来る。NRZおよびRZ（デューティーファクタ0.4）のb_{wo}値は、それぞれ0.55および0.28ビットであった。 図2.3（b）に、デューティーファクタrとb_{wo}の関係をプロットした。 これより、b_{wo}は、デューティーファクタrとともに直線的に増加することが分かり、図の網掛け部分は、XPMの効果が支配的な領域となる。したがって、XPMに起因する波形の歪みは、デューティーファクタを減らすことで軽減できることが分かった。

実際のWDM光伝送システムには、DSFと逆符号のGVD補償ファイバを使用して波形の歪みを軽減する分散マネジメント技術が必要である。このような分散マネジメントシステムでは、一定間隔でのGVD補償により、信号チャネル間のウォークオフが減少する。さらに、XPMの影響は、チャネル数が増加するにつれて大きなる。図2.4は、2～8チャネルの分散マネジメントされた6,000kmWDM光伝送システムにおけるSNRとデューティーファクタのシミュレーション結果を示している。分散補償間隔は500kmとし、最悪のチャネルのSNR値をプロットとした。チャンネル数が少ない場合、デューティーファクタへの依存性は、シングルチャンネル伝送の依存性とほぼ同じであることは図2.1により明白である。対照的に、8チャネルシステムにおいては、デューティーファクタを減らすとSNRが改善できることが確認できた。これは、チャネルの数が増えるとXPMが増加するということを反映している。したがって、デューティーファクタが小さい信号パルス形式により、分散マネジメントされたWDM光伝送パフォーマンスが向上することが分かった。結果として、分散マネジメントされたWDM光伝送システムにおいて、デューティーファクタは0.5以下にすることが適していることを確認した。

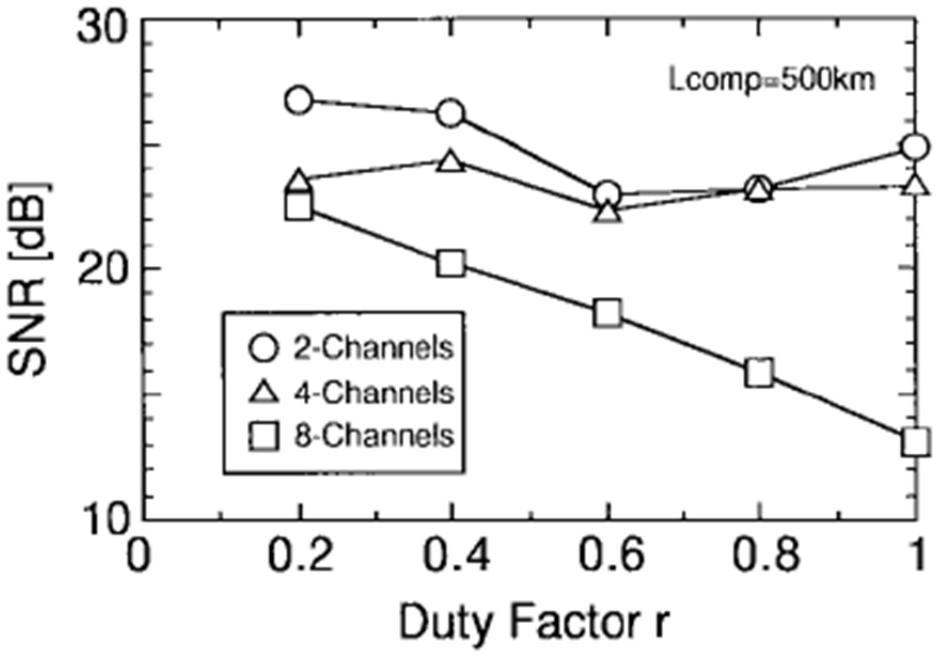


図 2.4: 6,000kmWDM 伝送後の SNR とデューティーファクタ

以上、10 Gbs/chの長距離光伝送特性の信号パルスデューティーファクタ依存性を調査した。単一チャネル光伝送システムにおいて、最適なデューティーファクタは、GVD補償間隔に依存することを明確にした。また、デューティーファクタを小さくすることは、WDM伝送でXPMによって引き起こされる波形歪みを抑えるのに効果的であった。 GVD補償間隔500 km、ファイバ分散パラメータ -1 ps/nm/kmの分散マネジメントシステムを適用したシングルチャネルとWDM伝送の両方の分析により、デューティーファクタ0.5以下が最適であることを確認した。

2.3 Beyond 100 G 光伝送の方向性について

本章では、1 波長当たり 100 Gbps を超える Beyond 100G 大容量光伝送技術について検討を行う。図 2.5 に、Beyond 100G 伝送方式の方向性を示す。実現には、大別して 3 つのアプローチが考えられる。

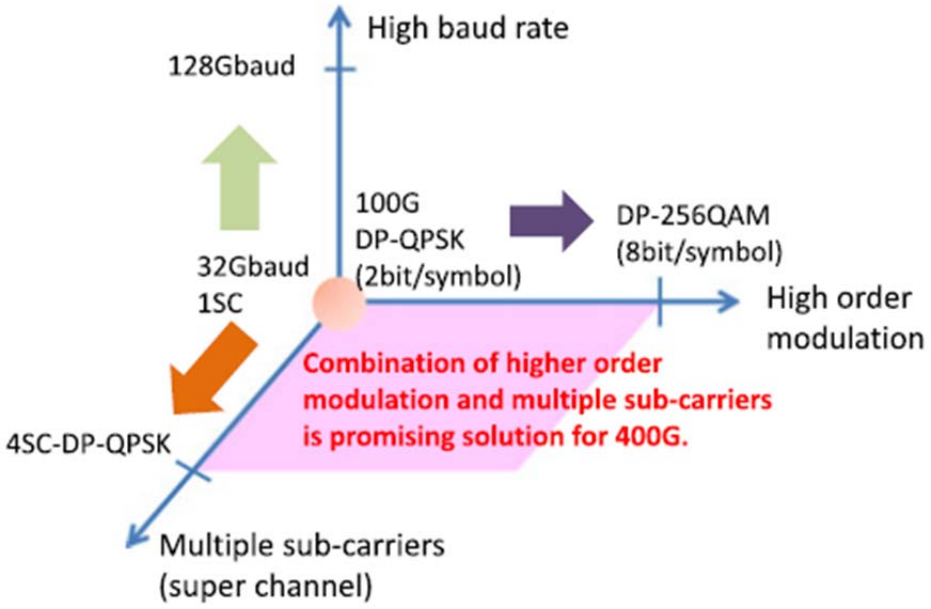
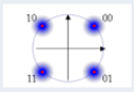
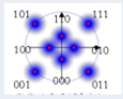
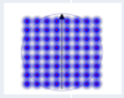


図 2.5:　Beyond 100G 光伝送の方向性について

① チャネル当りの信号帯域を拡大しボーレートの高速化を図ること。
② 強度変調の2値変調に比較して、デジタル変復調技術を用いて多値のQAM信号等をはじめとする効率的な多値変調方式を適用すること。
③ マルチキャリア、もしくはファイバ等の空間の自由度を用いた多重化を行うことで容量を向上すること。

である。 表 2.1 は、100Gbps、400Gbps、および 1Tbps を実現する変調方式とマルチキャリア光伝送方式について示す。

表　2.1:　マルチキャリアを用いた Beyond 100G 光伝送方式

データレート	100G	400G			1T
変調方式	QPSK	8QAM	16QAM	64QAM	
コンスタレーション					
ビットレート	100Gbps	200Gbps	200Gbps	400Gbps	600Gbps
周波数帯域イメージ					

400Gbps の場合、8QAM、16QAM、64QAM 等の高密度な多値変調方式が用いられると共に、複数のサブキャリアを使って、1つの通信チャネルを大容量化するマルチキャリア伝送方式が適用される。例えば、本技術により、高速な 400G イーサの信号の場合、16QAM の 200Gbps を 2 マルチキャリア光伝送を用いて伝送が可能となる。16QAM 等の高密度な多値変調方式は、100G 変調方式として採用されている QPSK と比べると、伝送距離が大幅に短くなる。図 2.6 は、多値変調方式における OSNR 要件を示している。

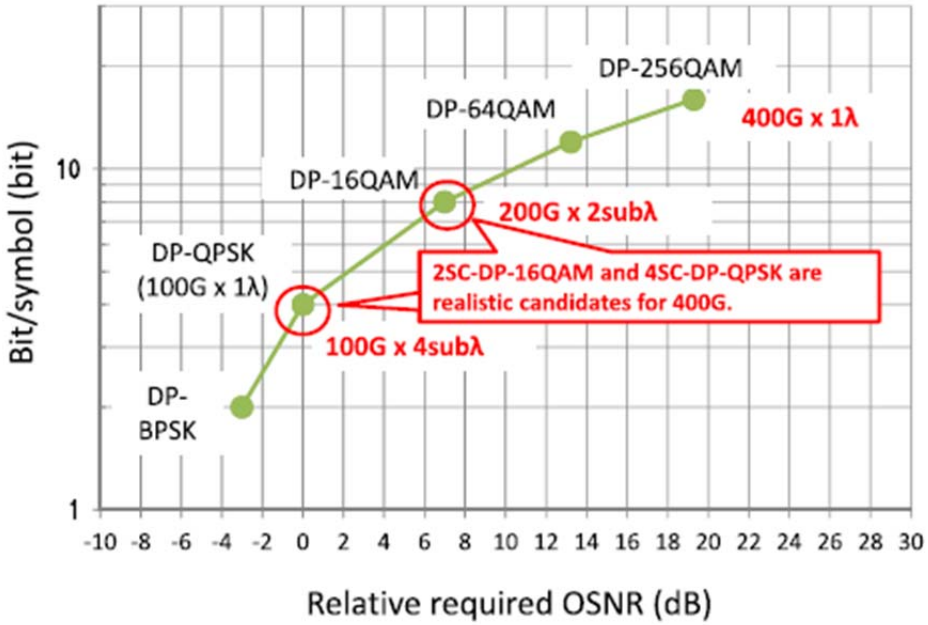


図 2.6: 多値変調における OSNR の要件

DP-256 QAM および DP-64 QAM 信号は、高いスペクトル効率（SE）となるが、非常に高い OSNR を必要とする。 DP-QPSK は、100 Gbps と同じ SE を OSNR ペナルティなしで実現することが可能となる。 また、DP-16 QAM 信号は中程度の SE と OSNR を必要とする。 このため、400 Gbps 伝送では、2 SC-DP-16 QAM と 4 SC-DP-QPSK が現実的な候補です。送信機のコストを考えると、400Gbps 長距離光伝送の実現のためには、2 サブキャリア DP-16QAM が有用であると考えられる。

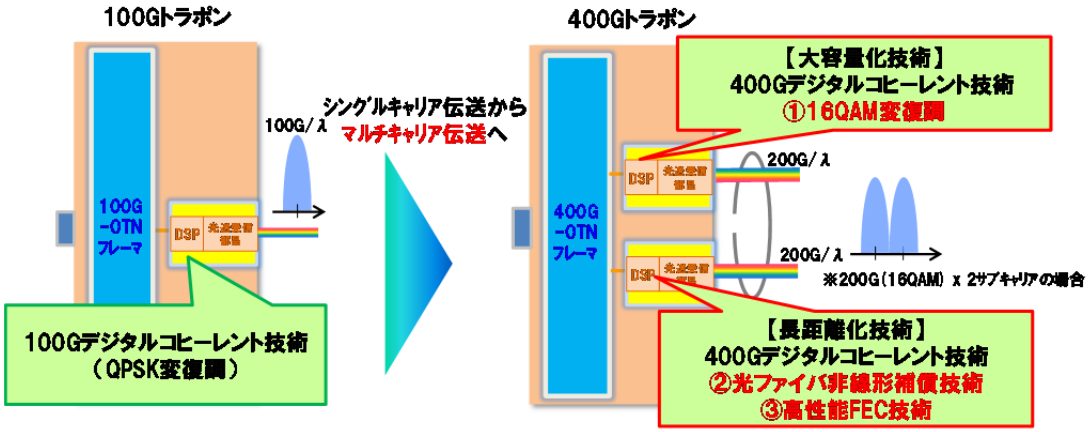


図 2.7:　400Gbps トランスポンダ(送信部)の構成

図 2.7 に、2SC-DP-16QAM による 400Gbps トラポン(送信部)の構成を示す[17]。400G トラポンでは、クライアント側からの 100G イーサ信号、400G イーサ信号等を 400G-OTN(Optical Transport Network)フレーマにて 200Gbps 信号に振り分け、DSP にて信号処理後、16QAM 変調信号に変換され、WDM 装置の合波器により合波され、2 サブキャリ信号として光伝送路に送出される。伝送後、2 サブキャリア信号の受信は、WDM 装置の分波器により、分波されトランスポンダにて 16QMA 信号を復調なびにデジタル信号処理され、400G-OTN フレーマに処理後、クライアント信号として再生される。

2.4 100 Gbp と 400Gbps 信号との混在 WDM 光伝送実験

経済的な400Gbps光伝送システムの実現には、既存100Gbpsシステムに400Gbpsの光信号が混在波長多重伝送できることが望まれる。本章では、100Gbpsと400Gbpsとの混在波長多重光伝送実験を行い、その伝送特性を確認する。混在波長多重伝送実験では、400Gbps 2サブキャリアDP-16QAM信号を用いて実証実験を行った。

図2.8は、400 Gbpsの伝送フィールド実験系で、NTTのAビルとBビルの間に設置されたファイバケーブルを用いている。送信側では、伝送性能を測定する

ために400 Gbps光信号または2つの100 Gbps光信号が配置され、10個の背景光（200 Gbps-DP-16QAMまたは100 Gbps-DP-QPSK）が配置されている。

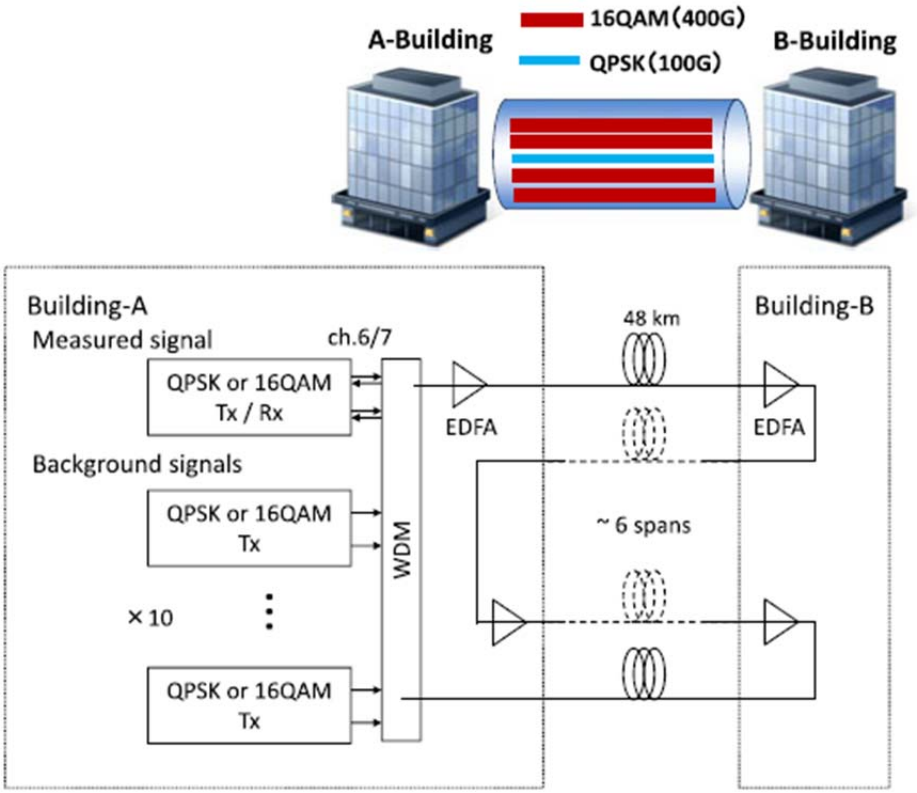


図 2.8:　400Gbps 2 サブキャリア DP-16QAM 光伝送フィールド実験系

400 Gbpsの光信号には、DP-16QAMとサブキャリア波長多重化技術の両方が適用されている。200 Gbpsの情報は、サブキャリアごとの光の振幅と位相に重畳され、2つのサブキャリア波長が統合されて単一の400 Gbpsチャネルになる。 1570.42 nm～1574.95 nmの50 GHz ITU-Tグリッド上のWDMを使用して、測定信号と10個の背景光を含む12の光チャネルを組み合わせました。伝送ラインは、エルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）と、非常に高い偏波モード分散（PMD）（NTT商用ケーブルからファイバを選択することでスパンごとに約7 ps）を備えた約48 kmのスパンのDSFで構成される。 EDFAのNFとDSFの損失は、それぞれ約6 dBと0.27 dB/kmである。 PMDは時間とともに変動するため、考えられるすべての商業条件下での試験となる。伝送システムの評価では、

PMDとファイバの非線形性が高いことを示すより現実的な条件を考慮することが重要である。高いPMD値を持つDSFでLバンドの短波長範囲でWDM伝送を行うことにより、非線形効果とPMDによる信号歪みが大きくなるように環境を構成しました（4スパンで約14 psおよび17 ps（192 km）および6スパン（288 km）の伝送）。レシーバ側では、12WDM信号が逆多重化され、DP-16QAMまたはQPSKレシーバに入力される。測定信号に使用されるトランスポンダには、当社の斬新で高度なデジタルコヒーレント光伝送技術が組み込まれている。この技術の特徴は、デジタル後方伝搬信号処理技術を使用した非線形歪み補償と、コヒーレントDSPの高性能SD-FEC技術[18]である。

2.4.1 新規デジタルコヒーレント光伝送方式

図2.9に、新規デジタルコヒーレント方式の機能ブロック図を示す。従来のデジタルコヒーレント方式に、非線形光学効果による波形劣化の影響を低減する機能、ならびに高性能な誤り訂正技術を併用することで、従来比で約2倍の高性能化を実現し、大容量、長距離化を可能とする。

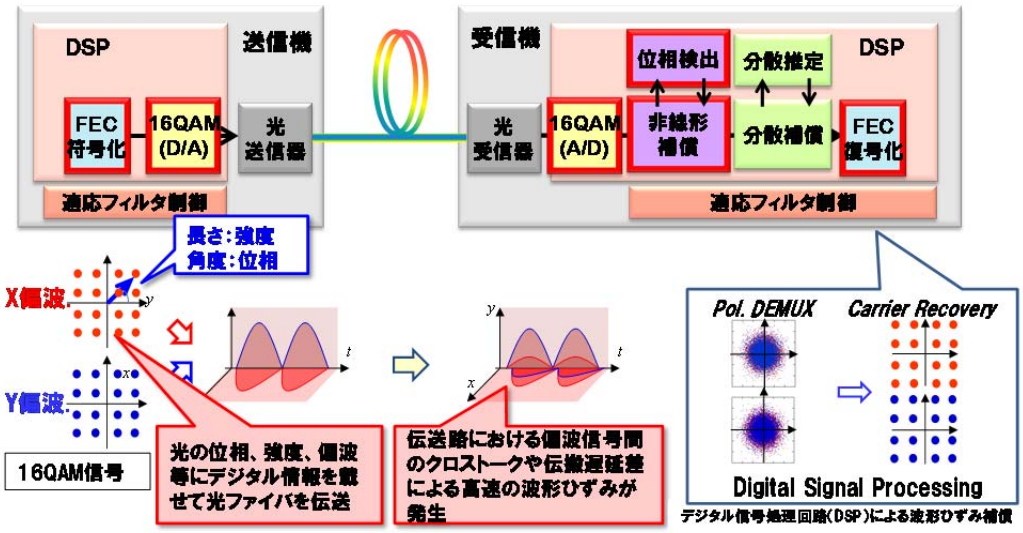


図 2.9: 新規デジタルコヒーレント光伝送方式

最初に、高度なデジタルコヒーレント技術の効果を評価するために、バックツーバックトランスポンダのパフォーマンスを測定した。図2.10は、約5.5 dBの

FECリミットからの400 Gbps 2SC-DP-16QAM信号のOSNR対Qファクタマージンを示す。

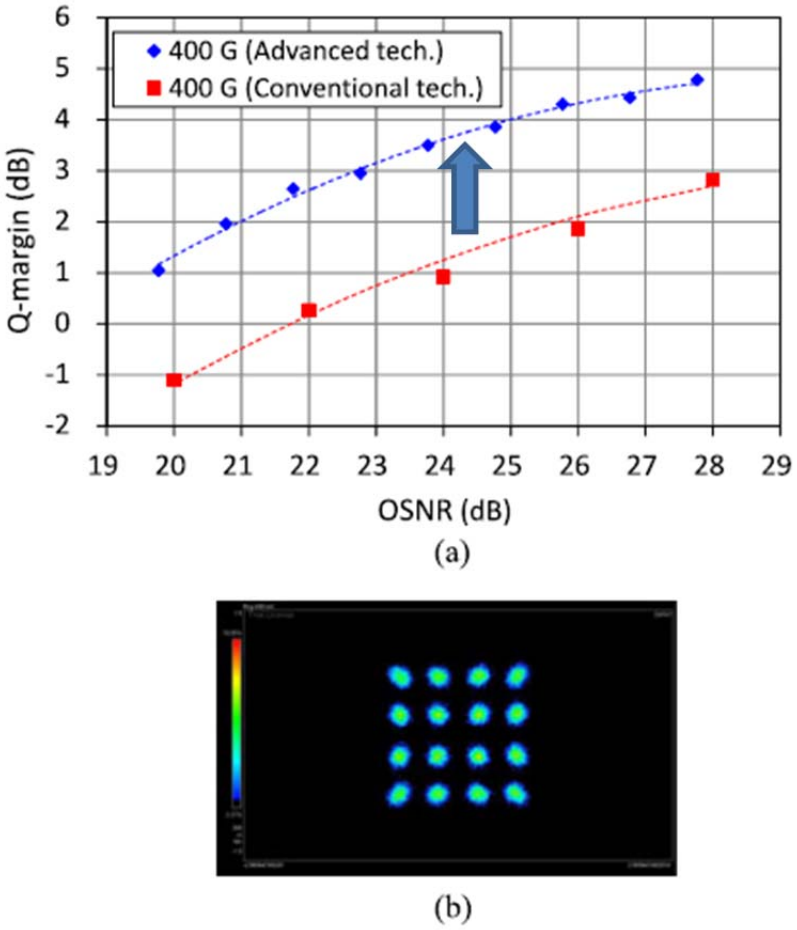


図 2.10: 提案技術の送受信対向特性

OSNRの帯域幅は、200 Gbpsのシングルサブキャリア DP-16QAMの場合0.1 nmである。青い菱形のプロットは、高度なデジタルコヒーレント技術を使用した連続したパフォーマンスを表し、赤い四角のプロットは、従来のテクニックを使用した連続したパフォーマンスを表します。 20 dBから28 dBのOSNR値の場合、高度な手法は、従来の手法よりも約2.5dB高いゲインを示た。新規デジタルコヒーレント方式は、25.5%の硬判定前方符号誤り訂正(HD-FEC)および軟判定前方誤り訂正(SD-FEC)の連結を採用し、新規の空間結合型不規則低密度パリティチェック（LDPC）とBose-Chaudhuri-Hocquenghem(BCH)符号を組

み合わせている[19]。また、パイロット支援によるサイクルスリップ緩和法[20]により約1.1dB性能改善している。ネットコーディングゲイン（NCG）は12 dBで、ボーレートは、約34.2 Gbaudであった。一方、従来の技術は、HD-FECモードとSD-FECモードの20%の連結モードである。これは、差分符号化方式でのトリプル連結コードセットタイプLDPCの使用を想定し、NCGは11dBである。ボーレートは約31.8 Gbaudである。新規のDSPは、16 nm CMOSプロセスを採用し、従来のDSPの半分以下の電力しか消費していない[18]。従って、約2.5 dB Qの改善効果は、より高いネットコーディングゲインを備えた新しいFECを使用することで1.0 dB、サイクルスリップ補正により1.1 dB、アナログコンポーネントの改善により0.4 dBとして説明できる。図2.10（b）は、DP-16QAMコンスタレーションに劣化がないことを示している。

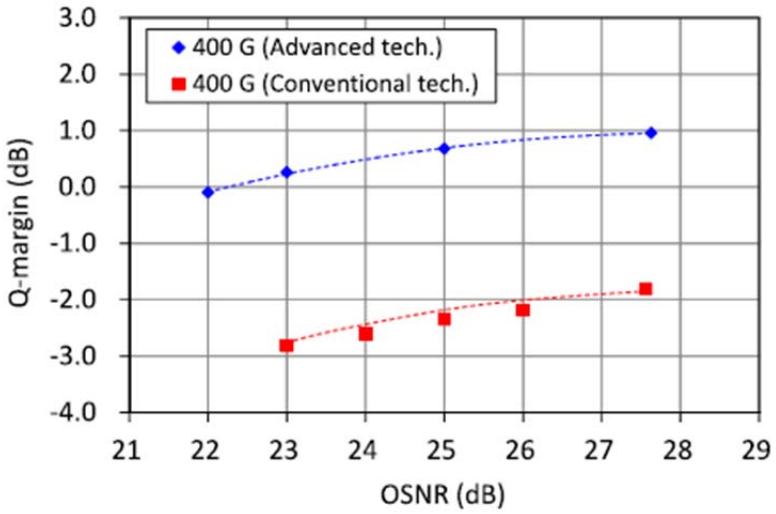


図 2.11: 4 スパン伝送後の 400Gbps 信号特性

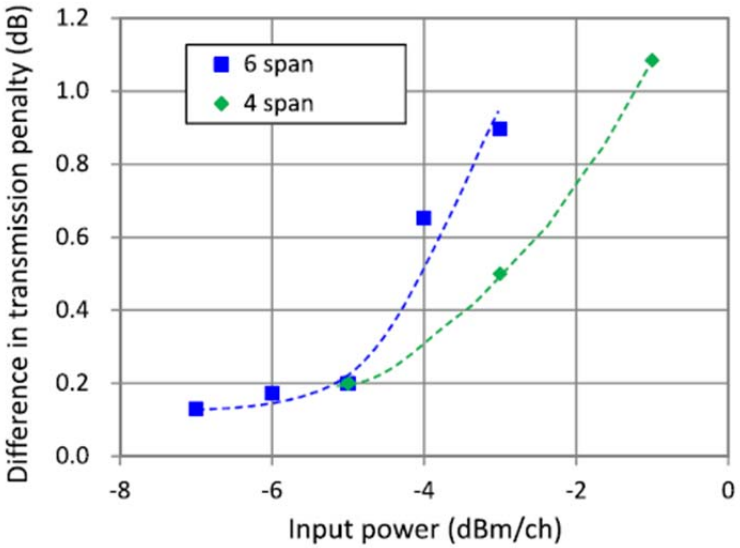


図 2.12: 提案方式と従来方式でのペナルティ差分(4 スパン、6 スパン伝送)

次に、4スパン伝送ラインでの400 Gbps 2C-DP-16QAM信号の伝送性能を測定した。図2.11では、青色のプロットが新規デジタルコヒーレント技術を適用したもの、従来のデジタルコヒーレント技術が赤白のプロットとして示す。 23 dB～27 dBのOSNR値の場合、高度な技術は、従来の技術よりも約3 dBのゲインを提供します。図2.12は、4スパンおよび6スパン伝送の高度な技術と従来の技術の400 Gbps信号伝送ペナルティの違いを示している。受信機では、デジタル逆伝搬と非線形偏光クロストークキャンセル技術を適用した非線形補償機能を実装している[21]。このアルゴリズムは、非線形補償機能を実現しながら、DSPの消費電力を積極的に最小化している。非線形補償により、4スパン伝送では-3.3 dBm/ch、6スパン伝送では-4.3 dBm/chの最適な入力電力で、約0.5 dBのQマージンがさらに改善された。これらの値は、図2.11の曲線の線形補間によって導きだした。これは、新規デジタルコヒーレント技術を適用すると、伝送距離を大幅に延長できることを意味している。これらの結果に基づいて、新規デジタルコヒーレント技術により、NTTの既存の100-G光ネットワークを強化し、400-G光ネットワークサービスを提供できることが確認された。商用の100 Gbps光伝送装置が400 Gbpsチャネルをサポートできることを確認する

ために、100 Gbpsチャネルと400 Gbpsチャネルを同時に送信するときのパフォーマンスを測定した。

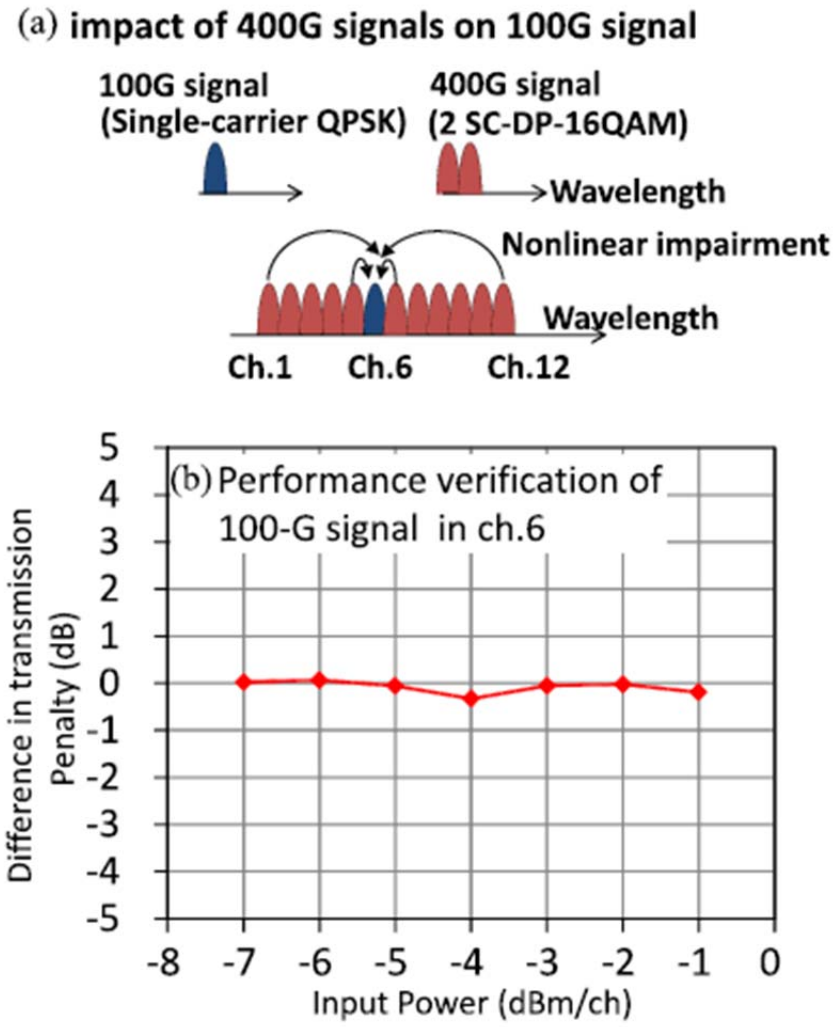


図 2.13: 400Gbps と 100Gbps 信号との混在伝送実験結果

図2.13は、6スパン伝送後の100 Gbps（シングルキャリアDP-QPSK）および400 Gbps（2SC-DP-16QAM）信号の同時伝送の実験結果である。図2.13（a）は、400Gbpsと100Gbpsと混在伝送の光信号スペクトルをプロットしたものである。400Gbpsバックグラウンド信号での-Gbps信号、および図2.13（b）は、100Gbpsのバックグラウンド信号の場合と400G-bpsのバックグラウンド信号の場合の100Gbps信号送信ペナルティの差をプロットしている。過剰なペナルティは、-7 dBm / ch〜-1 dBm / chの入力電力範囲で0.3 dB以内であった。特に、-4 dBm

/ chを超えるファイバ発射パワーでの非線形障害による伝送ペナルティは無視できる。

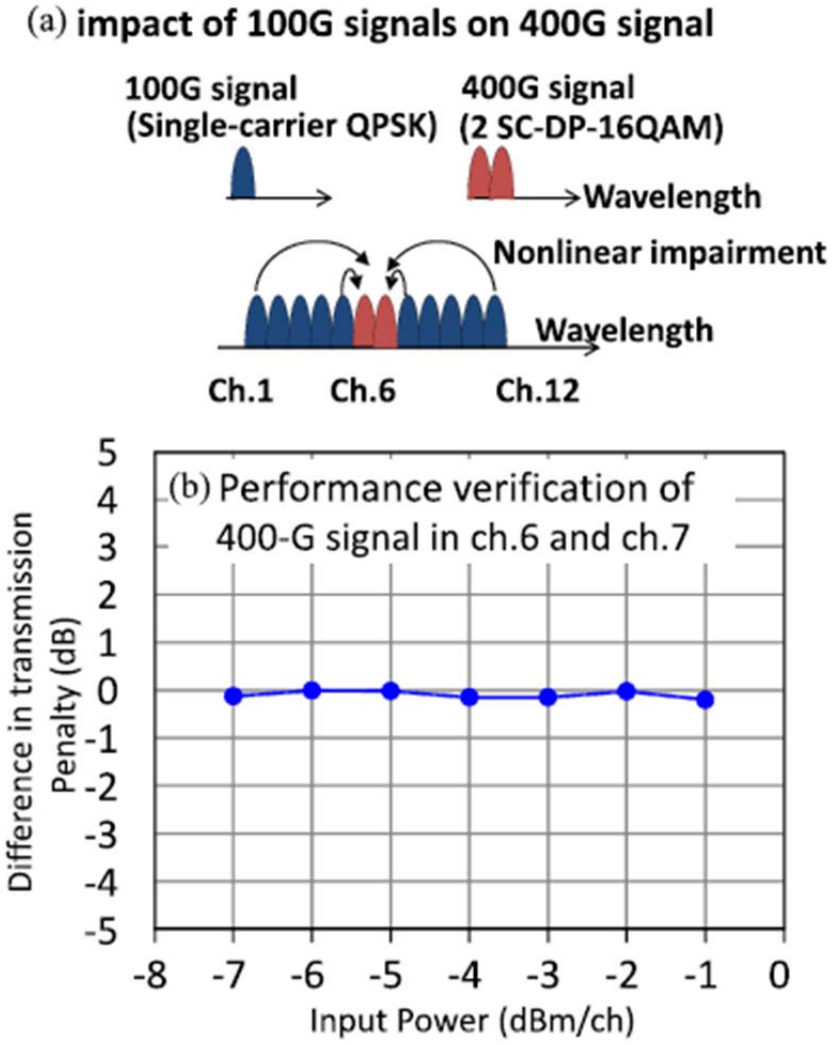


図 2.14: 400Gbps と 100Gbps 信号との混在伝送実験結果

図2.14（a）および（b）は、6スパン伝送後のバックグラウンド信号からの400 Gbps信号の非線形障害の影響を確認した。 400 Gbps信号の過剰なペナルティは0.2 dB以内で、100 Gbps信号のパフォーマンス検証と同じ結果であった。

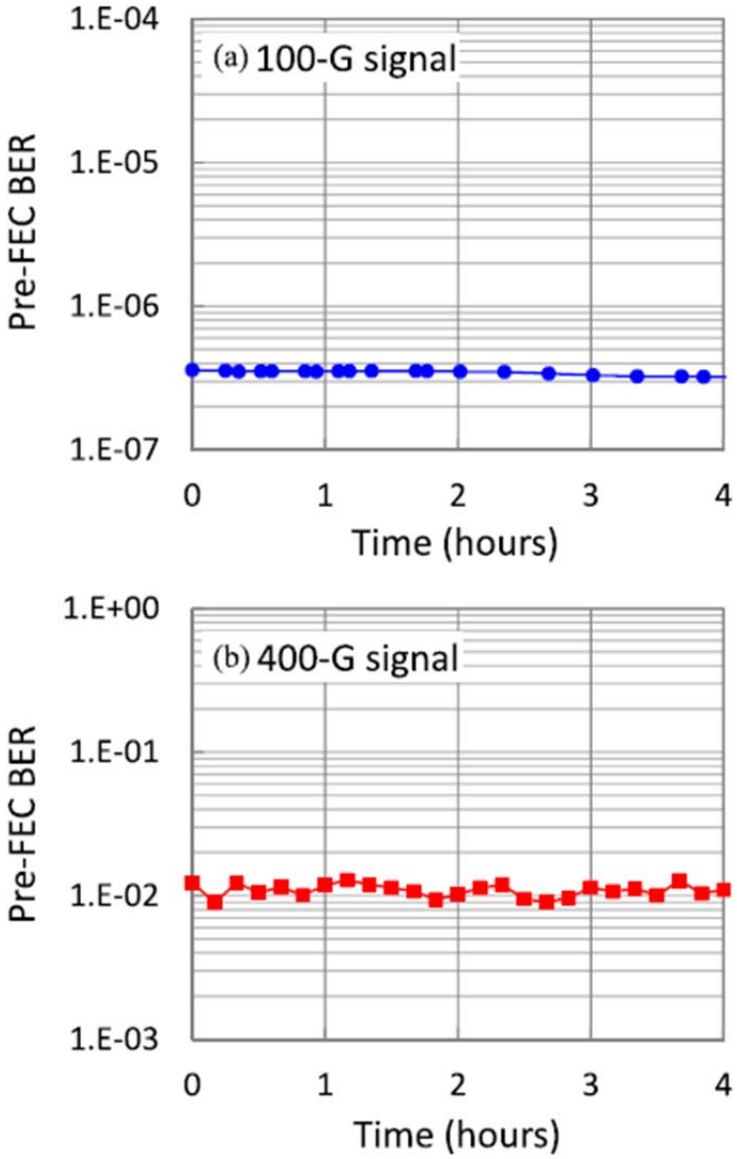


図 2.15: 長時間安定度試験

さらに、クライアントのイーサネットテスターにてエラーのない動作を確認しました。図2.13と図2.14の混在伝送実験の結果に基づき、特に100 Gbps QPSK信号の場合、隣接する16QAM信号の振幅変調成分によって生じる非線形劣化が懸念される可能性があることを示していますが、すべてのペナルティは実

質的に0.3dB以内で影響を受けないことを確認した。これは、新規のデジタルコヒーレント技術の非線形補償機の効果が貢献していると考える。

図2.15は、4スパンの100 Gbpsと400 Gbpsの同時信号混合伝送の長期安定性テスト結果を示しています。100 Gbps信号と400 Gbps信号の両方で、約4時間の測定期間にわたって信号品質が安定していることがわかった。 これにより、混合伝送によって長期的な品質変動が生じないことが確認できた。

2.5 長距離 400 GbpsWDM 光伝送実験

これらの新規デジタルコヒーレント技術を採用して、長距離400 Gbps伝送を実現する。図2.16に、長距離伝送実験で使用した構成を示す。

フィールド実験では、NTTのCビルとDビルの間にファイバケーブルを使用しました。送信機側では、12個のDP-16-QAM光信号が1597.189 nmから1601.883 nmまでの50 GHzグリッドでWDMを使用して結合され、伝送性能を測定するために配置した。

伝送ラインは、1600 nm帯で累積波長分散1300 ps nm、PMD約1.3 psの56.1 kmシングルモード光ファイバ（SMF）で構成されている。伝送ラインには、ノイズ指数（NF）が約6 dBのEDFAアンプを配置している。 NTTのケーブルから選択された、非常に低い損失（約0.18 dB km）と低い非線形性（有効面積（Aeff）> 110 μm^2）を備えたスパンあたり56.1 kmのファイバを用いた。長距離伝送を実現するには、伝送ラインの損失とファイバの非線形性を低くすることが重要である。

テスト環境は、低損失および低非線形の光ファイバでLバンドにてWDM伝送を行うことにより、非線形効果と増幅器ノイズによる信号歪みを低減するように構成されている。

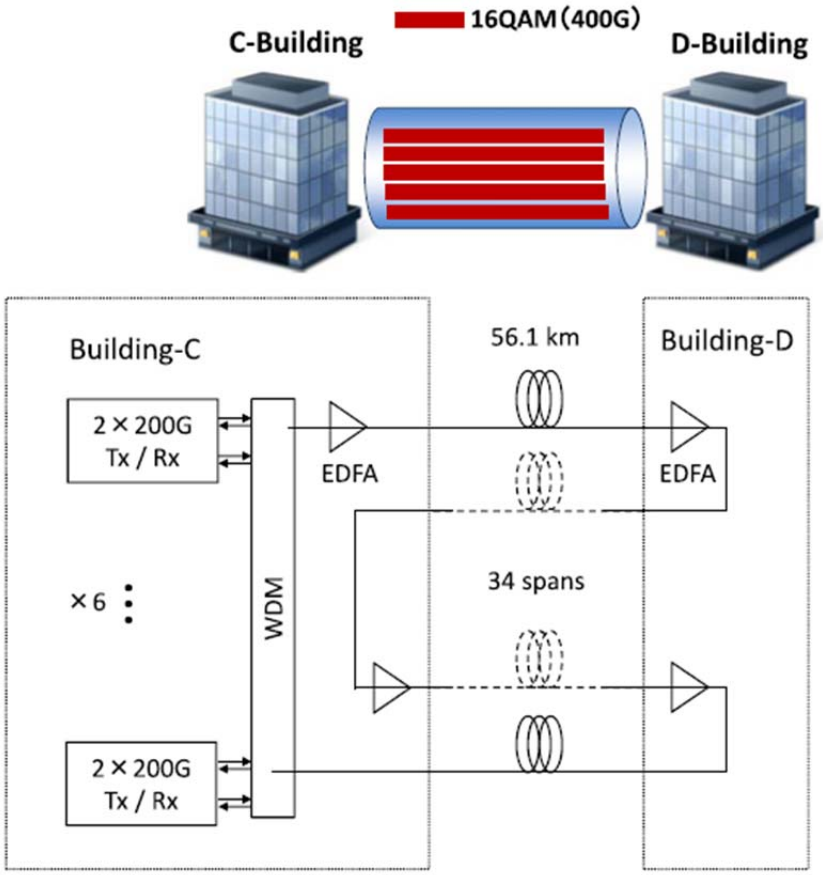


図 2.16:　400Gbps 長距離 WDM フィールド実験系

受信側では、12波WDM信号が分波されて受信機に入力され。。測定された信号に使用されるトランスポンダには、上記の新規デジタルコヒーレント光伝送技術が組み込まれている。

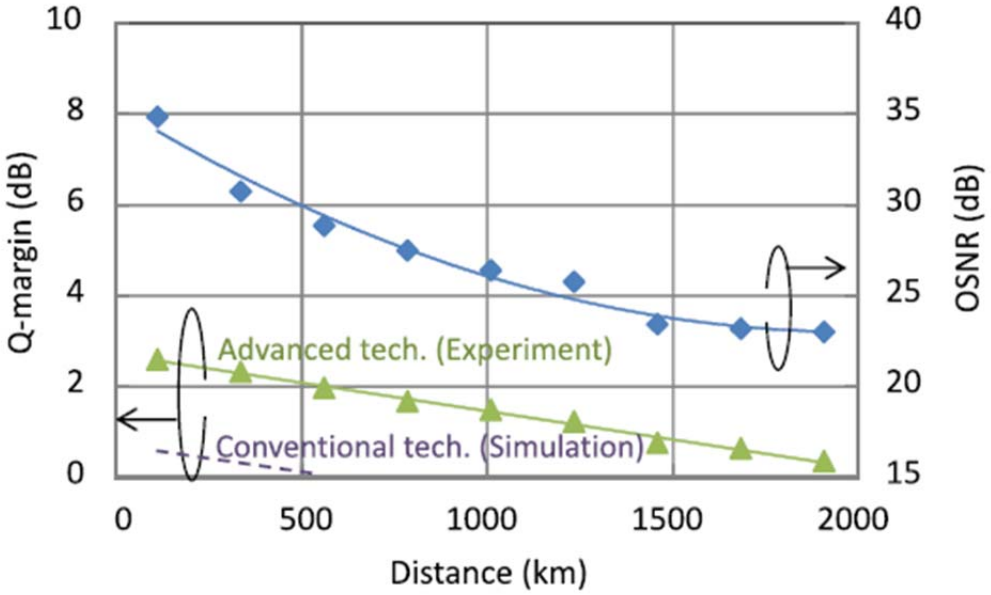


図 2.17: 提案技術を用いた 400Gbps 長距離 WDM 伝送実験結果

SD-FECは、約5.5 dBのQ値を修正して、エラーのない動作を実現できている。

図2.17は、FEC限界値からのQ値マージンと距離に対するOSNRをプロットしたものである。シミュレートされたQファクタマージンは、従来の技術で示されています。～100 kmでの約2.5 dBのQマージンの低下は、主にトランスポンダの最悪のチャネル特性の選択を反映している。測定された信号、1597.189 nmは、最悪のWDMチャネルである。 400 GbpsWDM伝送に関しては、従来の技術では500 kmしか達成されていないが、高度なデジタルコヒーレント技術ではFEC制限で1900 km以上を達成している。

図2.18は、1907 km伝送後の受信側の12チャネルのQ係数マージンとOSNRを示している。最適な入力電力は、-2 dBm/chです。すべてのチャネルがFEC制限を満たし、スペクトルがOSNR要件を満たしていることを確認した。

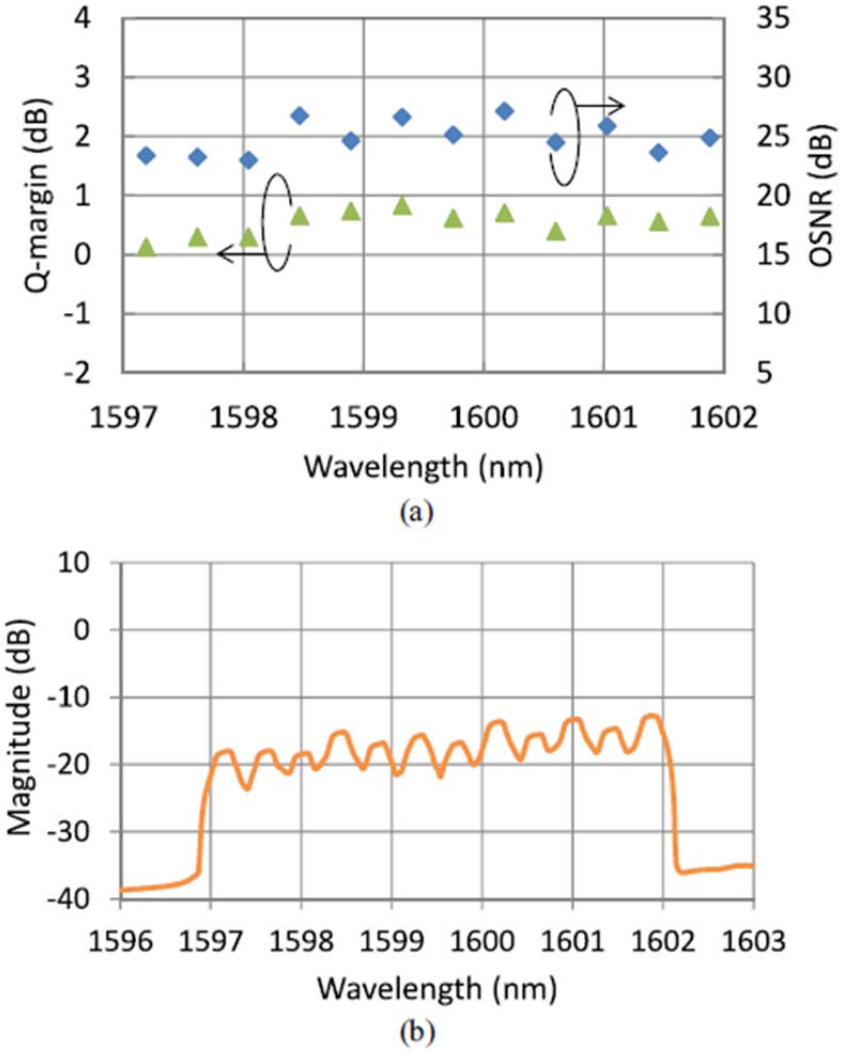


図 2.18: 400Gbps 1900km WDM 伝送実験結果

既存の100GベースのWDM光伝送システムをタイムリーかつ費用対効果の高い方法で強化するために、400 Gbps級のデジタルコヒーレント光伝送技術を開発した。さらに、100 Gbpsを超える信頼性と柔軟性に優れたキャリアグレードの光伝送システムの開発を進めるとともに、フレキシブルグリッド技術[22]、マルチフォーマット、/マルチレートトランスポンダ[23]、MIMO等化技術[24]の使用により、費用対効果の高い特性と低消費電力が実現されると考えている。

2.6 まとめ

信号波形最適化技術は、10Gbpsの2値の強度変調方式を用いた場合における信号波形のデューティーファクタによる伝送特性依存性を明らかにし、デューティーファクタが0.5以下でWDM光伝送特性が改善されることを明らかにした。

従来のデジタル信号処理技術の2倍の性能を提供する世界最先端の400 Gbpsデジタルコヒーレント光伝送技術を使用して、長距離マルチキャリア 400 Gbps伝送を実現した。 適用技術は、デジタル逆伝播信号処理による非線形補償機能とと軟判定SD-FECである。

100Gbpsと400Gbpsの混在光伝送を実施し、400 Gbps光信号の安定した伝送を達成し、400 Gbpsチャネルの追加または削除を行っても、残りの100 Gbpsチャネルに影響を与えないことを確認した。 その結果、世界最高水準となるフィールドトライアルで1900 kmを超える400 Gbpsの信号を達成した。実験では、12波長のWDM実験であるが、さらなる波長数の増加に伴う光ファイバの非線形効果に伴う伝送特性劣化を定量的に見積もり、伝送容量16Tbpsの2サブキャリア400GbpsのWDM光伝送にて商用500km伝送が可能であることを確認し、高速大容量のWDM光伝送方式を確立した。

参考文献

[1] Hideki Maeda, Makoto Murakami, Norio Ohkawa, Takamasa Imai, “Optimization of Signal Pulse Duty Factor in Long-Distance optical Amplifier Systems,” IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 10, No. 8, Aug. 1998.

[2] Hideki Maeda, Kohei Saito, Takashi Kotanigawa, Shuto Yamamoto, Fukutaro Hamaoka, Mitsuteru Yoshida, Masahiro Suzuki, Takeshi Seki, “Field Trial of 400-Gbps Transmission Using Advanced Digital Coherent Technologies,” IEEE J. Lightw. Technol., vol. 35, issue 12, pp. 2494-2499, June 2017.

[3] NTT press release, http://www.ntt.co.jp/news2014/1409e/140904a.html.

[4] B. Lavigne, et al., “400Gb/s Trials on commercial systems using real-time bit-rate-adaptive transponders for next generation networks,” proc. OFC2015, W3E.1 (2015).

[5] Y. R. Zhou, et al., “Real-time gridless 800G super-channel transport field trial over 410km using coherent DP-16QAM,” proc. OFC2014, Tu2B.3 (2014).

[6] A. Pagano, et al., “400Gb/s Real-time trial using rate-adaptive transponders for next generation flexible-grid networks,” proc. OFC2014, Tu2B.4 (2014).

[7] K. Yonenaga, et al., “Field Demonstration of Modulation Format Adaptation based on Pilot-aided OSNR Estimation using 400Gbps/ch Real-time DSP,” proc. OECC2016, TuB2-2 (2016).

[8] E. Yamazaki, et al., “Fast optical channel recovery in field demonstration of 100-Gbit/s Ethernet over OTN using real-time DSP,” Opt. express, vol. 19, no. 14, 13179-13184 (2011).

[9] M. Murakami, T. Takahashi, M. Aoyama, T. Imai, M. Amemiya, M.Sumida, and M. Aiki, “System performance evaluation of the FSA submarine optical amplifier system,” J. Lightwave Technol., vol. 14, pp.2657–2671, Dec. 1996.

[10] T. Naito, T. Terahara, and N. Shimojoh, “128-Gbit/s WDM transmission of 24 5.3-Gbit/s RZ signals over 7828 km using gain equalization to compensate for asymmetry in EDFA gain characteristics,” in OFC’97,1997, pp. 45–46, paper TuJ2.

[11] M. Murakami, K. Suzuki, H. Maeda, T. Takahashi, A. Naka, and N. Ohkawa, “High-speed TDM-WDM techniques for long-haul submarine optical amplifier systems,” Opt. Fiber Technol., vol. 3, no. 4, pp.320–338, 1997.

[12] M. Murakami, H. Maeda, T. Takahashi, N. Ohkawa, and T. Imai, “Transoceanic twelve 10 Gb/s WDM signal transmission experiment with individual channel dispersion-and-gain compensation and prechirped RZ pulse format,” Electron. Lett., vol. 33, no. 25, pp.2145–2146, 1997.

[13] S. Saito, T. Matsuda, and A. Naka, “An analytical signal and noise expression for optical preamplifier receivers and its application,” in OAA’97, 1997, pp. 169–172, paper TuD11.

[14] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic, 1989.

[15] A. Naka and S. Saito, “In-line amplifier transmission distance determined by self-phase modulation and group-velocity-dispersion,” J. Lightwave Technol., vol. 12, pp. 280–287, Feb. 1994.

[16] N. S. Bergano, F. W. Kerfoot, and C. R. Davidson, “Margin measurements in optical amplifier systems,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, pp. 304–306, Mar. 1993.

[17] 前田英樹, “招待講演:400G超大容量光伝送システムの研究開発,”電子情報通信学会技術研究報告PN2019-15, Aug. 2019.

[18] O. Ishida, et al., “Power Efficient DSP Implementation for 100G-and-Beyond Multi-Haul Coherent Fiber-Optic Communications,” proc. OFC2016, W3G.3 (2016).

[19] K. Sugihara, Y. Miyata, T. Sugihara, K. Kubo, H. Yoshida, W. Matsumoto, and T. Mizuochi, “A spatially-coupled type LDPC code with an NCG of 12 dB for optical transmission beyond 100 Gb/s,” proc. OFC2013, OM2B.4 (2013).

[20] T. Koike-Akino, K. Kojima, D. Millar, K. Parsons, Y. Miyata, W. Matsumoto, T. Sugihara, and T. Mizuochi,” Cycle Slip-Mitigating Turbo Demodulation in LDPC-Coded Coherent Optical Communications,” proc. OFC2014, M3A.3 (2014).

[21] T. Hoshida, L. Dou, W. Yan, L. Li, Z. Tao, S. Oda, H. Nakashima, C. Ohshima, T. Oyama, and J.C. Rasmussen, "Advanced and Feasible Signal Processing Algorithm for Nonlinear Mitigation," proc. OFC2013, OTh3C.3 (2013).

[22] M. Jinno, et al., “Elastic and adaptive optical networks: Possible adoption scenarios and future standardization aspects,” IEEE Comm。 Magazine, vol。 49, issue。10, 164-172 (2011)。

[23] T. Ohara, et al., “OTN technology for multi-flow optical transponder in elastic 400G/1T transmission era,” proc. OFC2012, JW2A.8 (2012).

[24] S. Yamamoto, et al., “Compatibility between nonlinear compensation and crosstalk compensation using MIMO processing in super-high-density multi-carrier transmission system,” proc. ECOC2015, Th.2.5.3 (2015).

第3章　超高速 400Gbps/λ 光増幅中継伝送技術

3.1 概要

本章では、さらなる大容量化技術として超高速400Gbps/λ光増幅中継伝送技術として、高ボーレートデジタルコヒーレント光伝送技術、デバイス特性補正技術、および高出力ラマン光増幅技術を用いた超高速大容量波長多重(WDM)光伝送方式について提案する[1]。

モバイルサービス、映画データ配信サービス、クラウドコンピューティングの急増によるデータ通信トラフィックの爆発的な増加に対応して、デジタルコヒーレント光通信を採用したデュアルキャリア400 GbpsWDM伝送システムが開発されている[2,3]。

最近、光通信システムの伝送容量は、デジタル信号処理（DSP）とコヒーレント光伝送の採用により大幅に増加している[4,5]。デジタルコヒーレントテクノロジーは、長距離ネットワーク、メトロネットワーク、短距離ネットワークなどの光リンク、特にデータセンター相互接続に広く適用されている[4,5]。我々は、最近、エルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）と後方分布ラマン増幅器（DRA）を使用して、1,122 kmで500 Gbps/λのPDM-32QAM伝送を実証した[6]。それには、低いファイバ非線形性を有する伝送距離を拡大するために、コア拡大ファイバ（CSF）のDRAが用いるれている[2,6,7]。

本報告では、さらなる大容量化に伴う長距離WDM光伝送システムの課題を克服するため、低い光ファイバ非線形性を有するコア拡大ファイバ(CSF)での高出力ラマン光増幅技術を確立することにより、光ファイバの非線形効果を抑圧しかつ低光増幅雑音による光増幅を実現し、67 Gbaudの高ボーレート400 Gbps/λでの2,019 kmを超えるWDM信号のリアルタイム伝送を実現する。

これは、デバイス周波数特性を補償する技術を具備したDSP-ASICを実装したリアルタイム光トランスポンダによって実現する。

3.2 400Gbps/λ 1,000km WDM 光伝送実験

図 3.1 は、NTT グループの地上リンクを使用したフィールド実験のセットアップを示す。実験装置は建物 A に設置されている。 B 棟では、伝送路をループしている。開発した光トランスポンダは、16 nm CMOS テクノロジーに基づく DSP-ASIC [8]と、IQ 変調器（IQM）、イントラダインコヒーレントレシーバー（ICR）で構成されている。測定された信号は、光トランスポンダで生成されている。 DSP-ASIC から出力される電気信号は、ローカルオシレーター（LO）からの光搬送波出力を使用して、光フロントエンドの IQM によって変調した。周波数 189.3～190.2 THz、波長間隔 87.5 GHz または 100 GHz の 10 の光搬送波は、アレイ導波路（AWG）で多重化された後、DSP-ASIC からの電気信号を使用して IQM によって変調した。 WDM 信号は、信号を無相関化するために 11 km の標準シングルモードファイバ（SMF）に入力されました。測定された信号と WDM 信号は、波長選択スイッチ（WSS）によって多重化される。

伝送ラインは、ITU-T G.654.E（Aeff: 110μm2）に準拠した 18 個の 112.2 km フィールド展開 CSF と 10 個の SMF で構成されている。 WDM 信号は、A 棟と B 棟の間にフィールド展開された CSF または SMF に入力した。B 棟では、伝送線はパッチファイバケーブルのみでループされている。 CSF 伝送リンクの平均光損失、1580 nm での 112.2 km スパンあたり 20.7 dB（0.184 dB / km）には、フィールド展開ファイバ、ケーブル終端フレーム（CTF）、および建物内の融着接続点が含まれます繊維。 SMF 伝送リンクの平均光損失は、11.2 km スパンあたり 22.6 dB であった。各 112.2 km スパンにわたる WDM 信号伝送後、EDFA と 1460 および 1480 nm ポンプレーザーを使用した後方 DRA によって光損失を補償した。 EDFA と逆方向 DRA を組み合わせた実効雑音指数（NF）は、約-2.5 dB であった。 WDM 信号帯域幅（BW）でフラットなラマンゲインが得られることを確認した。ポンプ波長を適切に設計することにより、フィールド展開ファイバでフラットなラマンゲインスペクトルを実現しました。 WDM 信号で測定された信号は、フィールドに展開された光ファイバリンクを通過した後、光バンドパスフィルター（OBPF）によってフィルター処理された。次に、リアルタイムトラ

ンスポンダの光 LO を備えた ICR によって、測定信号はコヒーレントに検出された。偏光のアライメントと残留分散補償は、RDE(radius directed equalizer)アルゴリズムを備えた適応等化器（AEQ）によって実現されている。次に、主信号は、ビタビおよびビタビ位相推定（VVPE）メソッドによって信号位相を補正するキャリア位相回復に進む。イコライズされた信号は、信号デマッパーによって複素式からバイナリ式に変換される。その後、バイナリシーケンスは、約 20%の冗長性を備えた硬判定と軟判定の前方誤り訂正（FEC）で修正される。それは、空間結合型不規則低密度パリティチェック（LDPC）とリードソロモン(RS)符号およびパイロットサイクルスリップ緩和法[9]を組み合わせている。FEC リミット値は、約 5.7dB である。

トランスポンダは、400 Gbps /λ のデュアルキャリア PDM 67-Gbaud 16QAM 信号を実現するように設定した。ラマン増幅を使用するために、光ファイバ接続が過度の反射を示さないことを光時間領域反射率計（OTDR）で確認した。

この実験では、400G/ λ 信号のバックツーバックトランスポンダのパフォーマンスを測定しました。図 3.2 は、400 Gbps 67-Gbaurd PDM-16QAM 信号の送受対向特性を示す。Q マージンは、前方誤り訂正（FEC）リミットの Q ファクタ(ビットエラーレートから算出)からの差として定義する。中心キャリア周波数で測定された信号は、189.7 THz に設定しました。 光信号対雑音化比(OSNR)の帯域幅は、400 Gbps/ λ 信号の場合 0.1 nm である。

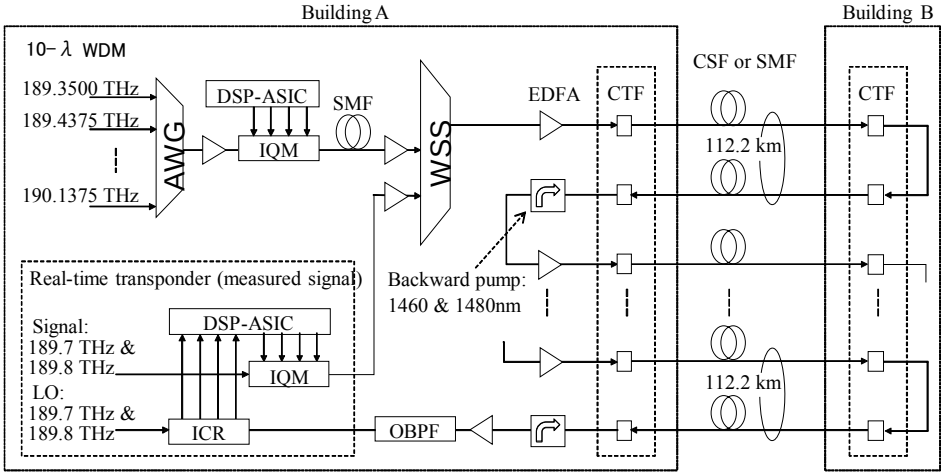


図 3.1: 実験系

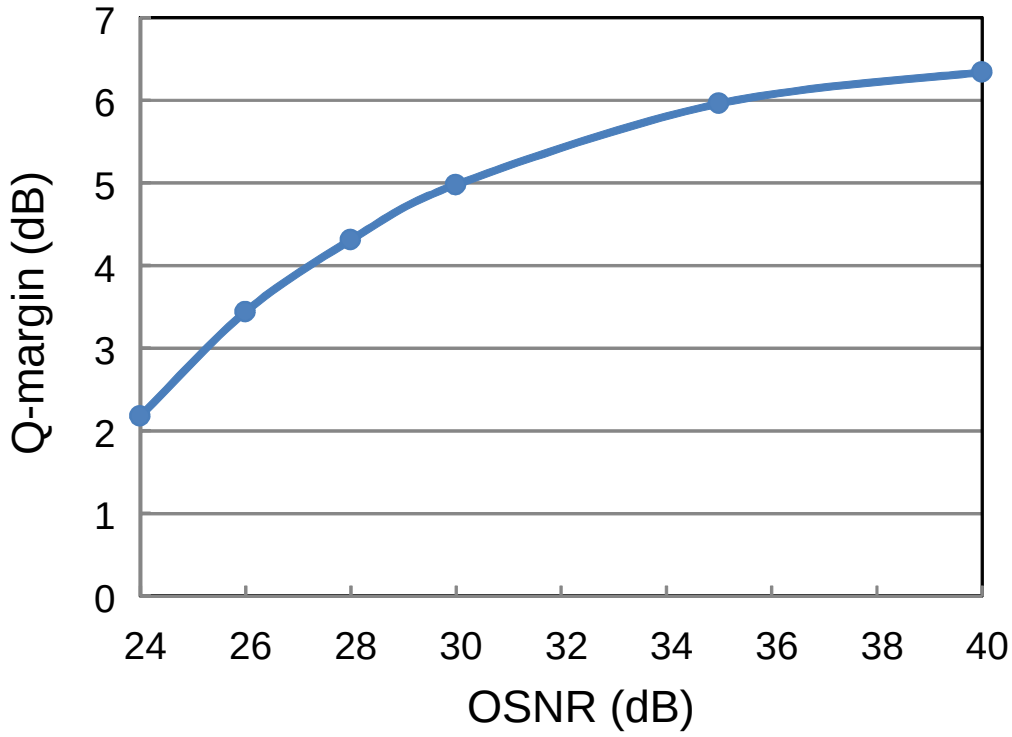


図 3.2:　400 Gbps/λ　Back-to-Back 特性

3.2.1　高ボーレートデジタルコヒーレント光伝送方式およびデバイス周波数特性補正技術

複数のアプリケーションをサポートするという最近の要求に応えるため、DSPはマルチレートおよびマルチ変調フォーマットをサポートする必要がある。たとえば、最新のDSP-ASICは、図3.3に示すように、偏波分割多重(PDM)を適用した32 Gbaudベースの100 Gbps/λ　直交位相シフトキーイング（QPSK）、150 Gbps/λ　直交振幅変調（8QAM）、および200 Gbps/λ　16QAM信号をサポートしているが、多値数が多くなるほど、要求されるOSNRが高くなる。キャリアあたり400 Gbpsを超える容量を実現するには、シンボルレートが64 Gbaudを超え、変調次数が16を超える必要がある。このため、400 Gbps/λ信号を実現するために、16nmプロセスを用いた最新のDSPを採用し、67 Gbaud PDM-16QAM WDM信号のリアルタイムトランスポンダを開発した。

トランシーバー内のデバイスの不完全性によって引き起こされる線形周波数応答は、リアルタイムトランスポンダの送信機（Tx）および受信機（Rx）デバイスコンポーネントの両方によって引き起こされる。 DSP-ASICには、それぞれDSP-ASICの有限インパルス応答（FIR）フィルタの固定イコライザーを使用して、TxおよびRx周波数応答を補正するキャリブレーション機能がある。 DSP-ASICイコライザーは、TXおよびRXの周波数特性を補正する。正確な較正方法については、文献[10]で述べられている。この機能は、TxおよびRx周波数応答の振幅成分を個別に補償することで、送信機でのピークパワーの不要な増加と受信機でのノイズ増加を削減できる[10]。

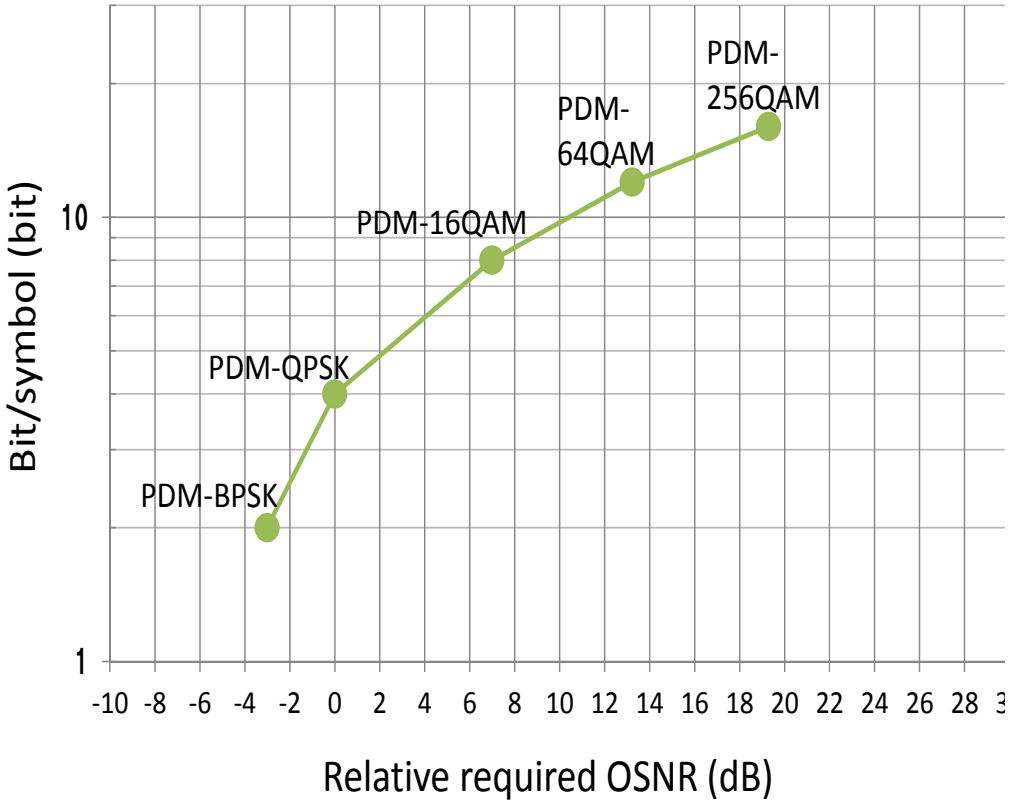


図 3.3　多値変調特性

3.2.2　高出力ラマン光増幅技術

図3.4は、測定されたラマンゲインをSMFとCSFでプロットした。レーザー出力の安全要件を満たすため、ラマンポンプの光出力制限とシャットダウン時間の関係は、式

(1)に示す。これは、安全規格IEC 60825-2に準拠している。 商用DRAシステムに関する安全対策とガイドラインは、文献[11]にて述べられている。 実験で使用したラマン増幅器のシャットダウン時間は1 [s]であるため、最大ラマン光パワーは0.9 W以下に設定する必要がある。

$$P_{\text{limit}} = \frac{\pi d(t)^2 \cdot MPE}{4t} \times \frac{1}{1-\exp\left[-0.125\left(\frac{\pi \omega_0 d(t)}{\lambda \cdot NOHD}\right)^2\right]} \qquad (1)$$

ここで、d(t)は放射照度が中心ピーク値の1 / eに低下する指定距離での最小円の直径、MPEは最大許容露光、ωoはシングルモード光ファイバのモードフィールド径、λは波長、NOHDは公称眼障害距離である。

また、ポンプ出力またはラマンゲインが増加すると、レイリー散乱によってより多くのノイズが誘導される[12]。 したがって、ラマンゲインが11dBになるようにポンプ光を設定しました。 11 dBのラマンゲインを得るために、CSFおよびSMF伝送のラマンポンプパワーは、それぞれ800 mWおよび550 mWに設定した。

図3.5は、87.5 GHzグリッドを使用したSMFおよびCSFの400 G/λWDM伝送パフォーマンスを示す。 中心キャリア周波数で測定された信号は、189.7 THzに設定した。この図は、CSFの100 GHzグリッドも示す。CSFの伝送性能は、SMFの伝送性能よりも優れていることを確認した。Qペナルティは、同じOSNRでの送受対向特性と送信後のQファクターの差として定義する。CSFのEDFAと後方DRAの組み合わせ、およびデバイスの不完全性補償技術を備えたリアルタイムトランスポンダにより、CSFとSMFの両方で1,000キロメートルを超える400Gbps/λWDM伝送を達成した。1,120 kmの距離での伝送ペナルティは、周波数グリッドを100 GHzから87.5 GHzに狭めることでわずか0.2 dBに抑えられた。

図3.6は、87.5 GHzグリッドのWDM信号電力のQペナルティを示しています。 SFMと比較して、CSFはより大きな信号入力電力Pinを許容した。 最適な入力電力は2.5 dBmでした。 この結果から、100 GHzグリッドのWDM伝送は、適切なQマージンを

確保しながら伝送距離をさらに延長するのに適していることを確認した。

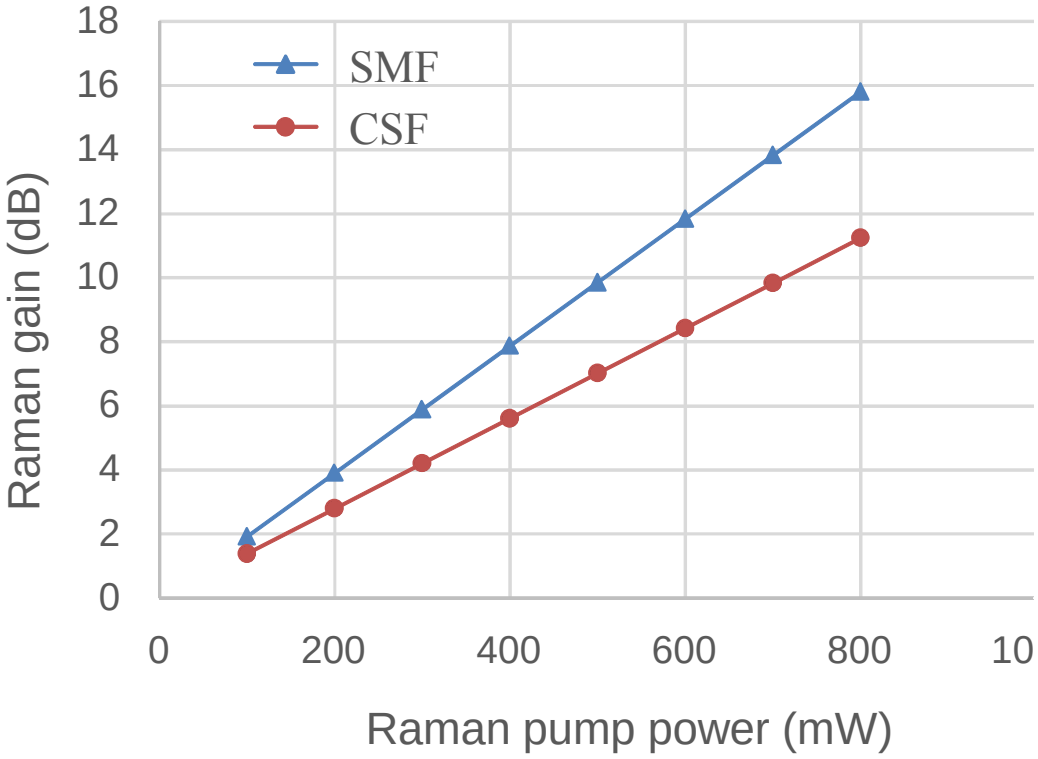


図 3.4　ラマンポンプ光パワーとラマンゲインの関係

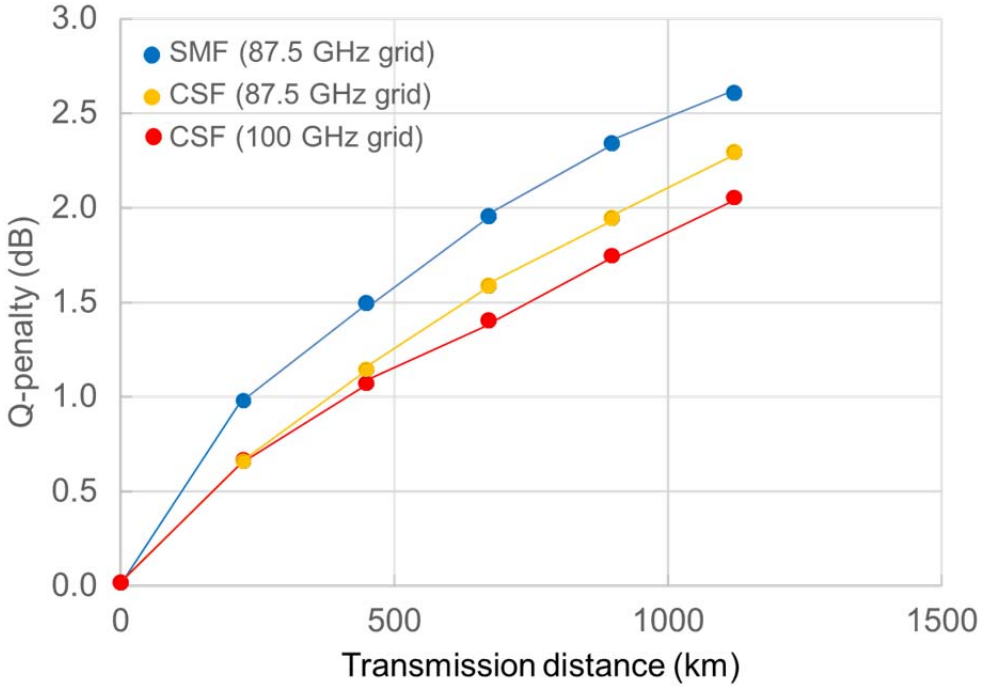


図 3.5　400Gbps/λの 1000km 伝送特性（SMF、CSF）

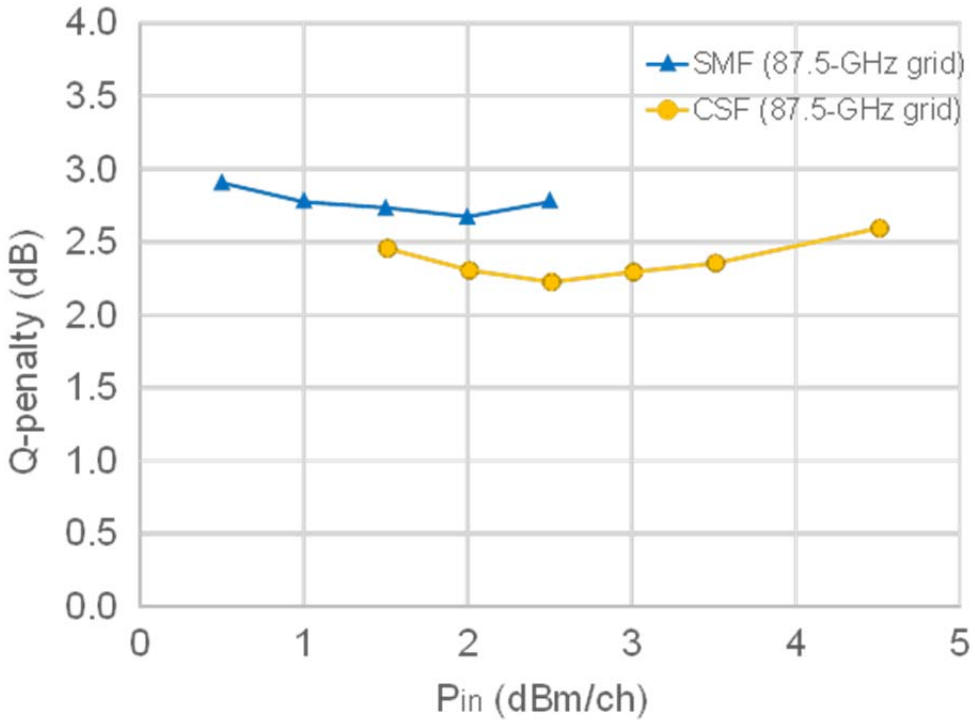


図 3.6　ファイバ入力パワーと Q ペナルティの関係

3.3 400Gbps/λ 2,000km WDM 光伝送実験

図3.7は、CSF内に100 GHzグリッドを備えたWDM信号の中心キャリア周波数189.7および189.8 THzでのネットデータレート400 Gbps/λ PDM-16QAMの伝送性能をプロットしている。 2,019 kmの伝送実験では、最適なファイバ入力パワーは2.0 dBm/キャリアであった。 後方分布ラマン増幅器のゲインは、112 kmのスパンごとに11 dBに設定した。 Qファクタマージンは、FEC制限（約5.7 dB）と送信後のQファクタの差として定義した。 2019 kmの伝送後でも、トランスポンダに必要なOSNRが5 dBを超える十分なOSNRが得られ、QマージンとQペナルティはそれぞれ1.3 dBと3.0 dBでした。 伝送後のWDM信号スペクトルとx / y偏波信号のコンスタレーションは、図3.8に示すように劣化は見られなかった。これにより、フィールド環境でのリアルタイムのエラーのない伝送が確認された。

図3.9は、2,019 km伝送後の長期安定性試験結果を示しています。 測定信号の搬送周波数、189.7および189.8 THzは、WDM信号の中心です。 信号性能は、1分の間隔で60分間連続的に測定されました。 FECの前のQマージンはゼロ以上であり、各測定でFEC後のBERにエラーがないことも確認しました。 信号は、2,019 kmにわたって安定して送信され、Q係数の変動は0.2 dB以下であった。

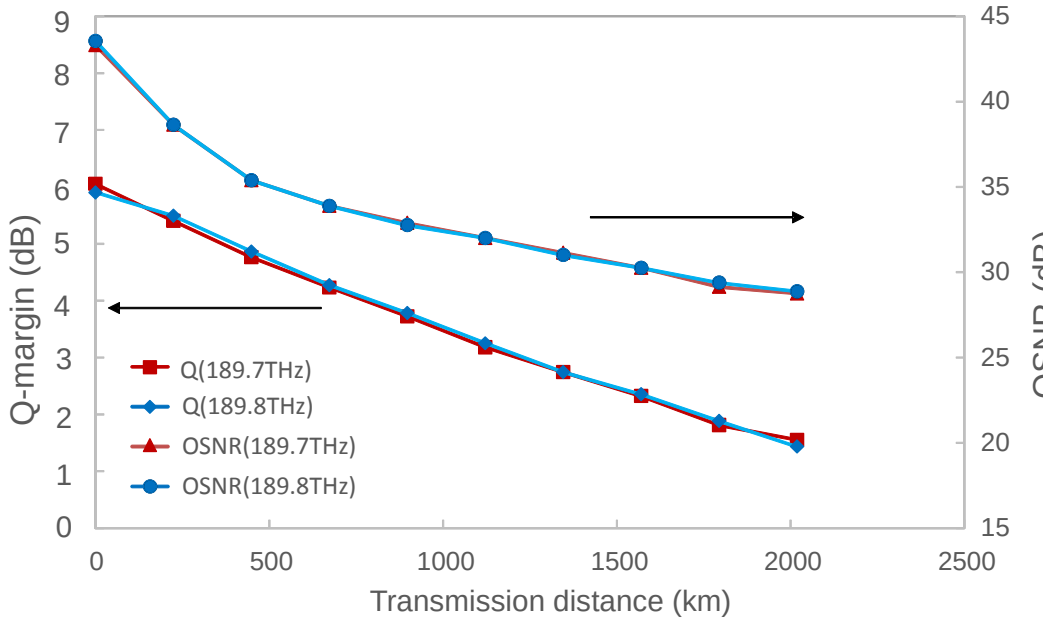


図 3.7: 400 Gbps/λ 2,000kmWDM 伝送結果

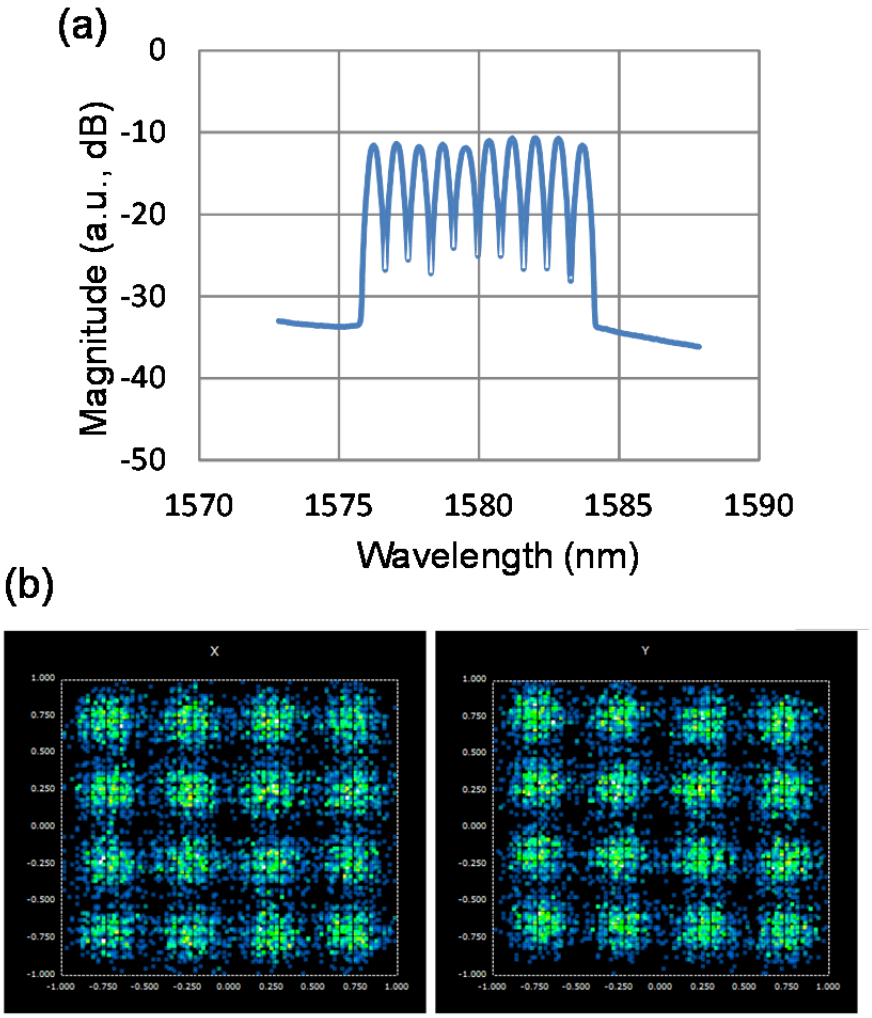


図 3.8　2,000km 伝送後のスペクトルとコンスタレーション

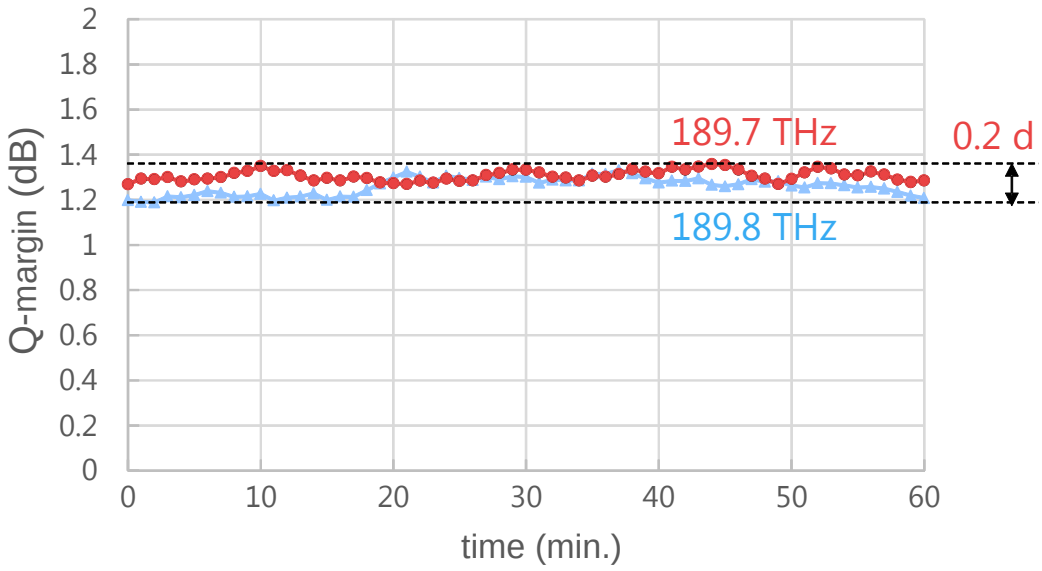


図 3.9　長期安定度試験

3.4 まとめ

超高速400 Gbps/λの67 Gbaud PDM-16QAM WDM信号を実装したリアルタイムトランスポンダを使用して、フィールドに設置された地上ITU-T G.654.Eリンクで2,019 kmの伝送距離を初めて実証した。これは、デバイス特性補償技術ならびに、112.2 kmのフィールド展開ITU-T G.654.Eファイバ、レーザー出力の安全要件に準拠した後方DRAおよびEDFA技術により達成されている。リアルタイムトランスポンダは、16 nm CMOSテクノロジーに基づく統合DSP-ASICを使用した。実用化を可能にする安全なレベルのラマン光パワーを実現する点で、CSFは400 Gbps/λ WDM伝送においてSMFよりも優れていることを示しました。また、WDM条件でのフィールドファイバ伝送で安定した信号性能を実証した。実験では、10波長のWDM実験であるが、2,000km伝送後も十分なマージンがあることからさらなる波長数の増加が可能であり、今後、波長間隔の狭窄化、マ

ルチバンド適用も含めて、伝送容量40 Tbps以上の400 Gbps/λWDM伝送の500km伝送商用化の実用化を目指す。

参考文献

[1] Hideki Maeda, Kohei Saito, Takeo Sasai, Fukutaro Hamaoka, Hiroki Kawahara, Takeshi Seki, Takeshi Kawasaki and Junichi Kani, “Real-time 400 Gbps/carrier WDM transmission over 2,000 km of field-installed G.654.E fiber,” Optics Express, vol. 28, no. 2/20, pp. 1640-1646, January 2020.

[2] H. Maeda, K. Saito, T. Kotanigawa, S. Yamamoto, F. Hamaoka, M. Yoshida, S. Suzuki, and T. Seki, “Field Trial of 400-Gbps Transmission Using Advanced Digital Coherent Technologies,” IEEE J. Lightw. Technol., vol. 35, No. 12, pp. 2494-2499 (2017).

[3] Lavgne, O. Bertran-Pardo, C. Bresson, M. Lefrancois, E. Balmefrezol, M. Le Monnier, and L. Suberini, “400 Gb/s Real-Time Trials on Commercial Systems for Next Generation Networks,” IEEE J. Lightw. Technol., vol. 34, No. 2, pp. 477-483 (2016).

[4] S. Okamoto et al., “400 Gbit/s/ch Field Demonstration of Modulation Format Adaptation Based on Pilot-Aided OSNR Estimation Using Real-Time DSP,” IEICE Trans. Commun., vol. E100-B, no. 10, pp. 1726–1733 (2017).

[5] Y. Loussouarn et al., “Multi-Rate Multi-Format CFP/CFP2 Digital Coherent Interfaces for Data Center Interconnects, Metro, and Long-Haul Optical Communications,” J. Lightw. Technol., vol. 37, no. 2, pp. 538–547 (2018).

[6] F. Hamaoka, T. Sasai, K. Saito, T. Kobayashi, A. Matsushita, M. Nakamura, H. Taniguchi, S. Kuwahara, H. kawahara, T. Seki, J. Ozaki, Y. ogiso, H. Maeda, Y. kisaka, and M. Tomizawa, “Dual-Carrier 1-Tb/s Transmission Over Field-Deployed Large-Core Pure-Silica-Core Fiber Link Using Real-Time Transponder,” in OECC2019, PDP.1.

[7] S. Shen et al., “G.654.E Fibre Deployment in Terrestrial Transport System,” in Optical Fiber Communication Conference (Optical Society of America, 2017), M3G.4.

[8] O. Ishida, K. Takei, and E. Yamazaki, “Power Efficient DSP Implementation for 100G-and-Beyond Multi-Haul Coherent Fiber-Optic

Communications," in Optical Fiber Communication Conference (Optical Society of America, 2016), W3G.3.

[9] T. Koike-Akino, K. Kojima, D. Millar, K. Parsons, Y. Miyata, W. Matsumoto, T. Sugihara, and T. Mizuochi," Cycle Slip-Mitigating Turbo Demodulation in LDPC-Coded Coherent Optical Communications," proc. OFC2014, M3A.3 (2014).

[10] A. Matsushita, M. Nakamura, F. Hamaoka, S. Okamoto, and Y. Kisaka "High-Spectral-Efficiency 600-Gbps/Carrier Transmission Using PDM-256QAM Format," IEEE J. Lightw. Technol., vol. 37, No. 2, pp. 470-476 (2019).

[11] T. Matsuda, and A. Naka, "Operational Issues Facing Commercial Raman Amplifier System: Safety Measures and System Designs," IEEE J. Lightw. Technol., vol. 34, No. 2, pp. 484-290 (2016).

[12] H. Suzuki, N. Takachio, H. Masuda, and K. Iwatsuki, "Super-Dense WDM Transmission Technology in the Zero-Dispersion Region Employing Distributed Raman Amplification," IEEE J. Lightw. Technol., vol. 21, No. 4, pp. 973-981 (2003).

第4章　WDM 光トランスポートシステムの光合分波器および光監視信号による伝送特性劣化とその抑圧技術

4.1 概要

トラヒック変動に応じて、ネットワークを動的に変化させるためには、ポイントトウポイントの波長多重システムでは困難である。このため、光クロスコネクト装置(OXC)、光分岐挿入装置(OADM)等を用いて波長多重(WDM)光信号をアド･ドロップもくしは、クロスコネクトすることでネットワークの変動に対応させることができる[1,2]。OXCおよびOADMは、主に光分波器、光SW、光合波器で構成される。光分波器および光合波器は、AWG(Arrayed Waveguide Grating)等が用いられ、これは光フィルタの特性を有しており、WDM主信号の光スペクトルを狭窄化するため伝送特性劣化の可能性がある。

ポイントトウポイントのWDMシステムおよびOXC等を用いたWDMネットワークシステムは、WDM端局装置、光増幅装置等の監視のためWDM主信号とは別波長の光監視信号が用いられる。異なるビットレートの信号光を多重伝送すると高速側の信号光に伝送特性劣化が生じることは知られているが[3,4]、数Mbps程度のOSCが高速のWDM信号光に影響を与えることは知られていない。

本章では、波長多重光ネットワークにおいて、OXC、OADMの光合分波器による伝送特性劣化のメカニズム[5,6]、ならびに、伝送特性劣化を改善する新規のOXC構成技術について提案する[7,8]。さらに、長距離WDM伝送実験により、提案のOXCの効果を実証する。また、システム化において必須となる光監視信号がWDM主信号に与える影響を実験ならびにシミュレーションにより評価し、光監視信号の信号パターン依存性、ならびにパワー依存性がある

ことを実験、シミュレーション明らかにする[9]。これらの結果から波長多重光伝送システムのシステム設計指針について言及する。

4.2 WDM 光トランスポートシステムにおける光合分波フィルタによる伝送特性劣化

WDM、OXC、およびOADMは、柔軟な光ネットワークを実現するための重要な技術である[1]。一般的な波長合分波フィルタを用いたOADM、OXCの構成を図4.1、図4.2に示す。

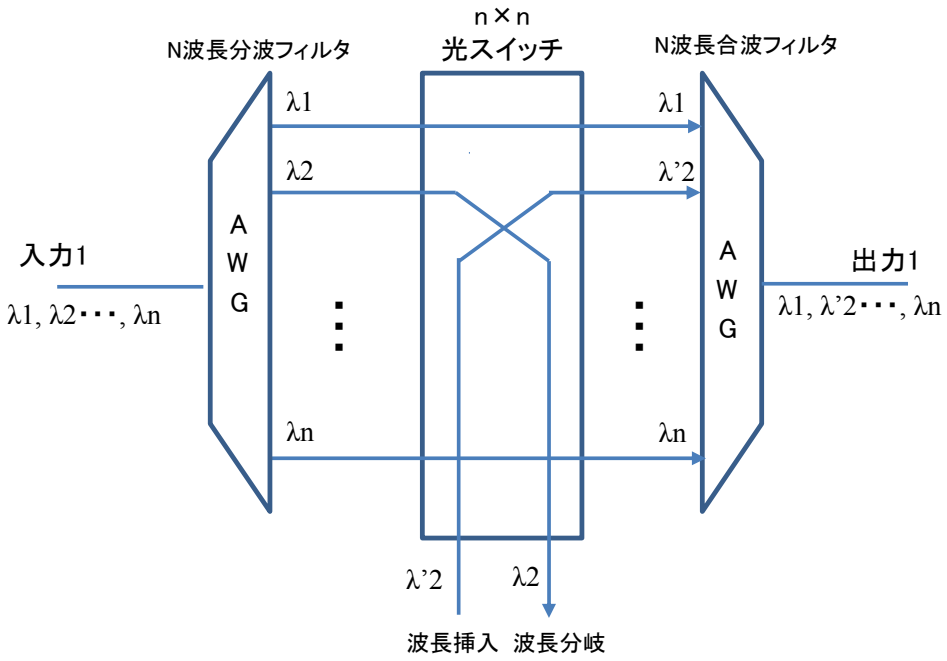


図 4.1: 一般的な OADM 装置の構成

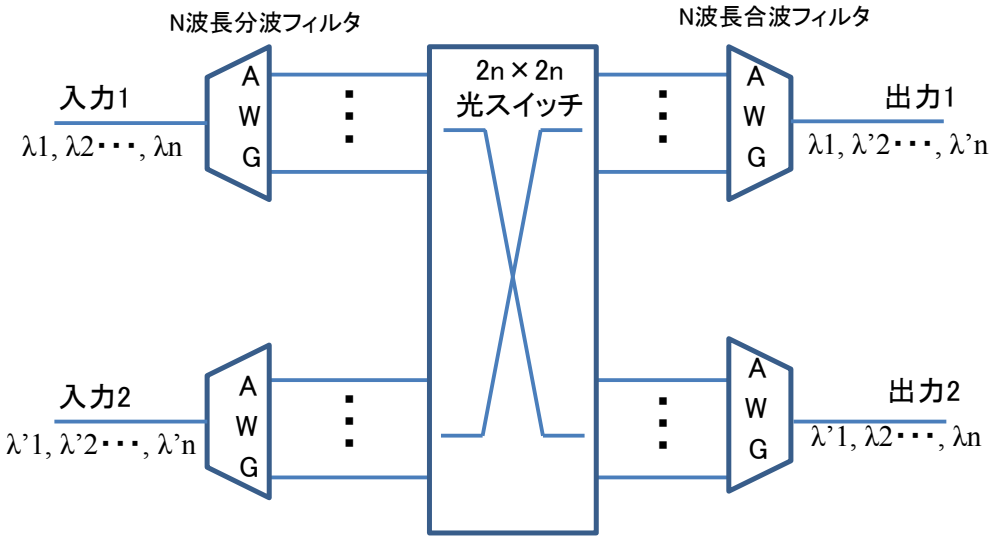


図 4.2: 一般的な OXC 装置の構成

OXCおよびOADMは、主に光合波器、光分波器、および光スイッチで構成される。光合波器および光分波器これは光フィルタの特性を有しており、WDM主信号の光スペクトルを狭窄化するため伝送特性劣化させる[10-14]。ただし、光合分波フィルタを介した光信号の伝送特性劣化は、最大約1000 kmの伝送距離でしか研究されていない[10-12]。数千キロメートルをカバーする長距離光WDMネットワークでは、ファイバの非線形性に起因する光信号のスペクトル拡大が発生するため、光合分波フィルタの影響を詳細に調べる必要がある[15]。

この章では、周回実験系にて4,000 kmを超える10 Gbps 8チャネルWDM伝送を確立することにより、光合分波フィルタを持つADM装置を介した光信号特性を実験的に評価する。WDM主信号の電気信号対雑音比（SNR）の特性は、ADM装置の挿入距離と挿入間隔、および光信号波長の波長間隔に依存することを示す。

図4.3に周回伝送実験系を示す。新規の周回実験系構成を使用して、OADM装置による影響を実験的に評価した。 周回実験系では、2×1光スイッチとファイバカップラーで構成される光信号経路機能を持つ。その一方の経路に、OADMをシミュレートした光合部波フィルタの一対のAWGフィルターを配置した。これにより、OADM装置の挿入位置または間隔を変更することが可能となる。 AWGフィルタの波長間隔

と3 dB帯域幅は、それぞれ0.8 nmと0.4 nmであった。530 kmの周回ループは、10個の50 km分散シフトファイバ（DSF）、30 kmのシングルモードファイバ（SMF）、そしてエルビウム添加ファイバンプ（EDFA）、および光ゲイン等化器で構成した。送信WDM信号は、0.8 nm間隔の8チャネルWDM信号とし、10 Gbs のノンリターントゥゼロ（NRZ）データで強度変調した。データパターンは、光受信機の低周波応答が悪いために2^7-1の擬似ランダムビットシーケンス（PRBS）を使用した。DSFスパンの平均分散値1 ps/nm/ kmの累積分散は、ループ端のSMF（17 ps / nm / km）によって補償した。

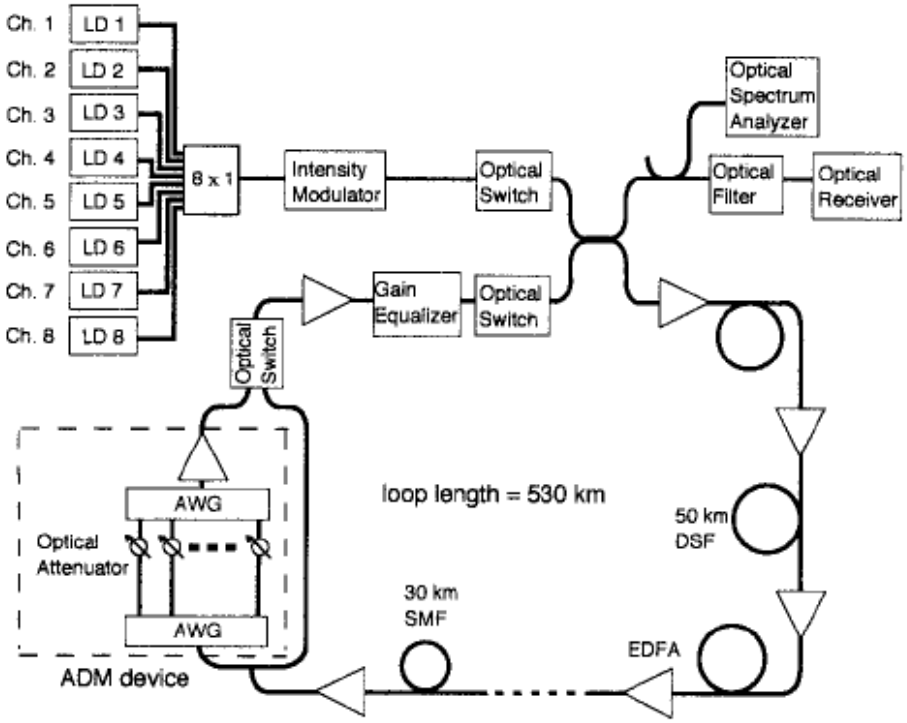


図 4.3: 周回伝送実験系

平均ゼロ分散波長は1552.0 nmであった。EDFAの雑音指数と光出力は、それぞれ5.2 dBと6 dBm（3 dBm/ch）であった。伝搬後、WDM信号は帯域幅0.4 nmの光バンドパスフィルターを通過し、分散スロープ（0.07 ps/nm^2/km）による累積分散は、光受信機内の分散補償ファイバ（DCF）によって補償した。電気SNRは、受信機のしきい値レベルをスイープし、ビット誤り率（BER）を測定することで求めた[16-18]。

図4.4は、伝送距離と累積分散の関係を示す。長波長のチャネル（チャネル＃5～8）は、平均異常分散領域に配置されている。

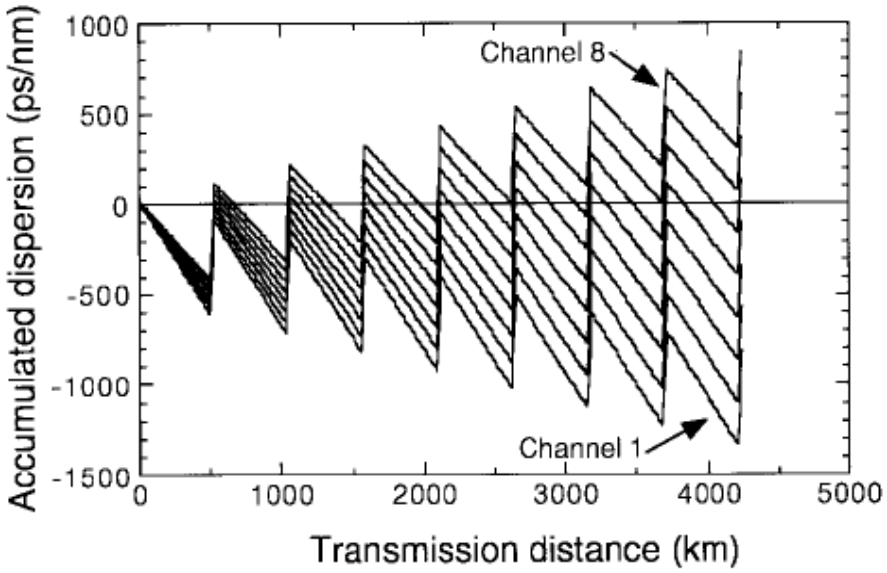


図 4.4: 伝送距離と累積分散の関係

図4.5は、4240 kmで測定した各チャネルの電気SNRを示す。白丸は、ADM装置が無い場合、黒丸は530 km間隔で挿入した場合（伝送ラインに7つのADM装置に相当）の結果である。これに対応する光学スペクトルを図4.6（a）および（b）に示す。

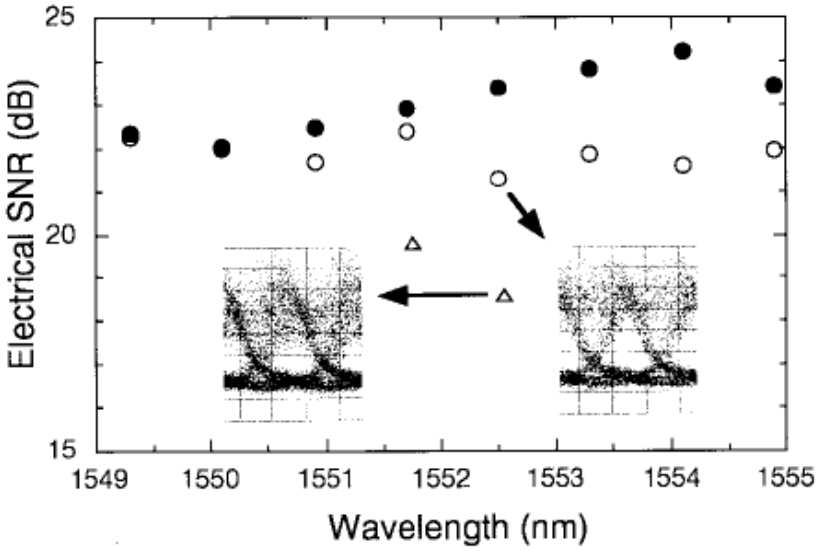


図 4.5: 4,240km 伝送実験結果

ADM装置を挿入しない場合、長波長チャネル（チャネル＃5～8）は、短波長チャネル（チャネル＃1～4）と比較して優れたSNRを示した。図4.4に示す分散配置により、長波長側ではファイバの分散と非線形性の複合効果により信号パルスが圧縮される。したがって、これらのチャネルのSNR特性は向上した。ただし、図4.6（a）で観察されたように、長波長チャネルの光信号スペクトルは広がっていることに注目する必要がある。

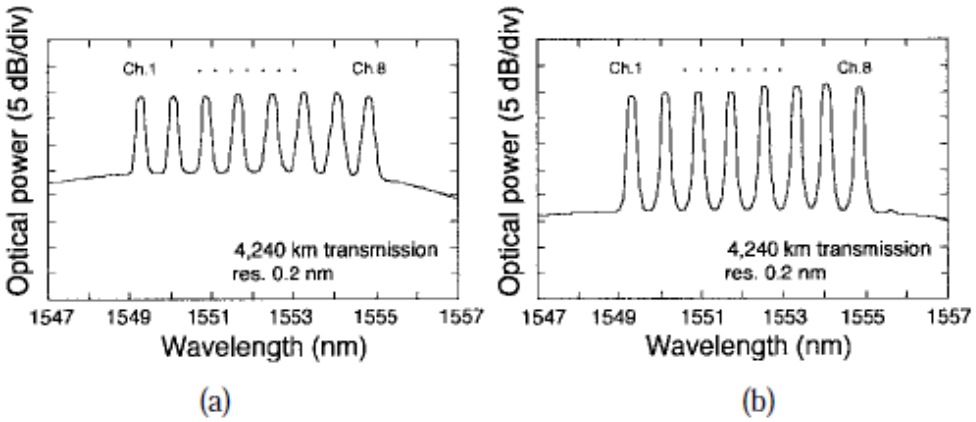


図 4.6: 4240km 伝送後の光スペクトル

周期的なADM装置の挿入により、長波長で約2 dBのSNR劣化が生じたが、短波長での劣化はほとんど無視できる程度であった。図4.6(b)は、多段接続ADM装置の狭帯域フィルタリング効果を示している。この効果により、スペクトルの広がりが生じる長波長チャネルのSNRが低下する。図4.6(b)はノイズレベルの低下を示しているが、AWGフィルタ内の光ノイズは光信号とともにADM装置を通過するため、実際のSNRはADM装置の挿入によって改善されないことに注意する必要がある。

図4.5の白三角は、チャネル4、もくしはチャネル5をAWGフィルタの中心波長から0.05nm離調したときのSNRを示している。どちらの場合も、約2.5 dBのSNR劣化が生じた。光信号の波長の離調による波形歪みについては、文献[2]で述べられている。

図4.7は、単一のADM装置、もしくは複数の等間隔のADM装置を挿入したチャネル5の4240 kmのSNR測定結果を示す。横軸は、単一のADM装置の位置(L_{ADM})または周期的なADM装置の挿入間隔(L_{ADM}-period)を示す。たとえば、L_{ADM} = 530、2120、および3180kmに単一のADM装置を挿入すると、それぞれ0.2、0.2、0.6 dBのSNR劣化が発生した。このSNRの劣化は、基本的にAWGフィルタの帯域制限から生じ、光送信機からADM装置までの距離が長くなるにつれて増加する。これは、伝送距離の関数である光信号のスペクトルの広がりによるものである。光信号のパワーが増加すると、光スペクトルの広がりがより顕著になる[8]。チャネル5の光信号波長を僅か0.05 nm離調すると、SNRの劣化は0.3、0.7、2.2 dBと増加した。これは、

ADM装置を光送信機から遠くの距離に挿入すると、光信号の波長離調に対するシステムの耐性が低下することを示している。

$L_{ADM\text{-}}$period = 530および1060 kmでADM装置を定期的に挿入すると(伝送ラインに7つおよび3つのADM装置を挿入)、それぞれ2.1および11dBのSNR劣化が生じた。この劣化は、ADM装置を多段接続接続することによって生じるAWGフィルタの狭帯域フィルタ特性のためである。0.05 nmの光信号波長離調は、上記のADM装置間隔でそれぞれ4.8および2.4 dBのSNR劣化を生じさせた。 複数のADM装置を多段接続接続すると、SNRのパフォーマンスが大幅に低下する。これは、伝送路におけるADM装置の数が重要なパラメータであることを意味する。ADM装置の多段接続によるSNRの低下は、単一のADM装置によるSNR劣化の単純な累積よりも大きくなる。この原因は、ファイバの非線形性によって引き起こされる光信号のスペクトルの広がりによるものである。

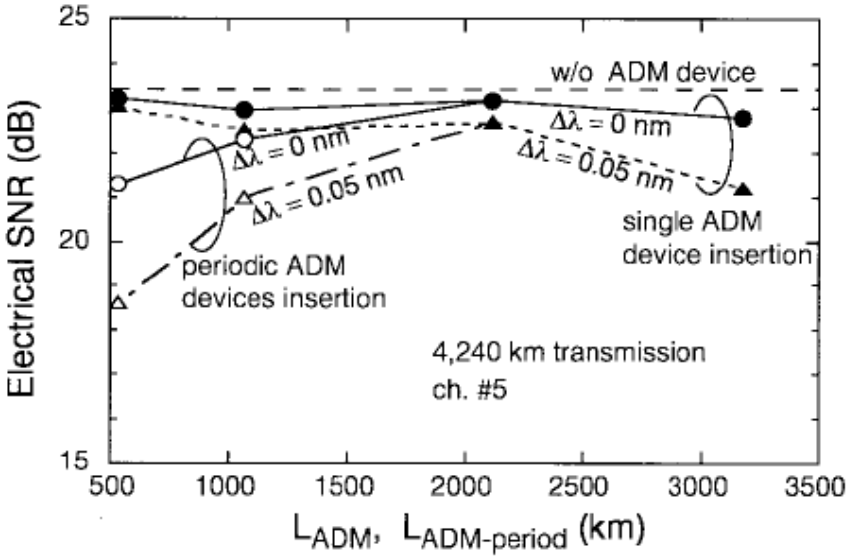


図 4.7: OADM 挿入間隔と電気 SNR の関係

ADM装置を通過した光信号のSNR劣化を、4000 km 10 Gbs 8チャネルWDM伝送実験により評価した。新規の周回実験系を構成を使用し、ADM装置の挿入位置と挿入間隔を変更し評価した。単一のADM装置が光受信機の近くに挿入された場合、またはADM装置の挿入間隔が小さい場合、SNR劣化が顕著であった。この劣化を顕著にさせる別の要因は、光信号の波長離調である。これらの結果は、長距離伝送

に伴う光ファイバの非線形効果による光信号のスペクトルの広がりが、光合分波器の帯域幅制限によって引き起こされるSNR劣化を悪化させることを示している。

4.3 広いフラットな信号通過帯域を有する光合分波技術

WDM伝送を用いる光ネットワークでは、OXCとOADMが、柔軟で信頼性の高いネットワークを実現する上で重要な役割を果たす[1]。異なるファイバ間でWDMチャネルを切り替えが可能なOXCは、ネットワーク障害後のネットワーク復元をサポートし、ネットワークトラフィックパターンを需要の変化に適応させることができる。従来のOXCは、光合波器、光分波器および光スイッチで構成される。従来のOXCの光合分波器は帯域内フィルターとして機能するため、帯域幅の制限と位相応答が伝送特性を劣化させる[19,20]。多段接続されたOXCは、各波長チャネルの通過帯域をより狭くする[19]。OXCを使用する長距離光ネットワークでは、このようなシステムでは自己位相変調（SPM）や相互位相変調（XPM）などの光ファイバの非線形性効果による光信号のスペクトル拡大が発生するため、伝送パフォーマンスの低下はさらに大きくなる[4]。

本章では、長距離光ネットワークで広く平坦な通過帯域を有する2×2 OXCを提案する。光経路切替型周回実験系[4]で4000 kmを超える10 Gbps 8チャネルWDM伝送を確立することにより、提案されたOXCおよび従来のOXCを通過する光信号の特性を実験的に評価する。結果、提案されたOXCが、多段接続接続性が高く、長距離伝送における光スペクトルの広がりに対する耐性があることを明らかする。

4.3.1 提案方式の概要

図4.8に、広信号通過帯域2×2 OXCを示す。これは、2個の1×2波長選択スイッチ[21]、2個の光カプラ(PC)を用いることにより実現される。提案のOXCは、ノンブロッキングなOXCであり、8波長のクロスコネクトとして動作する。1×2波長選択スイッチは、広いフラットな信号通過帯域を持つためのキーデバイスであり、通過信号に対する光フィルタリング効果を非常に小さくすることができる。1×2波長選択スイッチは、1個の光パワースプリッタ(PS)と、波長数分の2×2光スイッチとFBG(ファイバグレーティング)と連続接続により構成される。

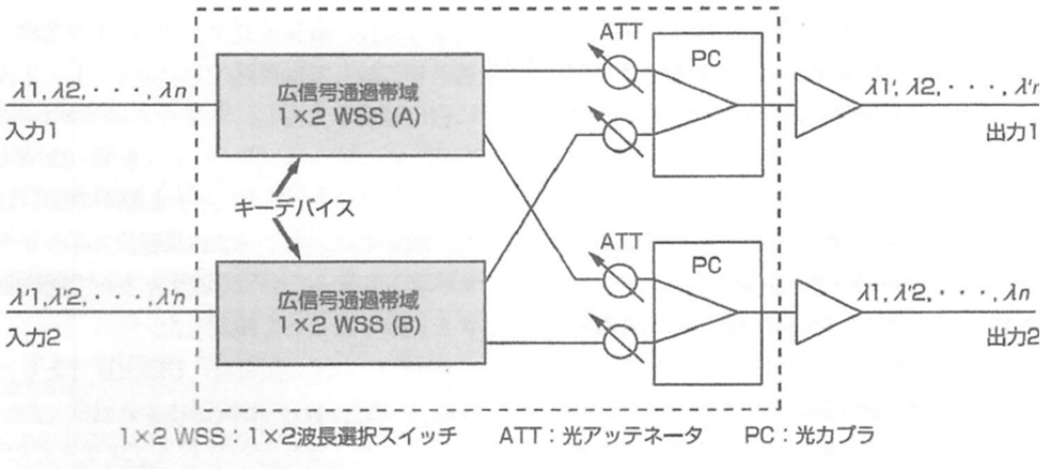


図 4.8: 提案の光クロスコネクト装置

動作を説明するために、3波のWDM信号を、出力1にλ2、出力2にλ1、λ3と波長選択する場合を図4.9に示す。

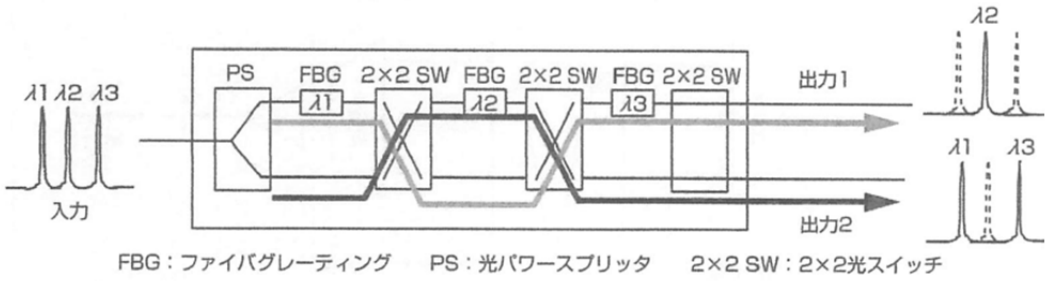


図 4.9: 提案の光クロスコネクト装置の原理

1×2波長選択スイッチに入力されたWDM信号は、PSにより2分割され、2×2光スイッチに入力される。ここで、各2×2光スイッチの片方の入力にはFBGが接続されており、本FBGはWDM信号の1つの信号波長を遮断するために用いられ、通過信号に対して帯域遮断フィルタとして動作する。第1、第2番目の2×2光スイッチの設定をクロス、第3番目の2×2光スイッチの設定をバーとすることにより、波長選択する信号波長を遮断するFBGをバイパスすることができる

ので、1×2波長選択スイッチの出力1にλ2、出力2にλ1、λ3が出力される。2つの出力信号は、波長の組み合わせが相補関係にある。

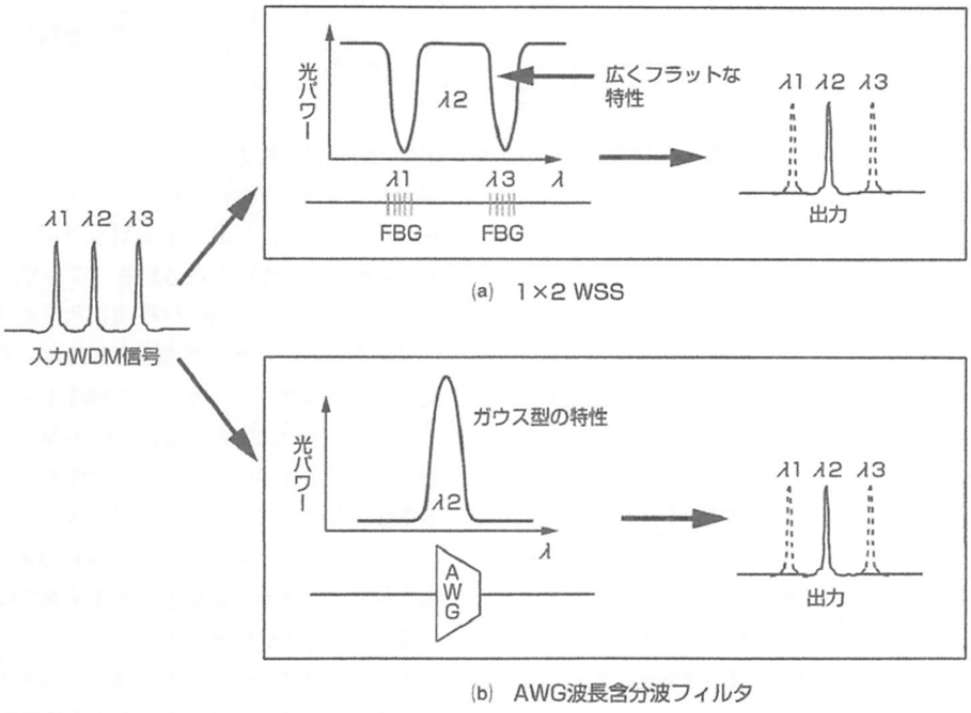


図 4.10: 波長選択スイッチの原理

図4.10に1×2波長選択スイッチおよびAWG波長合波フィルタのフィルタスペクトルを示す。これらはともにλ2を波長選択する場合を示している。本AWG波長合波フィルタスペクトル形状はガウス型であったために、入力信号スペクトルを帯域制限し、多段接続時には信号通過帯域の狭窄化を生じさせる可能性がある。一方、1×2波長選択スイッチのフィルタスペクトルは、広くフラットなスペクトル形状を有している。これは前述のとおり、波長選択する信号波長以外の信号波長をFBGにより、遮断し、信号通過帯域における光フィルタ効果を非常に小さく抑えているためであり、原理的には、通過信号に対して伝送特性劣化を生じさせない。

図4.11に、広信号通過帯域2×2OXCの単体特性を示す。実験では、8波のWDM信号(波長間隔0.8nm)に対するクロスコネクトとして動作させるため、1×2波長選択スイッチ(A)および(B)は、3dB幅0.8nmおよび反射率99.9%のFBG

を8個、2×2光スイッチを8個使用した。OXCの入力ポート1と入力ポート2への入力信号は、10 Gbit/sのNRZ(Non-Return-to-Zero)符号で強度変調した8波のWDM信号(波長間隔0.8nm)とした。OXCは、図4.11に示すようにch.2、ch.4、ch.6、ch.8がスルー信号、その他のchはクロス信号となるように、各2×2光スイッチを設定した。本設定では、OXC通過信号波長の隣接波長がFBGにより遮断されているため、通過信号に対しては最悪設定である。1×2波長選択スイッチ(A)に白色雑音を入力し、フィルタスペクトルを求めた結果を図4.11の右上に示す。Ch.2、ch.4、ch.6、ch.8ともに、広くフラットな形状を示し、3dB信号通過帯域幅は0.8nmとなった。また、図4.11中に示す1×2波長選択スイッチの出力点における光スペクトルから、すべてのチャネルで38dB以上のクロストークを達成することを確認した。

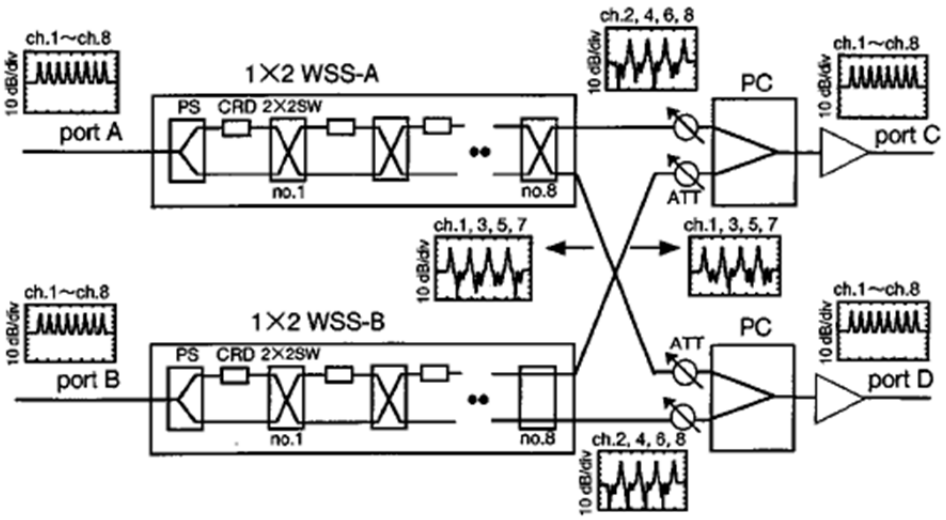


図 4.11: 実験系

提案されたOXCは再構成可能である。再構成された場合、すべてのトラフィックは数ミリ秒間中断されます。この瞬断時間は、1×2 WSSの2×2光スイッチング時間に依存する。大規模なOXCを構成するには、3段階のClosネットワークアーキテクチャを使用して実現することが出来る[22]。

4.3.2 提案方式を用いた長距離 WDM 光伝送実験

実験で用いたOXCのCRD(channel-rejection device)は、99%の反射率と0.8 nmの3 dB反射帯域幅を持つ8つのファイバブラッグ格子を用いた。提案したさOXCの3 dB通過帯域幅は、約0.8 nmで広帯域であった。従来のOXCは、2×2光スイッチとAWGフィルタで構成されている。AWGの波長間隔は0.8 nmで、3 dBの通過帯域幅は0.4 nmであった。通過信号と交差信号のチャネルは、提案したOXCと同じある。両方の場合における2×2光スイッチは、80 dBのクロストークと約8 msのスイッチング時間を備えた8つの機械的に駆動されるプリズムスイッチを用いた。提案したOXCは、従来のOXC（約8 dB）と比較して、約13 dBの大きな挿入損失があった。この挿入損失がOXCサイズとチャネル波長数に依存することは、本質的な欠点である。ただし、この欠点は、エルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）を使用することで簡単に克服できる。この場合、EDFA内の振幅自然放出（ASE）ノイズの蓄積により、光信号対雑音比（SNR）が低下する。さらに、スイッチ規模の最大値は、光SNRの劣化によって制限される。これは将来の研究で対処する予定である。提案および従来のOXCの2つのポート（ポートAおよびB）に入力される信号は、ITU-Tグリッド（1549.32～1554.94 nm）の8チャネルWDM信号（0.8 nmチャネル間隔）であった。それらは10 Gbpsの非ゼロ復帰（NRZ）データで強度変調した。ポートAとポートBの信号データパターンは、それぞれ2^{31}-1および2^{23}-1擬似ランダムビットシーケンス（PRBS）であった。

図4.11は、提案したOXCで測定された光スペクトルを示しています。すべてのチャンネルで38 dBの高いクロストークが達成された。出力チャネル間の電力差は0.6 dBであった。図4.12に、長距離周回実験系を示す。この光経路切替型周回伝送実験系は、1×2パワースプリッター、2×1オプティカルスイッチにより構成される。伝送ライン上の光信号は、OXCによりクロスコネクトされる。長さ532 kmの周回ループは、10個の50 kmの分散シフトファイバ（DSF）、32 km 1.3 μmのシングルモードファイバ（SMF）、EDFA、および光等化器により構成される。DSFの平均分散値は-1ps/nm/kmであり、周回長端のSMF (17ps/nm/km)によって補償される。平ゼロ分散波長は1551.3 nmであった。短波長チャネル（ch.1−3）は、平均正常分散値に配置されている。長波長のチャ

ネル（ch.4−8）は、平均異常分散値に配置されている。EDFAの雑音指数と光出力は、それぞれ5.2 dBと6 dBm（-3 dBm/ch）であった。

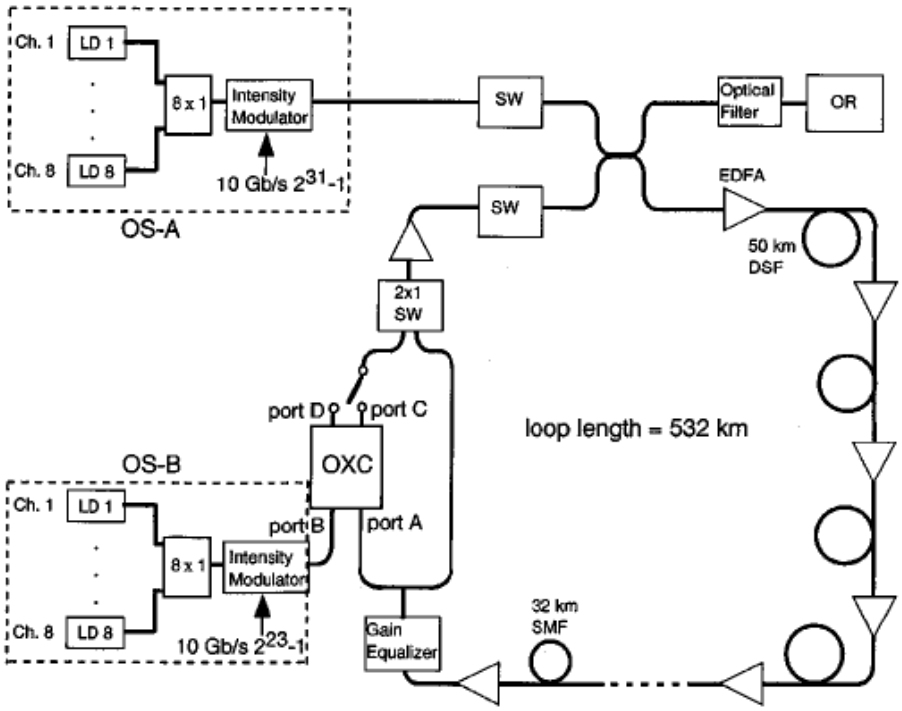


図 4.12: 長距離周回実験系

伝搬後、受信信号は帯域幅0.4 nmの光バンドパスフィルターを通過し、分散スロープ0.07ps/nm^2/kmによる累積分散は、光受信機内の分散補償ファイバ（DCF）によって補償された。電気SNRは、光受信器の判定しきい値レベルをスイープしビットエラーレート（BER）を測定すること求めた[18]。

図4.13は、図4.12に示された長距離周回実験系によって実現される2つのシステムモデルを示している。モデル2は、伝送路に周期的にOXCが挿入されたシステムモデルとなる。

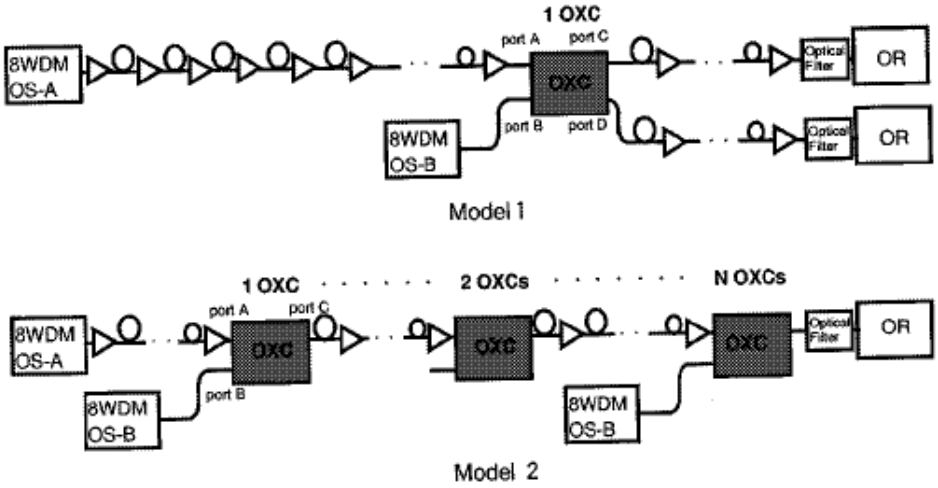


図 4.13: システムモデル

4.3.3 実験結果

図4.14は、モデル1の4256 km伝送後の電気SNRの測定値を示している。

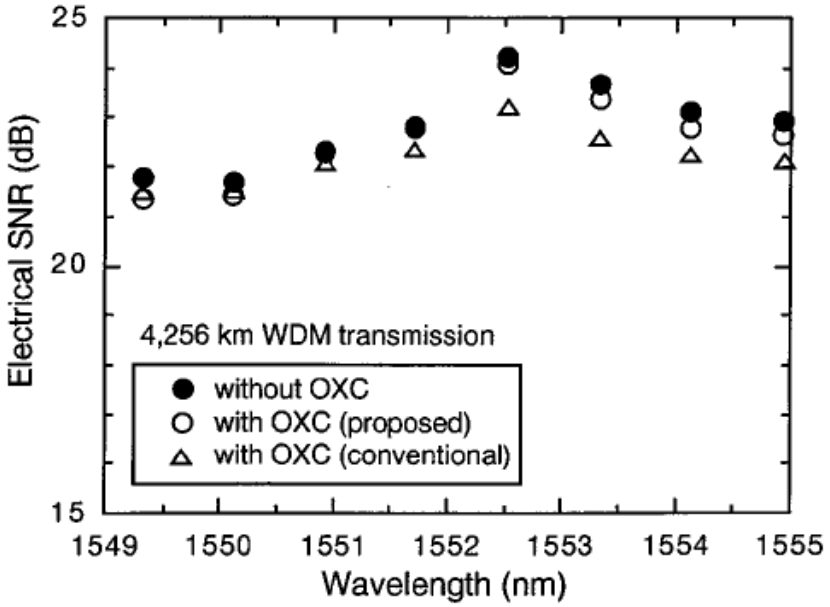


図 4.14: 4,256km 伝送実験結果

OXCは、伝送ラインの端に挿入されている。黒丸は、OXC無しのSNRを示す。白丸と三角形は、それぞれ提案されたOXCと従来のOXCのSNRを示している。OS-Bからの信号のSNRは、どちらの場合もほぼ送受対向特性の特性に一致している。提案されたOXCを使用すると、すべてのチャネルでSNRが0.4 dB以下の劣化が確認された。これは、すべてのチャネルでの平均SNR低下が0.2 dBであるため、無視できる。

従来のOXCを使用すると、長波長チャネルで約1 dBのSNR劣化が発生した。図4.15(a)に示すOXCを使用しない長波長チャネルの4256 kmの光信号スペクトルは、伝送前のスペクトル(図4.15(b))と比較した結果、光ファイバの非線形性により、約0.2 nm広くなっていることを確認した。したがって、光信号のスペクトルの広がりは、従来のOXCのAWGフィルタの帯域幅制限によって引き起こされるSNR劣化を悪化させる。これより、提案したOXCは、長距離伝送ラインに1つのOXCを挿入することによって引き起こされるSNR劣化を低減できることを確認した。

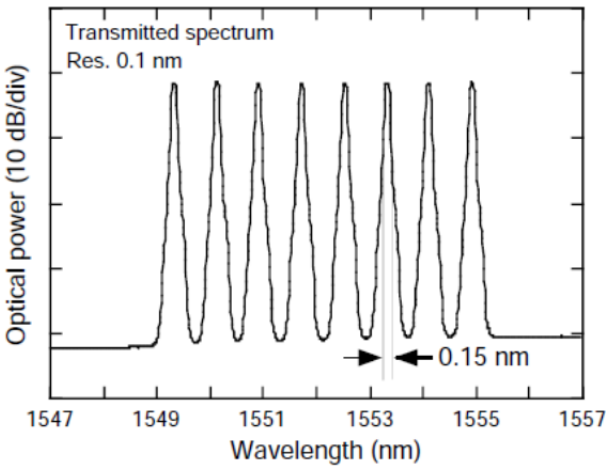


Fig. 7 Optical spectrum at the transmitter

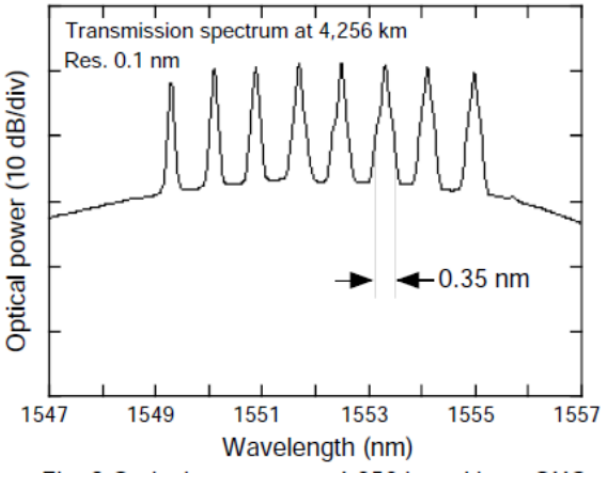


図 4.15: 4,256km 伝送後の光スペクトル

図4.16は、ch.6（OS-A）において、8ユニットのOXC多段接続し、Δλ離調したときの4256 kmの伝送特性である。

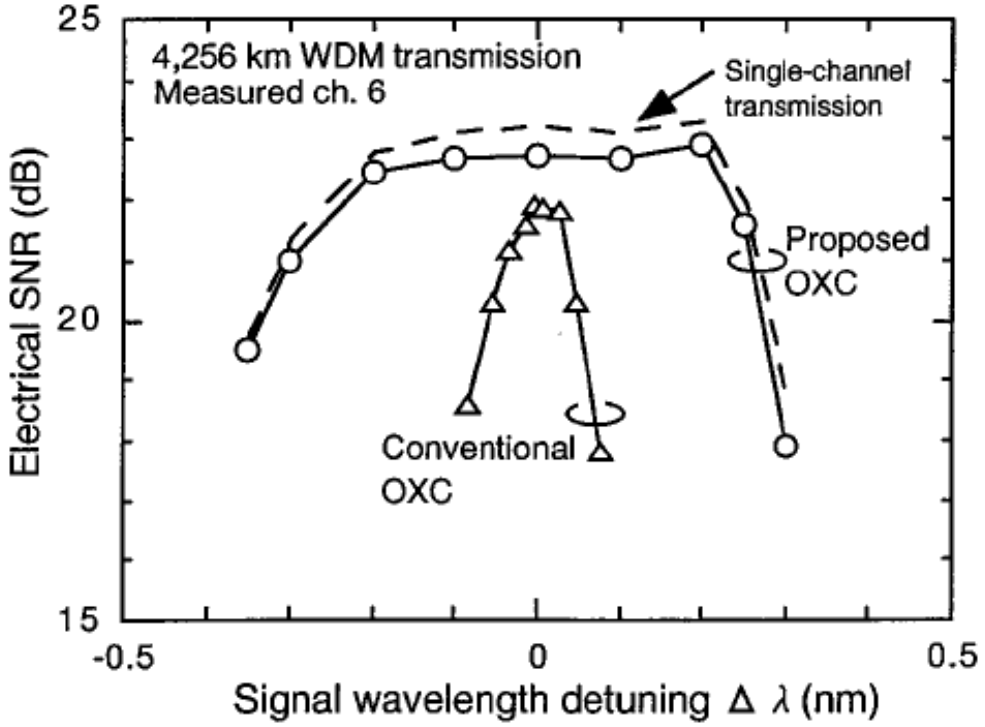


図 4.16: 提案の光クロスコネクト装置を用いた伝送実験結果

白丸と三角形は、それぞれ提案されたOXCと従来のOXCのSNRを示している。Δλ = 0 nmでの提案したOXCと従来のOXCのSNR劣化は、それぞれ0.9 dBと1.8 dBであった。提案したOXCは、OXCの多段接続によって引き起こされるSNRの低下を低減した。提案したOXCのわずかなSNR劣化は、OXC挿入損失の補償に使用されるEDFA内のASEノイズの蓄積によるものと考えられる。さらに、光信号の波長離調によって引き起こされるSNR劣化は、提案されたものよりも従来のOXCの方が大きかった。

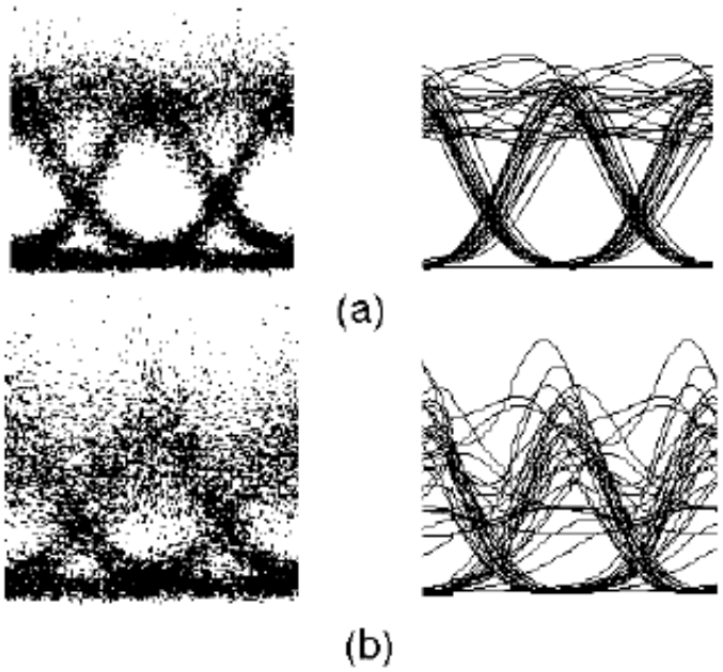


図 4.17: 受信波形

これは、従来のOXCを多段接続すると、フィルター帯域幅がより狭くなるためである。提案したOXCと従来のOXCの3dB SNR劣化帯域幅は、それぞれ0.6 nmと0.1 nmであった。多段接続された提案したOXCは、0.8 nmのチャネル間隔と比較して狭帯域化がほとんどないほど広い通過帯域を有していることを確認した。これは、提案したOXCが少なくとも1つの重要な利点を提供することを意味する。それは、OXC通過帯域に対する信号波長の離調に対する耐性である。破線は、シングルチャネル伝送状態で提案したOXCを通過する光信号の電気SNRを示している。伝送ライン上のEDFAの出力パワーは3dBmであり、これはWDM伝送時のチャネル当たりの光パワーと同等である。結果、3dBのSNR低下をもたらす帯域幅は0.6nmであり、これはWDM伝送結果と一致した。提案したOXCの帯域幅制限の主な原因は、2つの最も近い隣接チャネル間で見られるフィルタリング効果である。Δλ=0nmでのSNRは、XPMなどのファイバの非線形性によるチャネル間相互作用がないため、優れたパフォーマンス（OXCなしと比べて約0.5 dB劣化）を示した。図4.17は、Δλ=1nmとした時のシミュレーションならびに実験により得られた受信波形である。図4.17(a)(b)は、そ

れぞれ、提案のOXC、ならびに従来のOXCを用いたいた場合における受信波形である。従来のOXCは、受信波形に非対称な波形劣化が生じており、この波形劣化が電気SNR劣化を生じさせていると考えられる。

長距離WDM光ネットワークにおいて、広く平坦な通過帯域を持つ再構成可能な2×2 OXCを提案した。提案したOXCは、高い多段接続耐性と光ファイバの非線形性によって引き起こされる光信号のスペクトルの広がりに対する耐性を持つことを確認した。従来のOXCおよび提案したOXCを通過する光信号の伝送性能は、光経路切替型周回実験系を用いて4000 km以上の10 Gbps 8チャネルWDM伝送（0.8 nmチャネル間隔）により実験的に評価した。単一のOXCを備えたシステムモデルでは、提案したOXCの挿入によるSNR劣化は、従来のOXCでの1 dB SNRの劣化と比較して無視できる程小さかった。 8段のOXC多段接続によるシステムモデルでは、提案したOXCと従来のOXCで3 dBのSNR低下をもたらす帯域幅は、それぞれ0.6 nmと0.1 nmであった。多段接続した提案のOXCは、0.8 nmのチャネル間隔と比較して実質的に狭まることのないほど広い通過帯域を持っていることを確認した。

4.3.4 光合分波器の波長分散による伝送特性劣化

FBGは、スペクトル振幅応答がほぼ正方形であるため、WDM光ネットワークの重要な光学フィルターデバイスである。ただし、フィルターの通過帯域に分散があるため、波形の歪みによりシステムのパフォーマンスが低下する[23]。FBGを用いたOADMもくしはOXCが長距離WDM伝送路の複数のポイントに配置されている場合、FBGの分散とファイバの非線形性により伝送特性劣が顕著になる。劣化のレベルは、FBGが挿入される場所によって異なる。この劣化の対策の1つは、光ファイバタイプ（DSFやSMF等）に関係なく伝送パフォーマンスの低下を改善できる、光レシーバでの分散補償技術である。

本章では、典型的なファイバ分散マネジメントを用いた長距離WDM伝送システムの光合分波器のFBG分散によるパフォーマンスの低下に対する受信機側の補償の有効性を数値的および実験的に明らかにする。

図4.18は、2つのシミュレーションモデルを示している。モデル1は、6,408 kmの伝送ラインに沿って12個のFBGを定期的に配置している。 モデル2は、光送

信機に単一のFBGを配置している。これは、FBG分散とファイバの非線形性の最も強力な組み合わせが得られるため、おそらく最悪の構成である。ここで、FBGは、分散材料であると想定し、簡単にするために振幅応答も分散スロープも考慮していない。送信機からの10Gbps×8チャネルWDM信号（チャネル間隔0.8nm）は、非ゼロ復帰（NRZ）データで強度変調されている。奇数チャンネルと偶数チャンネルは異なる64ビットの擬似ランダムパターンとした。6408kmの伝送ラインは、50 kmの分散シフトファイバが120本（DSF、分散値D = −1.2ps/nm/km）、34 kmのシングルモードファイバが12本（SMF、D = 17.6ps/nm/km）、および光増幅器から構成される。DSFとSMFの分散スロープは無視した。各アンプのノイズ指数は5.2dBで、光出力パワーは6dBm（−3dBm/ch）とした。モデル1および2での分散割り当てを図4.19(a)および図4.19(b)に示す。伝搬後、信号は帯域幅0.4 nmの光バンドパスフィルターを通過し、累積FBG分散は分散補償ファイバ（DCF）によって補償した。

WDM信号伝搬中の分散とファイバの非線形性によるアイ開口劣化は、スプリットステップフーリエ法[15]によって非線形シュレディンガー方程式を数値的に計算することによって求めた。したがって、SNRは、線形増幅自然放出（ASE）ノイズの蓄積によって決定される基本的な理論SNRから開眼ペナルティを差し引くことによって評価した[24]。

図4.20は、計算した電気SNR劣化（最悪のチャネル）対累積FBG分散を、受信側の分散補償あり（なし）で示している。光受信機端の分散補償により、両方のモデルで見られたFBG分散に起因するSNRの劣化が大幅に改善された。図4.20（a）に示す12個のFBG多段接続の許容される（1dB SNRの劣化）累積分散は、−1、000～2、000ps / nmであった。光受信機端での分散補償を使用した累積ファイバ分散に対するSNR劣化も図4.20（a）に示されており、累積FBG分散との比較が可能である。ファイバの分散は、伝送ライン内の多くのFBG（分散FBG）の分散にほぼ等しい。ここで、累積ファイバ分散は、DSFの分散パラメーターDを増減することによって取得することが出来る。許容累積ファイバ分散は、許容累積FBG分散とほぼ同じでった。これは、12個のFBG多段接続によるSNRの低下が、ファイバの分散によるものに密接に関係していることを示している。図4.20(b)の単一のFBGを光送信機に配置することは、最悪の配置であった。許容累積FBG分散は−400～1,000 ps/nmであり、これは12 FBG多段接続の約半分であった。

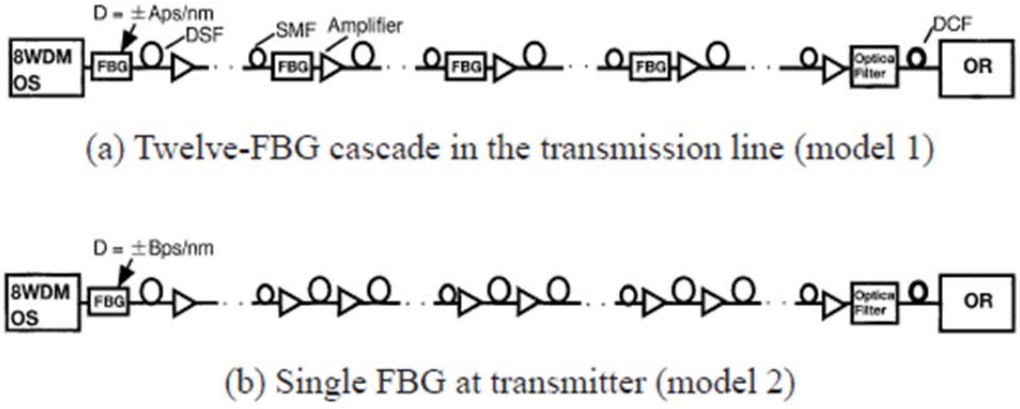


図 4.18: システムモデル

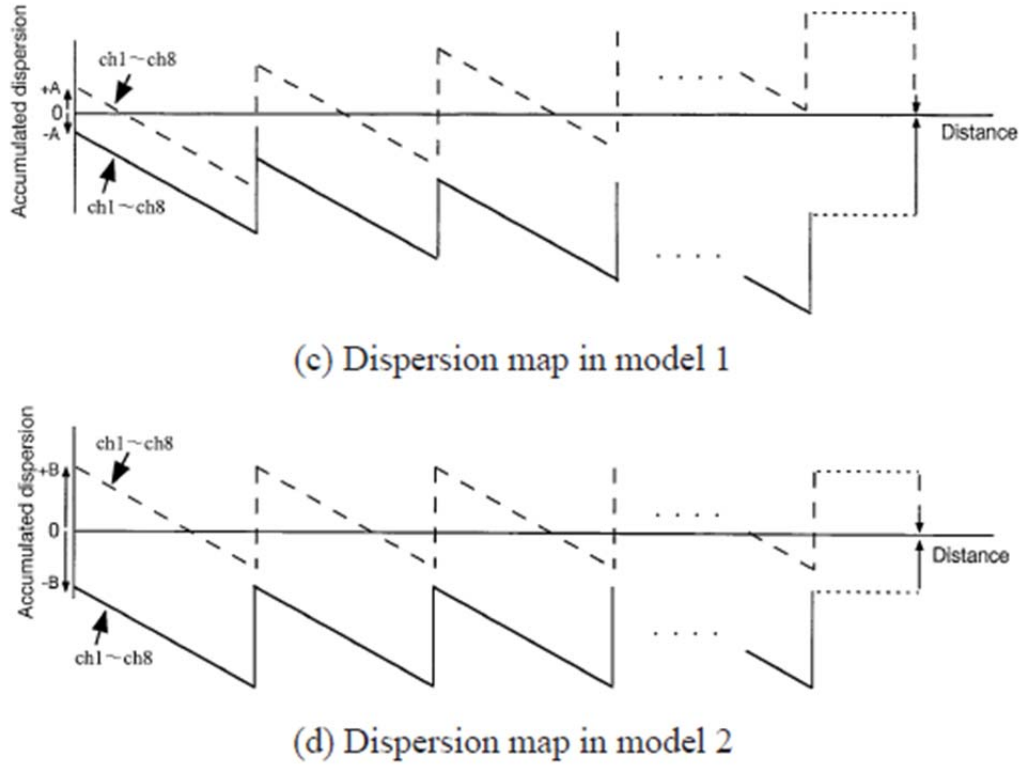
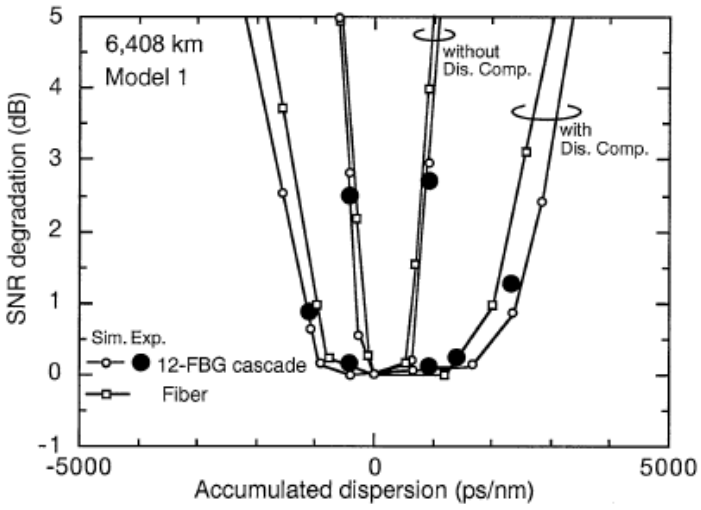
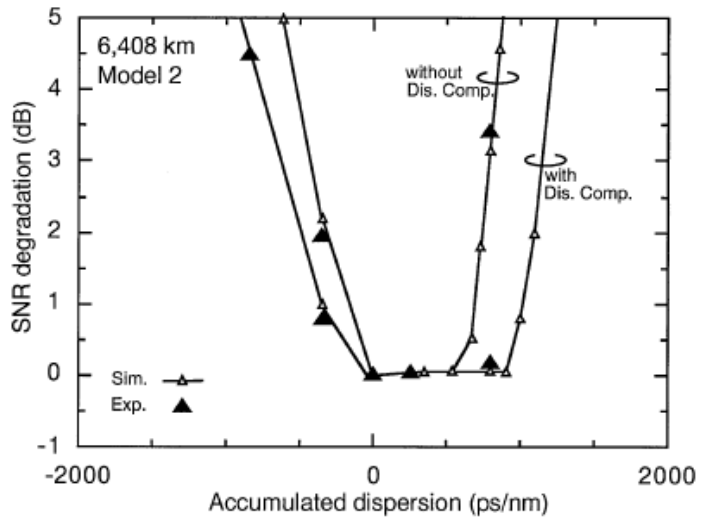


図 4.19: 分散マップ

図4.20に示す周回実験系を用いて、これらのシミュレーション結果を実験的に確認した。534 km周回ループは、10個の50 km DSF、34 km SMF、エルビウム添加ファイバ増幅器（EDFA）、および光ゲインイコライザで構成した。0.8 nm間隔の8チャネルWDM信号は、10 Gbps NRZデータで強度変調した。データパターンは$2^{31}-1$の擬似ランダムビットシーケンスとした。光送信機、光受信機、ファイバ、光増幅器のほとんどのパラメータは、シミュレーションモデルのパラメータと同様である。伝送ファイバの分散スロープは0.07ps/nm^2/kmであったため、平均ゼロ分散波長にあるch.4を測定した。図4.20(b)は、実験で用いたFBG光合分波フィルタのブロック図を示しています。ブロック図のch.4の反射信号は、両方のモデルの周回実験系を通過する。ブロック図に入力されるWDM信号は、$2^{23}-1$の擬似ランダムビットシーケンスを持つ10 Gbps×8チャンネルのWDM信号であった。FBGフィルタは、0.4 dBおよび0.6 nmの3 dB帯域幅のものを用いた。図4.21（a）および（b）は、測定されたFBGの反射および分散特性を示している。図4（b）の破線は、12 FBG多段接続で計算された反射および分散特性を示している。狭帯域（0.4nm）FBGフィルタの分散は−1.4～0.9ns/nmであった。0.6nm FBGフィルタの分散は−1.0～0.5ns/nmで、12−FBG多段接続の分散は−12.0～6.0ns nm、帯域幅は0.43nmであった。したがって、モデル2には0.4 nm FBGフィルタが使用され、モデル1の配置には0.6 nm FBGフィルタを使用した。各FBGの分散は、信号波長の離調によって引き起こした。SNRは、光受信機のしきい値レベルをスイープしながらビット誤り率（BER）を測定することで求めた[18]、[25]。測定したSNR劣化対累積FBG分散を図4.20に示す。実験結果はシミュレーション結果と良く一致している。それらの差は0.6 dB未満であり、シミュレーションの妥当性が確認された。



(a) 12-FBG cascade



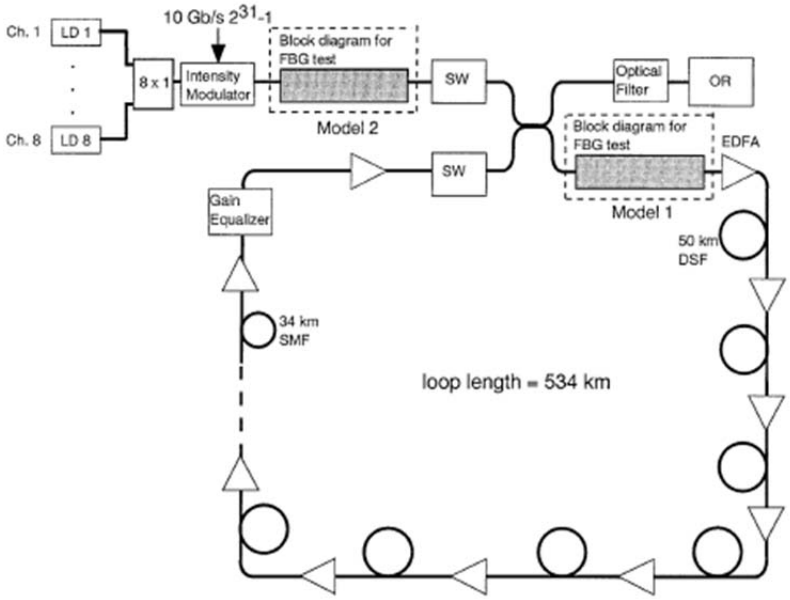
(b) Single FBG at transmitter

図 4.20: 累積分散と SNR の関係

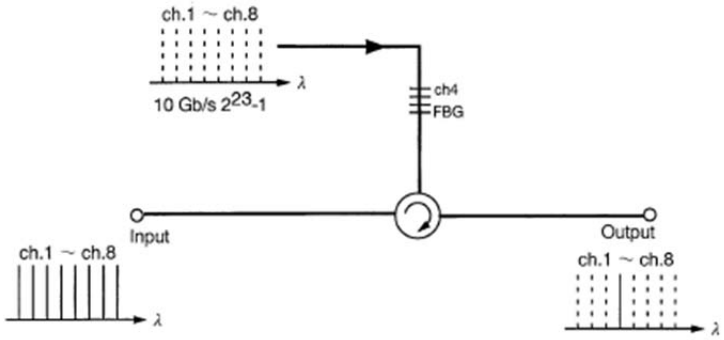
10 Gbps×8チャネルWDM 6、400 km伝送システムを使用して、受信端の補償で許容される累積FBG分散を調べた。等間隔の12-FBG多段接続と光送信機側に1つのFBGを配置した2つのモデルを、伝送路のファイバ分散と比較した。許容可能な累積FBG分散は、最悪の配置（光送信機側での単一のFBG）で-400～1、000ps/nmであることが分かった。この分散値は伝送距離に依存する。図4.21は、計算された許容累積FBG分散対送信機での単一FBGの伝送距離を示しています。許容累積ファイバ分散値対伝送距離の関係も図4.21に示

す。伝送距離2136、4272 kmでは、許容累積FBG分散はそれぞれ-1000～1500ps/nmおよび-500～1200ps/nmであった。許容累積FBG分散は、伝送距離が長くなるにつれて減少した。さらに、許容累積FBG分散値は、負の分散よりも正の分散の方が大きく、調べたすべての距離でファイバの半分であった。

典型的なファイバ分散マネジメント構成による10 Gbps×8チャンネルWDM 6400 km伝送システムでのFBG分散に起因するSNR劣化の光受信端側での分散補償の有効性を数値的および実験的に明らかにした。光受信端での分散補償により、等間隔に配置された12個のFBG多段接続、ならびに光送信端に1つのFBGが配置されたモデルの両方において、SNR劣化が大幅に改善された。12個のFBG多段接続の許容累積FBG分散は、-1000～2000ps/nmであった。この分散値は、光受信端の分散補償によって許可された累積ファイバ分散にほぼ等しかった。最悪の配置である光送信機側に単一のFBGを配置するモデルでは、許容される累積FBG分散は-400～1、000ps/nmになり、これは調査したすべての伝送距離におけるファイバ分散値の約半分であった。

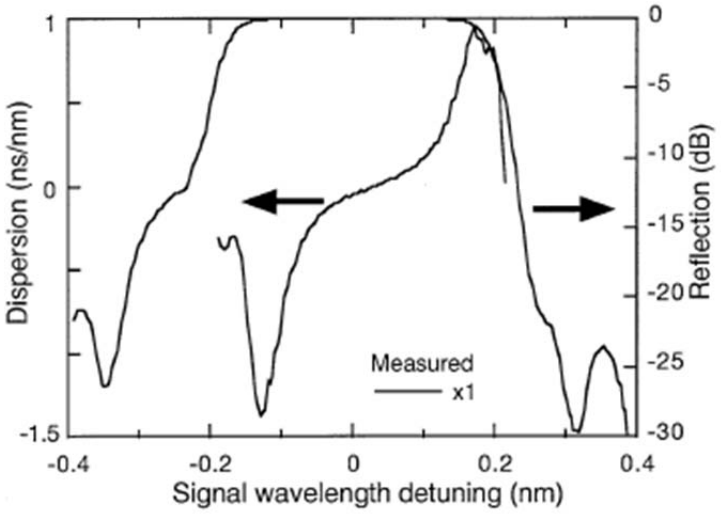


(a) Recirculating loop configuration

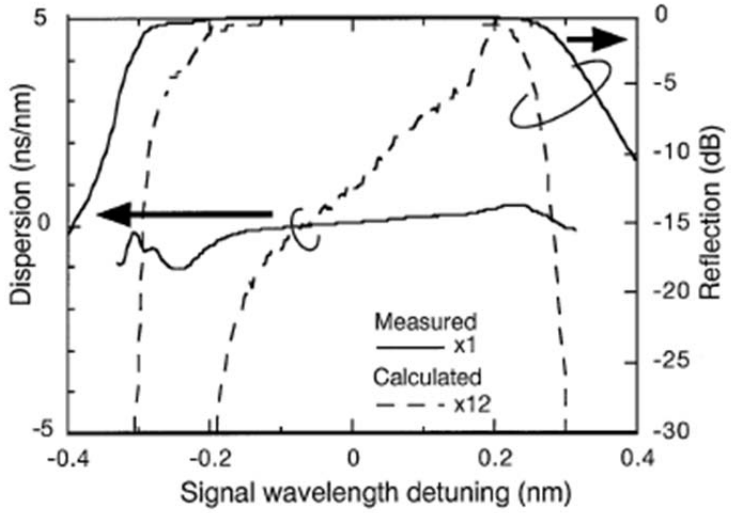


(b) Block diagram for FBG test shown in Fig.3 (a)

図 4.21: 周回実験系



(a) FBG with 3dB bandwidth 0.4 nm



(b) FBG with 3dB bandwidth 0.6 nm

図 4.22: FBG を用いた実験結果

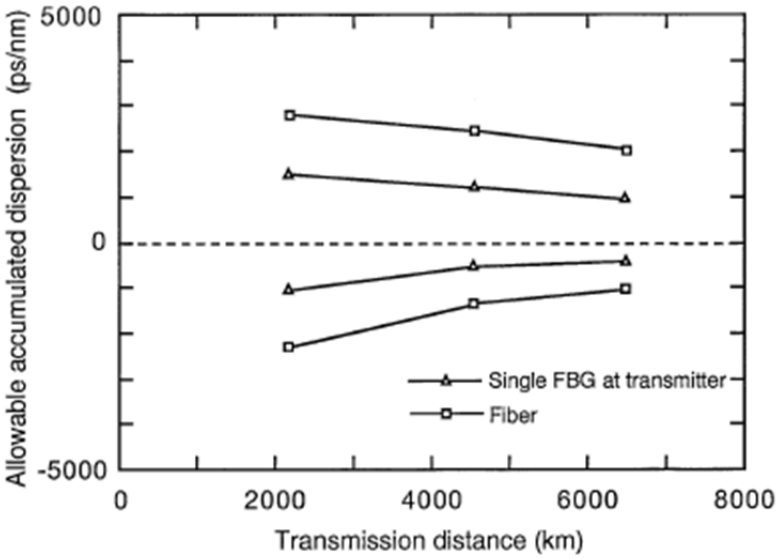


図 4.23: FBG を用いた長距離伝送実験結果

4.4 WDM 光トランスポートシステムにおける光監視信号による伝送特性劣化

4.4.1 光監視信号による伝送特性劣化とその抑圧技術

急増する通信トラヒックに対応するため、Beyond 100 Gシステムについて検討されている[26]。WDM光伝送システムの光監視チャネル(OSC)は、リモート光ノードの管理、監視、制御のためのWDM伝送システムで重要な役割を果たす。一般的にWDM光伝送システムの、OSCは図4.24に示すように、EDFA増幅帯域外でWDM信号と共伝搬し、隣接ノードで終端する。

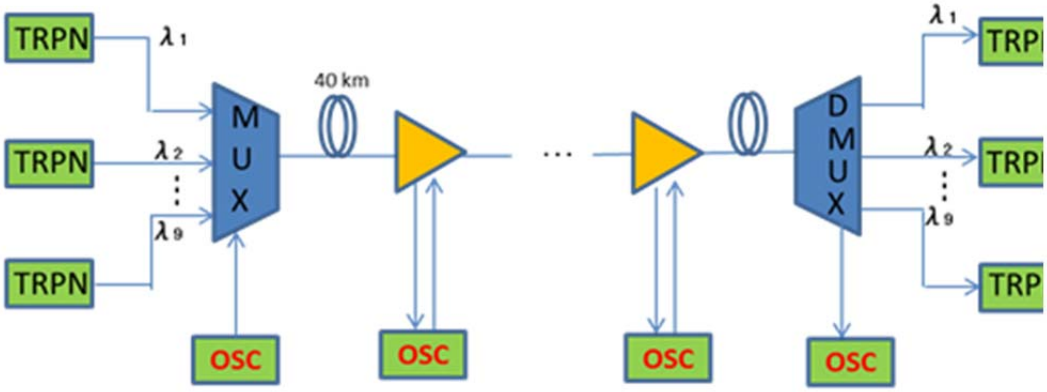


図 4.24: OSC を用いた WDM システム

OSCの出力信号は、通常、WDM信号よりもはるかに遅い100 Mbpsイーサネットでook変調された信号、もしくはOC-3信号が用いられる。異なるビットレートを同時に送信する場合、WDM信号間のXPM誘導位相ノイズに起因する送信パフォーマンスが低下する。たとえば、100Gbps DQPSK上の10Gbps OOKチャネルによって引き起こされるXPMによるパフォーマンスが低下する[27,28]。しかし、低速OSCとWDM信号光間の非線形クロストークの伝送への影響は明らかにされていない。本章では、低速OSCによるWDM主信号への影響を実験、シミュレーションにより明らかにし、その劣化抑圧方法について検討する。

図4.25は、低速OSCとWDM信号間の非線形クロストークの伝送への影響を示している。OSCパルス幅はWDM信号よりも十分に大きいが、WDM信号は各OSCパルスの立ち上がりと立ち下がりで非線形効果の位相雑音の影響を受ける。

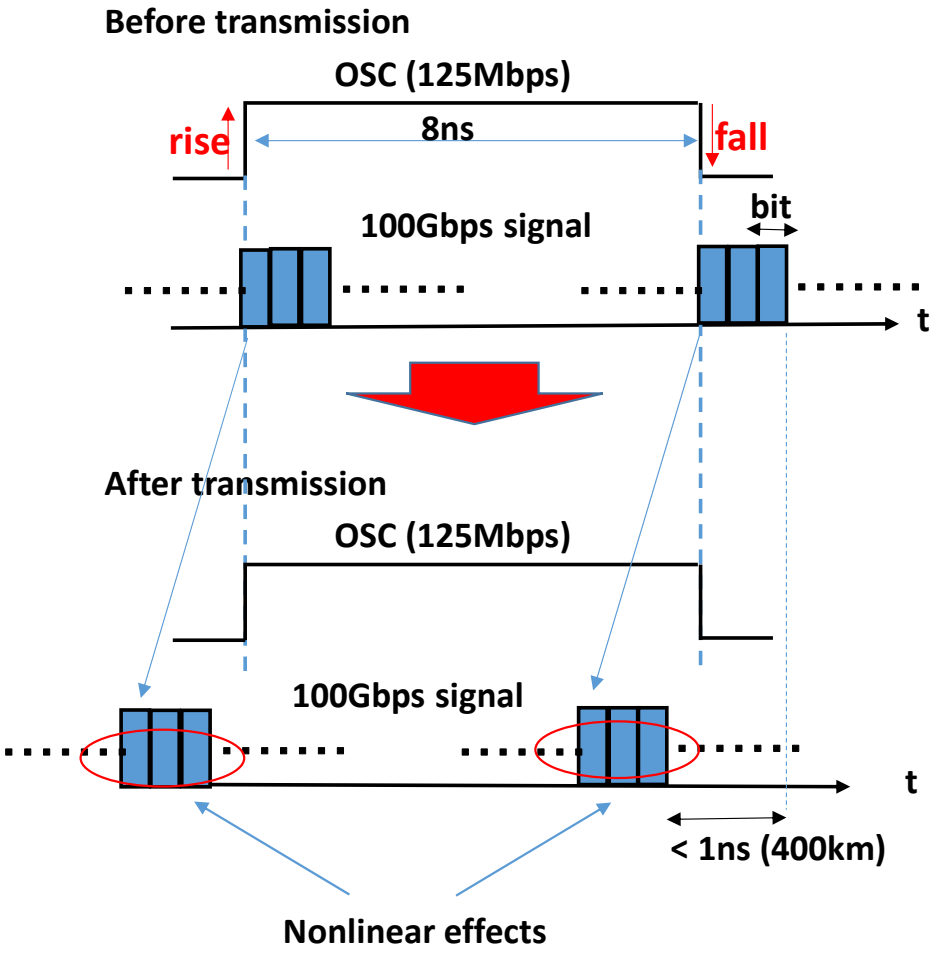


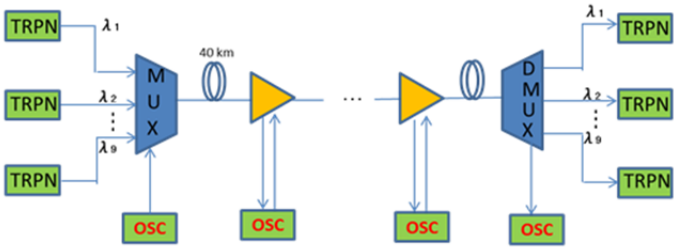
図 4.25: OSC による信号特性劣化

位相雑音は、OSC信号波形の強度が変化すると同時に伝播するWDM主信号パルスにXPMによって生成される。OSCは100Mbps程度の低ビットレートであるため、パルス幅が大きく、ビットウォークオフの影響は小さくなる。したがって、XPMの効果は顕著になる。XPMによる位相ノイズは非ガウスノイズであり、元々ガウスノイズ用に設計されたSD-FECのエラー訂正性能を著しく低下させる

可能性がある。特に、OSCパルスに多数の繰り返される0/1ビットパターンが含まれる場合、効果は大きいと予想される。

4.4.2　実験、シミュレーションによる検証

OSCによるXPM誘起位相ノイズを明らかにするために、Cバンドの分散シフトファイバ（DSF）を用いて実験を行った。



OSC	100Mbps Ethernet, OC-3
Total length	200km
Fiber type	DSF (zero-dispersion wavelength 1540 nm)
Span length	25km x 4span
WDM signal	9 channels 100G DP-DQPSK
FEC	20.0 % concatenation of hard-decision FEC (HD-FEC) and soft-decision FEC (SD-FEC).

図 4.26:　実験条件

図4.26は、本実験の構成を示す。 伝送路は、200 kmを構成する40 km DSFを5つ用いた。トランスポンダ（TRPN）の光送信機側では、Cバンド光送信機からの光信号を波長選択スイッチ（WSS）を使用して多重化した。その後、エルビウムドープファイバンプ（EDFA）を用いて光増幅し、伝送ファイバに送信した。送信信号は、デュアルキャリア、デュアル偏波直交位相シフトキーイング（DP-QPSK）100 Gbps信号を用いたCバンドのチャネル波長は、ITU-T G.694グリッドで50 GHz間隔で1562.23 nm（ch.1）から1565.50 nm（ch.9）の範囲であった。各スパン損失は、EDFAによって完全に補償した。TRPNの光受信側では、WSSを使用して光信号を分波し、光受信機を使用して検出した。各スパンの平均ゼロ分散波長は約1540.0 nmであった。TRPNは、20.0%の硬判定FEC（HD-FEC）と軟判定FEC（SD-FEC）を連結した前方誤り訂正（FEC）を採用している。OSCは、信号

波長は1510nmとし、ビットパターン1の典型的な100 Mbpsイーサネット信号またはOC-3信号のいずれかを用いた。

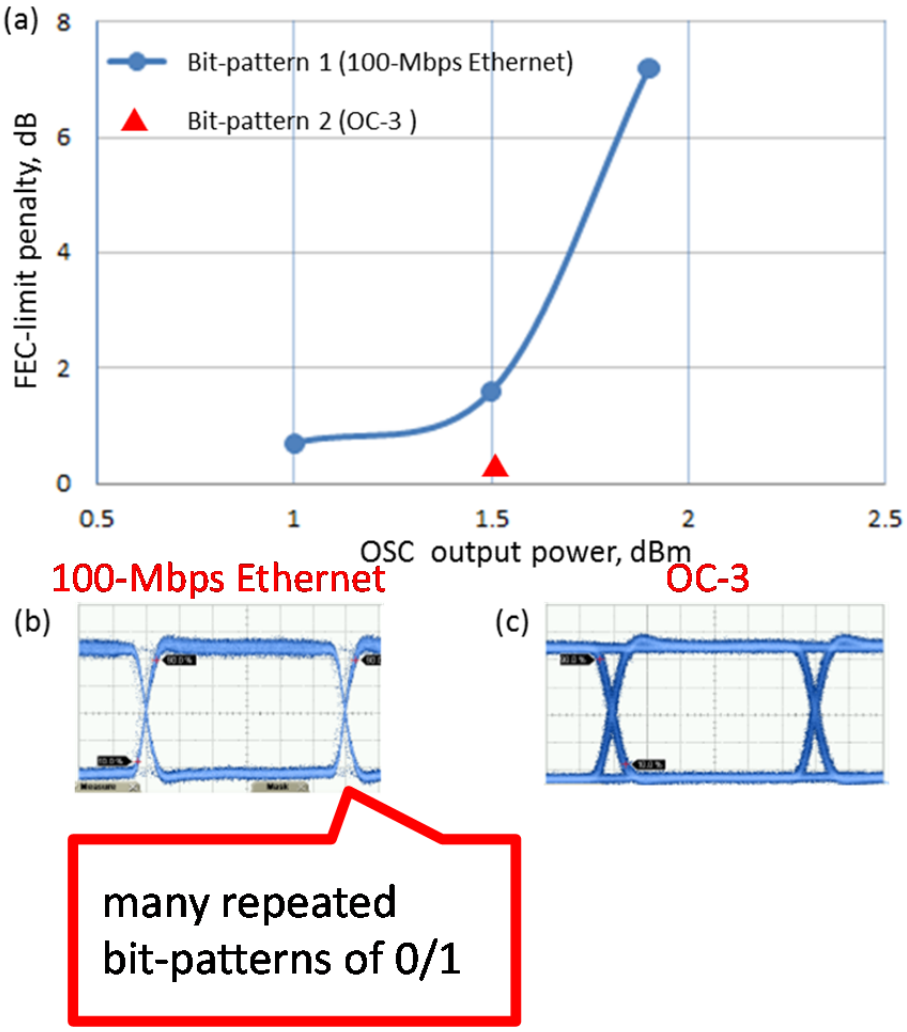


図 4.27: OSC による伝送特性劣化実験

図4.27は、100 Mbpsイーサネットおよび OC-3のOSC信号に対するch.5のFECリミットのQファクタ(ビットエラーレートから算出)からのQペナルティを示している。FECリミットからのQペナルティは、送信後のOSC信号の有無によるFECリミットQ値の差として定義している。FECリミットのQ値は、ノイズ付加試験によって測定した。 OSC出力電力が1.5 dbm以上の場合、100 Mbpsイーサネット信号は、OC-3信号と比較して、FECリミットが大幅に低下した。 図4.27(b)および(c)か

らわかるように、100 Mbpsイーサネット信号には0/1の反復ビットパターンが多数含まれているため、WDM信号にXPMが生成され、伝送パフォーマンスが低下すると考えられる。低速OSCの場合、OSC信号パルスとWDM信号パルスの伝搬遅延差はOSCのパルス幅に比べて十分に小さいため、WDM信号はXPMの立ち上がり時間と立ち下がり時間の影響を受ける。

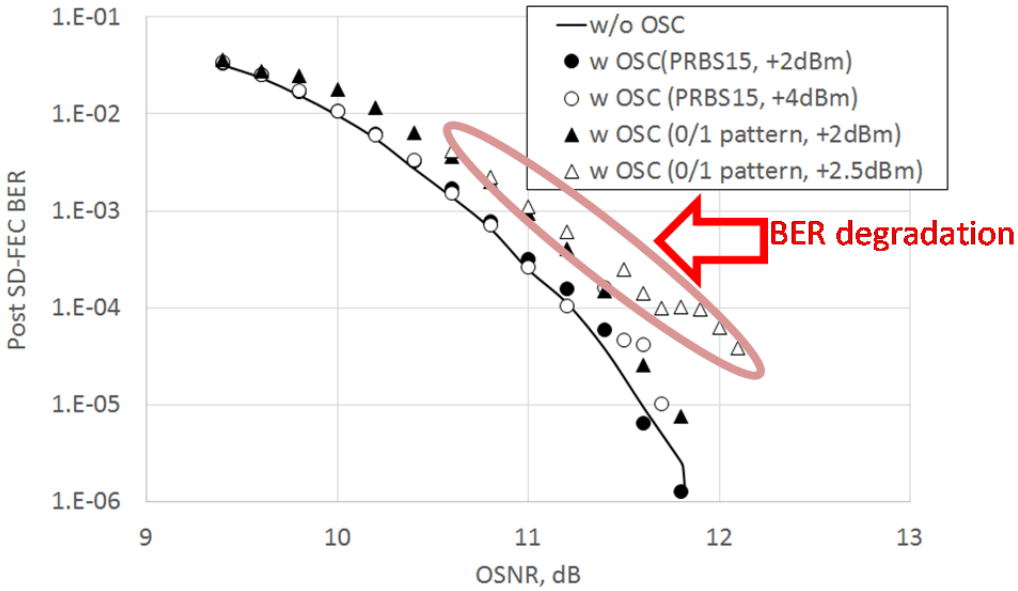


図 4.28: シミュレーションによる評価

125 MHzのOSCの0/1ビットパターンの繰り返しの影響を数値シミュレーションで分析した。図4.28は、さまざまなパワーレベル、およびOSCの0/1ビットパターンと擬似ランダムビットシーケンス（PRBS）に対する光信号対雑音比（OSNR）と関ポストFECビットエラーレート（BER）の関係を示している。OSC信号がPRBS信号の場合、出力電力が4 dBmであっても、特性はOSC信号がない場合とほぼ同じであった。一方、0/1ビットパターンは、実験のように、少なくとも2 dBmのOSC出力電力でSD-FEC後のBER劣化を引き起こした。これは、高出力のOSC信号光パワーを必要とする長距離伝送の場合、OSC伝送によるWDM伝送パフォーマンスの低下を考慮する必要があることを示している。

図4.29は、DP-QPSK受信信号のスペクトル解析結果を示す。 OSCの影響のみを観察するために、DP-QPSK信号の成分を受信信号から除去し、非線形ノイ

ズをスペクトル分析した。図4.29の結果から、OSCから0/1ビットパターンが繰り返される信号からXPMを受けたWDM信号は、125MHzの間隔の離散周波数成分でノイズを示している。SD-FECはランダムなガウス分布ノイズ[29]を想定しているため、このノイズはSD-FECのパフォーマンスを低下させると考えられる。

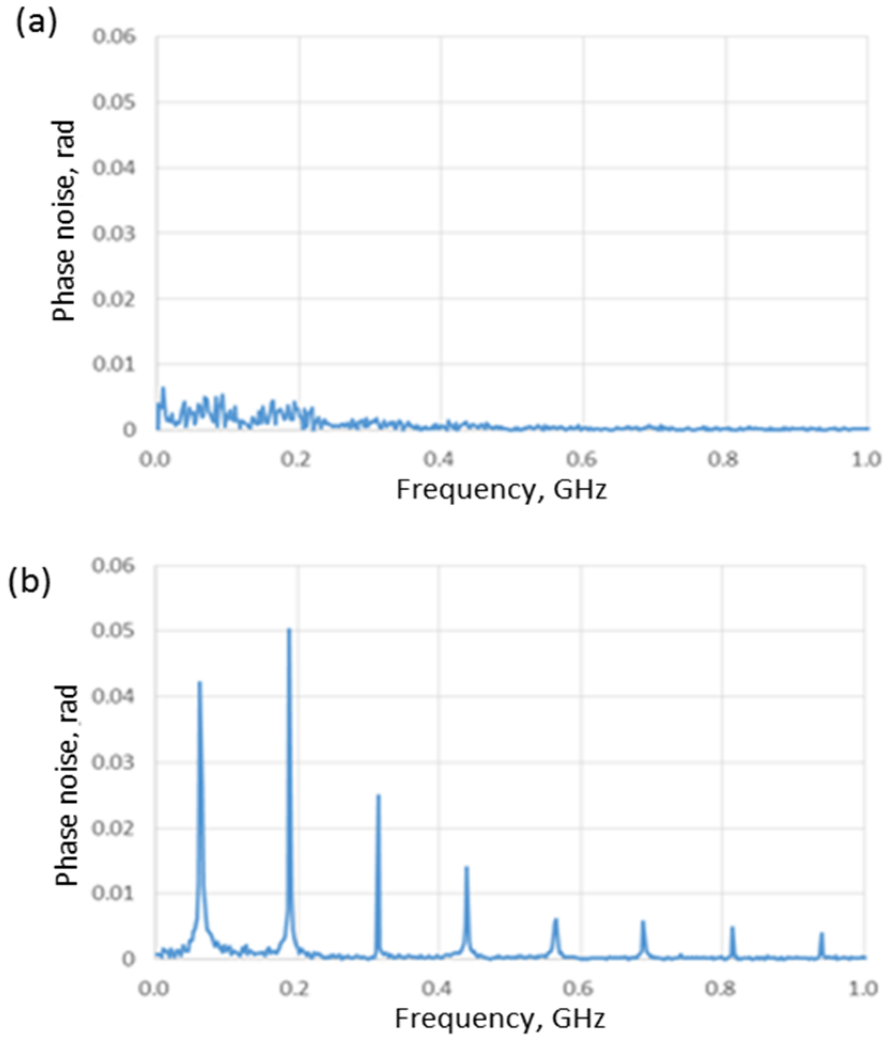


図 4.29: シミュレーションによるスペクトル分析

4.5 まとめ

本章では、WDM 光トランスポートシステムにおいて、OXC、OADM の光合分波器による伝送特性劣化のメカニズム、ならびに、伝送特性劣化を改善する新規の OXC 構成技術について提案した。さらに、長距離 WDM 伝送実験により、提案の OXC の効果を実証した。OADM の光合分波器によるフィルタリングによる伝送特性劣化について、10 Gbp×8 チャネル WDM 伝送実験により評価した。新規の周回実験系を用いて、OADM の挿入位置を変化させて評価した。OADM が受信機の近くに挿入された場合、もしくは、ADM の間隔が小さい場合、伝送特性劣化が顕著であった。また、WDM 光信号がフィルタ帯域から離調している場合、さらに悪化することが確認できた。このように影響を改善する新規の光合分波器を提案した。提案した FBG を用いた光合分波器を適用した OXC は、広いフラットな信号帯域を有し原理的には通過信号に対して伝送特性劣化を生じさせない。10 Gbp×8 チャネル WDM 伝送実験により評価した結果、従来の AWG 合分波器を用いた OXC よりも、約 1.5dB 伝送特性を改善することを実証した。さらに、FBG を用いた光合分波器の波長分散に対する影響を 6000km 伝送実験、シミュレーションにより評価した。広いフラットな信号帯域を有する光合分波器であっても、光合分波器の波長分散特性により伝送特性は劣化するが、許容累積分散の範囲であれば、受信端で一括分散補償することにより特性改善は可能であることを示した。

システム化において必須となる光監視信号が WDM 主信号に与える影響を実験ならびにシミュレーションにより評価した。その結果、光監視信号の信号パターン依存性、ならびにパワー依存性があることを実験、シミュレーション明らかにした。100Gbps の WDM 信号と 100Mbps の 2 種類の信号パターン(100Mbps-Ethernet、OC-3)の OSC 信号を用いて実験的に評価した結果、0/1 交番信号が多く含まれている 100M-Ethernet 信号を用いた場合、顕著に WDM 信号に劣化が見られた。これは、OSC 信号の 0/1 交番信号が WDM 信号に相互位相変調を誘発させ、SD-FEC 特性を劣化させたと考えられる。

以上のように、ポイントトウポイントの波長多重光伝送システム、波長多重光ネットワークシステムにおいては、数百 Mbps の光監視信号が 100Gbps の

WDM 信号に影響を与えることから、相互位相変調を誘発する 0/1 交番信号を多く含まない信号パターンにて設計すること、また、波長多重光伝送システムでは、OADM、OXC にて用いられる光合分波器による光フィルタリングによる影響が伝送特性を劣化させるため、特に多段接続される場合は、提案する光合分波器のような光フィルタ帯域がフラットな帯域を持つものを適用することで、伝送特性劣化を抑圧することを示した。

参考文献

[1] K. Sato, S. Okamoto, and A. Watanabe, “Photonic transport networks based on optical paths,” Int. J. Commun. Syst., vol. 8, p. 377-389, 1995.

[2] 川崎岳, 井波政則, 島崎大作, 行田克敏, “100Gbit/s高速大容量パケットトランスポートシステムの実用化開発,” 電子情報通信学会論文誌B, Vol.J99-B No.4 pp.275-282, Apr. 2016.

[3] O. Vassilieva, T. Hoshida, J. C. Rasmussen, and T. Naito, “Symbol Rate Dependency of XPM-induced Phase Noise Penalty on QPSK-based Modulation Formats,” ECOC2008, We. 1. E. 4, 2018.

[4] A. Bononi, M. Bertolini, P. Serena, and G. Bellotti, “Cross-Phase Modulation Induced by OOK Channels on Higher-Rate DQPSK and Coherent QPSK Channels,” IEEE J. Lightw. Technol., vol. 27, No. 18, pp. 3974-3983, 2009.

[5] Hideki Maeda, Yasuhiko Tada, Masatoyo Sumida, Shigeru Saito, Yshihiro Hayashi, “Performance Degradation of Long-Distance Optical WDM Networks Due to Bandwidth Limitations of Wavelength Multiplexers and Demultiplexers, “IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 11, No. 11, Nov. 1999.

[6] Hideki Maeda, Masatoyo Sumida, Tsutomu Kubo, Takamasa Imai, “Effectiveness of Receiver-Side Compensation against FBG

Dispersion-Induced SNR Degradation in Long-Haul WDM Optical Networks,” IEICE TRANS. COMMUN.LETTER, Vol. E35-B, No. 12, Dec 2002.

[7] Hideki Maeda, Masatoyo Sumida, Yasuhiko Tada, Takamasa Imai, “Wavelength-Selective Cross Connect Featuring Wide Flat Passband and High Cascadability for WDM Optical Networks, ” IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 13, No. 11, Nov. 2001.

[8] 前田英樹, 角田正豊, 多田康彦, 今井崇雅, “広いフラットな信号通過帯域と優れた多段接続性を持つ波長選択光クロスコネクト,” NTT R&D, Vol.50, pp. 1011-1019, Dec. 2001.

[9] Hideki Maeda, Hiroki Kawahara, Kohei Sito, Takeshi Seki, and Uunichi Kani, “Performance Degradation of SD-FEC due to XPM Phase Noise in WDM Transmission System with Low-Speed Optical Supervisory channel,” IEEE IPC2019, WB2.4, Oct. 2019.

[10] N. N. Khrais, F. Shehadeh, J.-C. Chiao, R. S. Vodhanel, and R. E. Wagner, “Multiplexer eye-closure penalties for 10 Gb/s signals in WDM networks,” presented at OFC’96, San Jose, CA, Feb. 25–Mar. 1, 1996, postdeadline paper PD33.

[11] I. Seto, M. Miyachi, M. Ogusu, and S. Ohshima, “95% reduction of power penalty utilizing nonsoliton RZ pulse techniques in ADM networks,” presented at ECOC’97, Edinburgh, Scotland, U.K., Sept. 22–25, 1997, paper Tu1A5.

[12] C. Casper, H.-M. Foisel, R. Freund, and B. Strebel, “Four-channel 10Gbit/s transmission over 15-wavelength-selective cross-connect paths and

1175-km dispersion-compensated standard single-mode fiber links," presented at OFC'98, San Jose, CA, Feb. 22–27, 1998, paper ThP3.

[13] G. Lenz, B. J. Eggleton, C. R. Giles, C. K. Madsen, and R. E. Slusher, "Dispersive properties of optical filters for WDM systems," IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, pp. 1390–1402, Aug. 1998.

[14] G. Lenz, G. Nykolak, and B. J. Eggleton, "Waveguide grating routers for dispersionless filtering in WDM system at channel rate of 10 Gbit/s," Electron. Lett., vol. 34, no. 17, pp. 1683–1684, 1998.

[15] G. P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics. New York: Academic, 1989.

[16] T. Takahashi, M. Aoyama, M. Murakami, and M. Amemiya, "Modeling of intersymbol interference effect on signal to noise ratio measurement in long haul optical amplifier," Electron. Lett., vol. 31, no. 25, pp. 2195–2196, 1995.

[17] M. Murakami, K. Suzuki, H. Maeda, T. Takahashi, A. Naka, and N. Ohkawa, "High-speed TDM-WDM techniques for long-haul submarine optical amplifier systems," Opt. Fiber Technol., vol. 3, no. 4, pp. 320–338, 1997.

[18] N. S. Bergano, F. W. Kerfoot, and C. R. Davidson, "Margin measurements in optical amplifier systems," IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 5, pp. 304–306, Mar. 1993.

[19] C. Casper, H. Foisel, R. Freund, B. Strebel, "Four-channel 10-Gbit/s transmission over 15-wavelength-selective cross-connect paths and 1175-km dispersion-compensated standard single-mode fiber links," OFC'98, ThP3 (1998).

[20] G. Lenz, B. J. Eggleton, C. R. Giles, C. K. Madsen, and R. E. Slusher, “Dispersive properties of optical filters for WDM systems,” IEEE J. Quantum Electron., vol. 34, pp. 1390–1402, Aug. 1998.

[21] M. Sumida, H. Maeda, and Y. Tada, “High performance 1 x 2 wavelength-selectiveswitch comprising string of 2 x 2 optical switchessandwiching channel-rejection devices,” Electron. Lett., vol. 36, no. 4, pp. 339–339, 2000.

[22] C. Clos, “A study of nonblocking switching networks ,” Bell Syst. Tech. J., pp. 407–425, 1953.

[23] G. Nykolak, B. J. Eggleton, G. Lents, and T. A. Strasser, “Dispersion penalty measurements of narrow fiber Bragg gratings at 10 Gb/s,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol.10, no.9, pp. 13191321, 1998.

[24] S. Saito, T. Matsuda, and A. Naka, “An analytical signal and noise expression for optical preamplifier receivers and its application,” Proc. OAA'97, TuD11, pp. 169-172, 1997.

[25] T. Takahashi, M. Aoyama, M. Murakami, and M. Amemiya, “Modeling of intersymbol interference effect on signal to nise ratio measurement in long haul optical amplifier,” Electron. Lett., vol. 31, no. 25, pp. 2195-2196, 1995.

[26] H. Maeda, K. Saito, T. Kotanigawa, S. Yamamoto, F. Hamaoka, M. Yoshida, S. Suzuki, and T. Seki, “Field Trial of 400-Gbps Transmission Using Advanced Digital Coherent Technologies,” IEEE J. Lightw. Technol., vol. 35, No. 12, pp. 2494-2499, 2017.

[27] O. Vassilieva, T. Hoshida, J. C. Rasmussen, and T. Naito, “Symbol Rate Dependency of XPM-induced Phase Noise Penalty on QPSK-based Modulation Formats,” ECOC2008, We. 1. E. 4, 2018.

[28] A. Bononi, M. Bertolini, P. Serena, and G. Bellotti, “Cross-Phase Modulation Induced by OOK Channels on Higher-Rate DQPSK and Coherent QPSK Channels,” IEEE J. Lightw. Technol., vol. 27, No. 18, pp. 3974-3983, 2009.

[29] J. Cho, C. Xie, and P. J. Winzer, “Analysis of soft-decision FEC on non-AWGN channels,” Opt. Express, vol. 20, No. 7, pp. 7915-7928, 2012.

第5章　総括

近年の通信トラヒックの急激な需要増加に伴い、アクセスネットワーク、メトロネットワーク、およびコアネットワークのネットワーク基盤を支える光トランスポートシステムにおいては、今後更なる大容量化と高機能化が求められている。国内ブロードバンドのインターネットトラヒックは、年率約20%で増加している。特に、スマートフォンなどのモバイル端末の普及によるモバイルトラヒックの増加が世界的にも顕著である。今後の5Gの商用化後は、さらなるトラヒック増加が見込まれる。このトラヒックの増加に対応するために、コアネットワークにOXC機能を有した1波長当たり100 GbpsのWDM光トランスポートシステムが2013年から中継網に導入され商用運用されている。今後、さらなる大容量化に対応するためには、既存光ファイバにも適用可能な1波長あり100 Gbpsを超えるBeyond 100G大容量化技術を確立する必要がある。また、トラヒックの変動に応じ動的に波長の分岐・挿入、方路を切り替えるためにOXC、OADMが用いられる。これらは、光合分波器を用いており、その光フィルタ特性によりWDM信号の特性を劣化させる。本研究では、WDM光伝送技術を適用した光トランスポートシステムにおける長距離、高速大容量伝送技術として、Beyond 100Gを実現する要素技術とWDM光伝送方式を確立するとともに、光合分波器、光監視信号による伝送特性劣化を評価し、その劣化抑圧技術を確立した。

第1章では、本研究の背景および狙いを明らかにし、本研究の意義および目的を示す。研究の背景として、WDM光トランスポートシステムにおける長距離、高速大容量化の課題となる光増幅器雑音、光ファイバの非線形光学効果、OXC等の光合分波器での光フィルタリングをまとめ、本研究の目的を述べた。

第2章では、光増幅中継伝送系における長距離、高速大容量化技術として、信号波形最適化技術、および、新規デジタルコヒーレン光伝送技術とマルチキャリア光伝送方式を用いたWDM光伝送方式について提案した。

信号波形最適化技術は、10Gbpsの2値の強度変調方式を用いた場合における信号波形のデューティーファクタによる伝送特性依存性を明らかにし、デューティーファクタが0.5以下でWDM光伝送特性が改善されることを明らかにした。新規デジタルコヒーレント光伝送技術は、光ファイバの非線形光学効果による波形劣化を低減する機能と高性能な符号誤り訂正機能を有し、従来のデジタルコヒーレント技術よりも約3dB特性が優れていることを明らかにした。また、本技術を適用したマルチキャリア400Gbps信号と100Gbps信号との混在伝送を実施し、混在伝送においても100Gbpsならびに400Gbps信号に劣化が無いことを実証した。さらに、従来のシングルモードファイバ（SMF）よりもコアを拡大したコア拡大光ファイバを用いることで、マルチキャリア400Gbps信号に対し、1,900kmのWDM光伝送が可能であることを示した。

第3章では、さらなる大容量化技術として超高速400Gbps/λ光増幅中継伝送技術を提案し、高ボーレートデジタルコヒーレント光伝送方式、デバイス特性補正技術、および高出力ラマン光増幅技術を用いたWDM光伝送方式について提案した。高ボーレート光伝送方式は、従来32Gボーの変調速度で多値変調を実現していたが、従来の倍以上の速度となる67Gボーにて変調を行うことにより、1波長当たり400Gbps/λを実現した。さらに、送受信特性改善のため、送受信機デバイスの特性補正技術を適用し、長距離大容量光増幅中継技術を確立した。送受信機デバイス特性補正技術は、送受信機のデバイスの周波数特性やばらつきを予等化により補正し、その実験特性改善結果を実験によって示した。高出力ラマン光増幅技術は、IEC規定に基づく光ファイバシステムに要求される光パワー、シャットダウン規定に基づいたコア拡大ファイバでの新規の高出力ラマン光増幅特性を明らかにし、従来光ファイバよりも光ファイバの非線形効果を抑圧し、かつ高光出力かつ低い雑音指数の光増幅が可能であることを示した。さらに、上記技術を用いて400Gbps/λ信号に対し、 2000kmのWDM光伝送が可能であることを示した。

第4章では、WDM光トランスポートネットワークにおいて、OXC、OADMの光合分波器による伝送特性劣化のメカニズムを解明するとともに、伝送特性劣化を改善する新規の光合分波器を用いたOXCについて提案した。さらに、長距離WDM光伝送実験により、提案のOXCの効果を実証した。光合

分波器によるフィルタリングに起因する伝送特性劣化について、10 Gbp×8チャネルWDM光伝送実験に新規の周回実験系を適用し、光合分波器の挿入位置を変化させて評価を行った。これにより、光合分波器が受信機の近くに挿入された場合、もしくは、光合分波器の間隔が小さい場合、伝送特性劣化が顕著であることを明らかにした上で、本伝送特性劣化を改善する新規の光合分波器を提案した。この光合分波器を適用したOXCは、原理的には通過信号に対して伝送特性劣化を生じさせない。10 Gbp×8チャネルWDM光伝送実験により評価し、従来の光合分波器を用いたOXC装置に対して、約1.5dB伝送特性を改善できることを示した。さらに、光合分波器の波長分散に対する影響を、6000km光伝送実験およびシミュレーションにより評価した。これにより、広いフラットな信号帯域を有する光合分波器であっても、光合分波器の波長分散特性で伝送特性が劣化すること、一方、それが許容累積分散の範囲であれば、受信端で一括分散補償することにより特性改善が可能であることを示した。また、システム化において必須となる光監視信号がWDM光主信号に与える影響を実験ならびにシミュレーションにより評価し、主信号の伝送特性に、光監視信号の信号パターン依存性、パワー依存性があることを明らかにした。100GbpsのWDM光信号と100Mbpsの2種類の信号パターン(100Mbps-Ethernet、OC-3)の光監視信号を用いて実験的に評価した結果、0/1交番信号が多く含まれている100M-Ethernet信号を用いた場合、顕著にWDM信号に劣化が見られた。これは、OSC信号の0/1交番信号がWDM信号に相互位相変調を誘発させ、SD-FEC特性を劣化させるためと考え、これに対して、光監視信号に0/1交番が多く含まれない疑似ランダムビットストリーム(PRBS)信号パターンを用いることを提案した。さらに、シミュレーションにより、光監視信号を0/1交番信号とPRBS信号とした場合について比較し、PRBS信号を光監視信号に用いた方が相互位相変調による光位相変調成分の抑圧考課が高く、WDM光伝送に適していることを明らかにした。

以上の検討により、本研究では、中継網におけるWDM光トランスポートシステムの長距離化、高速大容量伝送技術の確立を目的として、Beyond 100Gを実現する要素技術と伝送方式を提案してその有効性を示すとともに、光合分波器、光監視信号による伝送特性劣化を評価し、その劣化抑圧技術を提案して有効性を示した。本提案した技術を適用することにより、

増加し続ける通信トラヒック量に対して、トラヒック需要に対応した長距離、高速大容量な光トランスポートシステムが実現でき、経済的な通信ネットワークの構築、利用者の品質安定に貢献できると確信する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、懇切なる御指導と御鞭撻を賜りました北海道大学大学院情報科学研究科可児淳一客員教授（日本電信電話株式会社NTTアクセスサービスシステム研究所光アクセス基盤プロジェクト光アクセス基盤SEグループ上席特別研究員・グループリーダ）に謹んで深謝の意を表します。また、有益な御指導と御助言を賜りました北海道大学大学院情報科学院　大鐘武雄教授、齊藤晋聖教授、土橋宜准教授、山本強特任教授に謹んで深謝の意を表します。

本研究は、日本電信電話株式会社ネットワークサービスシステム研究所にて行った研究成果がベースにしたものです。現職での研究推進業務にあたりながら、著者の研究活動にご理解いただき、本論文をまとめる機会を与えていただきました、立元慎也所長、川端明生プロジェクトマネージャ、那賀明主幹研究員（現茨城大学教授）、三澤明グループリーダ（現千歳科学技術大学教授）に深謝いたします。また、デバイスイノベーションセンタ富澤将人所長、未来ねっと研究所木坂由明グループリーダ、平野章グループリーダ（現東京電機大学教授）、松岡信治部長（現NTT アドバンステクノロジ）には、本研究の機会を与えていただくとともに、多くの御指導、及び御激励をいただきました。ここに謹んで感謝の意を表します。さらに、宮村崇主幹研究員、斎藤航平研究員、河原光貴研究主任には、研究業務を進めていく上で多くの御協力をいただきました。ここに心から感謝申し上げます。その他、筆者が本研究遂行時に在籍した研究グループの皆様を中心として多くの方々に、御助言や励ましをいただくとともに、実証実験等でいろいろとお世話になりました。皆様に心から御礼申し上げます。

最後に、学位取得に至るまでの間、家族を支え続けてくれた妻・由佳子と、いつも励ましてくれた娘・侑里香、応援してくれた両親に心より感謝します。

研究業績リスト

主著

- **論文**

[1] Hideki Maeda, Kohei Saito, Takashi Kotanigawa, Shuto Yamamoto, Fukutaro Hamaoka, Mitsuteru Yoshida, Masahiro Suzuki, Takeshi Seki, “Field Trial of 400-Gbps Transmission Using Advanced Digital Coherent Technologies,” IEEE J. Lightw. Technol., vol. 35, issue 12, pp. 2494-2499, June 2017.

[2] Hideki Maeda, Kohei Saito, Takeo Sasai, Fukutaro Hamaoka, Hiroki Kawahara, Takeshi Seki, Takeshi Kawasaki and Junichi Kani, “Real-time 400 Gbps/carrier WDM transmission over 2,000 km of field-installed G.654.E fiber,” Optics Express, vol. 28, no. 2/20, pp. 1640-1646, January 2020.

- **レター**

[1] Hideki Maeda, Makoto Murakami, Norio Ohkawa, Takamasa Imai, “Optimization of Signal Pulse Duty Factor in Long-Distance optical Amplifier Systems,” IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 10, No. 8, Aug. 1998.

[2] Hideki Maeda, Yasuhiko Tada, Masatoyo Sumida, Shigeru Saito, Yshihiro Hayashi, “Performance Degradation of Long-Distance Optical WDM Networks Due to Bandwidth Limitations of Wavelength

Multiplexers and Demultiplexers,”IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 11, No. 11, Nov. 1999.

[3] Hideki Maeda, Masatoyo Sumida, Yasuhiko Tada, Takamasa Imai, “Wavelength-Selective Cross Connect Featuring Wide Flat Passband and High Cascadability for WDM Optical Networks,”IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 13, No. 11, Nov. 2001.

[4] Hideki Maeda, Masatoyo Sumida, Tsutomu Kubo, Takamasa Imai, “ Effectiveness of Receiver-Side Compensation against FBG Dispersion-Induced SNR Degradation in Long-Haul WDM Optical Networks,”IEICE TRANS. COMMUN.LETTER, Vol. E35-B, No. 12, Dec 2002.

[5] Hideki Maeda, Genraro Funatsu, Akira Naka, “Ultra-long-span 500km 16x10 Gbit/s WDM unrepeatered transmission using RZ-DPSK format,” ELECTRONICS LETTERS, Vol. 41, No. 1, Jan. 2005.

- **国際会議**

[1] Hideki Maeda, Yasuhiko. Tada, Masatoyo Sumida, Shigeru Saito, Yasuhiro Hayashi, “Transmission experiment over 4,000km in an optical WDM network using wavelength multiplexers and demultiplexers,” Proc. Networks and Optical Communications 1999, pp. 113-117, Nov. 1999.

[2] Hideki Maeda, Masatoyo Sumida, Yasuhiko Tada, “ Design Considerations for Long-Haul WDM Submarine Optical Networks with Wavelength-selective Optical Cross-Connects,”Proc. SubOptic 2001, P4.3.5, May 2001.

[3] Hideki Maeda, Masatoyo Sumida, Tsutomu Kubo, Takamasa Imai, “ Effectiveness of Receiver-Side Compensation against FBG Dispersion-Induced SNR Degradation in Long-Haul WDM Optical Networks,” LEOS2001, WK3, pp. 481-482, Nov. 2001.

[4] Hideki Maeda, Gentaro Funatsu, Akira Naka, ”Design Considerations of Long Span 10 Gbit/s WDM Unrepeatered Transmission Systems,” Proc. SubOptic 2004, P. We8.4, Apr. 2004.

[5] Hideki Maeda, Takashi Kotanigawa, Kohei Saito, Masahiro Yokota,Shuto, Yamamoto, Fukutaro Hamaoka, Mitsuteru Yoshida, Masahiro Suzuki, Takeshi Seki, “Field Trial of Simultaneous 100-Gbps and 400-Gbps Transmission Using Advanced Digital Coherent Technologies,” Proc. OFC2016, W1K.4, Mar. 2016(invited speaker).

[6] Hideki Maeda, Hiroki Kawahara, Kohei Sito, Takeshi Seki, and Uunichi Kani, “Performance Degradation of SD-FEC due to XPM Phase Noise in WDM Transmission System with Low-Speed Optical Supervisory channel,” IEEE IPC2019, WB2.4, Oct. 2019.

- **国内会議**

[1] 前田英樹，大須賀勝美，半谷精一郎，宮内一洋，“時間－振幅領域における確率密度分布測定と帯域制限されたディジタル伝送システムへの応用について,” 電子情報通信学会技術研究報告CS93-175, Jan. 1994.

[2] 前田英樹，深田陽一，林義博，“WDM伝送における発光タイミング制御を適用した非線形クロストーク抑圧法，” 電子情報通信学会総合大会論文集, B-1140, Mar. 1996.

[3] 前田英樹，深田陽一，林義博，“WDM長距離光増幅中継系における最適分散補償法，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会論文集, B-1100, Sep. 1996.

[4] 前田英樹，那賀明，林義博，“分散マネジメントを用いた10Gbit/s/ch WDM伝送システムの検討，” 電子情報通信学会技術研究報告 OCS96-57, Nov. 1996.

[5] 前田英樹，村上誠，那賀明，大川典男，“WDM伝送における相互位相変調による波形劣化，” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-204, March 1997.

[6] 前田英樹，村上誠，大川典男，今井崇雅，“長距離光増幅中継伝送特性の送信信号波形依存性，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-105, Aug. 1997.

[7] 前田英樹，村上誠，大川典男，今井崇雅，“長距離光増幅中継伝送系における信号波形最適化，” 電子情報通信学会技術研究報告 OCS97-44, Nov. 1997.

[8] 前田英樹，村上誠，今井崇雅，“WDM伝送システムにおける最適位相変調法，” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-119, Mar. 1998.

[9] 前田英樹，角田正豊，斉藤茂，今井崇雅，“長距離海底光ネットワークにおける光合分波器の帯域制限による伝送特性劣化，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-118, Sep. 1998.

[10] 前田英樹，多田康彦，角田正豊，斉藤茂，今井崇雅，“光合分波器を用いた長距離WDMネットワーク伝送実験，” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-127, Mar. 1999.

[11] 前田英樹，角田正豊，多田康彦，“広いフラットな信号通過帯域を持つ光クロスコネクト，” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-114, Mar. 2001.

[12] 前田英樹，角田正豊，久保勉，今井崇雅，“WDMネットワークにおけるFBG分散起因SNR劣化の受信端補償，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-112, Aug. 2001.

[13] 前田英樹，舩津玄太郎，那賀明，“高次ラマン増幅を適用した遠隔励起光増幅システムの伝送特性改善，” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-102, Sep. 2003.

[14] 前田英樹，“招待講演:400G超大容量光伝送システムの研究開発，” 電子情報通信学会技術研究報告PN2019-15, Aug. 2019.

- **学術誌**

[1] 前田英樹，村上誠，角田正豊，多田康彦，“FSA-WDMシステムの監視制御技術，” NTT R&D, Vol. 49, pp. 214 － 220, Apr. 2000.

[2] Hideki Maeda, Makoto Murakami, Masatoyo Sumida, Yasuhiko Tada, “Remote Supervisory System of FSA-WDM System,” NTT REVIEW, Vol.12, No. 4, pp. 25- 31, July 2000.

[3] 前田英樹，角田正豊，多田康彦，今井崇雅，“広いフラットな信号通過帯域と優れた多段接続性を持つ波長選択光クロスコネクト，” NTT R&D, Vol.50, pp. 1011-1019, Dec. 2001.

共著

- **論文**
- 連名著書（国外論文）

[1] M. Murakami, K. Suzuki, H. Maeda, T. Takahashi, A. Naka, N. Ohkawa, M. Aiki, “High-Speed TDM–WDM Techniques for Long-Haul Submarine Optical Amplifier Systems,” Optical Fiber Technology., vol. 34, issue 11, pp. 2824-2832, June 1997.

[2] M. Murakami, T. Matsuda, H. Maeda, T. Imai, “Long-Haul WDM Transmission Using Higher Order Fiber Dispersion Management, ”IEEE J. Lightwave Technol., vol. 18, issue 9, pp. 1197-1204, Sep. 2000.

[3] M. Murakami, T. Matsuda, H. Maeda, Y. Tada, T. Imai, “WDM Upgrading of an Installed Submarine Optical Amplifier System,” IEEE J. Lightwave. Technol., vol. 19, issue 11, pp. 1665-1674, June 2001.

[4] S. Yamamoto, K. Saito, F. Hamaoka, T. Matsuda, A. Naka, H. Maeda, “Characteristics Investigation of High-Speed Super-High-Density Multi-Carrier Transmission Using MIMO-Based Crosstalk Compensation in Homodyne Detection Scheme,” IEEE J. Lightwave Technol., vol. 34, issue 11, pp. 2824-2832, June 2016.

- 連名著書（国内論文）

[1] K. Hirata, H. Yamamoto, S. Kamamura, T. Oka, Y. Uematsu, H. Maeda, and M. Yamamoto, “System design for traveling maintenance in wide-area telecommunication networks," to appear in IEICE Transactions on Communications, 2019.

- 連名著書（国内レター）

[1] Ikuma Yuichiro, Yokota Masahiro, Saito Kohei, Kitamura Kei, Tsuboi Shunichi, Kuwahara Shoichiro, and Maeda Hideki, “Field experiment of 400-Gbps transmission in C+L-band over dispersion-shifted fiber,” IEICE Communications Express, Vol. 7, No. 7, Sep. 2018.

- 連名著書（国外論文誌レター）

[1] M.Murakam, H.Maed, T.Takahash, N.Ohkaw, T.Imai, “Transoceanic Twelve 10 Gbit/s WDM Signal Transmission Experiment with Individual Channel Dispersion and Gain Compensation and Prechirped RZ Pulse Format,” ELECTRONICS LETTERS, Vol. 33, No. 25, pp.2145-2146, Dec. 1997.

[2] M. Murakami, H. Maeda, T. Imaii, “Long-Haul 16 10 Gb/s WDM Transmission Experiment Using Higher Order Fiber Dispersion Management Technique,” IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, Vol. 11, No. 7, July 1999.

[3] M.Sumida, H.Maeda, Y.Tada, “High performance 1 x 2 wavelength selective switch comprising string of 2 x 2 optical switches sandwiching channelrejection devices,” ELECTRONICS LETTERS, Vol. 30, No. 4, pp.339-340, Feb. 2000.

[4] M. Sumida, H. Maeda, Y. Tada, “Asymmetric bi-directional WDM transmission of 8 (total) 10Gbit/s channels using bi-directional amplifier comprising single unidirectional optical amplifier and four-port Mach-Zehnder WDM coupler,” ELECTRONICS LETTERS, Vol. 36, No. 20, pp.1722-1724, Sep. 2000.

[5] M. Sumida, H. Maeda, T. Imai, “Ten-repeatered bi-directional WDM transmission of eight channels at 10 Gbit/s using single-wavelength-band operating bidirectinal amplifiers,” ELECTRONICS LETTERS, Vol. 37, No. 13, June 2001.

- 連名著書（国際会議）

[1] Y. Hayashi, Y. Fukada, H. Maeda, “Verification of four-wave mixing suppression in WDM transmission experiments on the FSA commercial system with dispersion managed optical fiber cable,” OFC’96,Tul7, Mar. 1996.

[2] M. Murakami, K. Suzuki, H. Maeda, T. Takahashi, A. Naka, N. Ohkawai, “High-Speed TDM–WDM Techniques for Long-Haul Submarine Optical Amplifier Systems,” SubOptic'97., vol. 34, issue 11, pp. 495-503 , May 1997.

[3] M.Murakami，H.Maeda, T.Imai, “Long-haul 16x10 WDM Transmission Experiment Using Higher Order Fiber Dispersion Management Technique,” ECOC’98, Vol. 1, pp. 313-314, Sep. 1998.

[4] Y. Tada, M. Murakami, T. Matsuda, H. Maeda, M. Sumida, T. Imai, “10 Gbit/s x 4-ch WDM Upgrading System on an Installed Optical Amplifier

Submarine Designed for Single-Wavelength Channel Transmission," OFC2000,FA-4, Mar. 2000.

[5] M. Murakami, T. Matsuda, H. Maeda, Y. Tada, T. Imai, "WDM-upgrading of an installed submarine optical amplifier system: FSA-WDM system," SubOptic2001., Paper T3.4.3 , May 2001.

[6] G. Funatsu, H. Maeda, A. Naka, " Suppression of Stimulated Brillouin Scattering by using RZ-DPSK format in long-span unrepeatered transmission system ," IEEE LEOS2004, ThC3, July 2004.

[7] Tomoyoshi Kataoka, Shinji Matsuoka, Toshiya Matsuda, Hideki Maeda, Norio Sakaida,Tsutomu Kubo, Takashi Kotanigawa, Takeshi Kawasaki, "Field transmission by using a commercially-ready 43 Gbit/s DWDM system employing RZ-DQPSK transponders in high PMD installed fiber," OFC2007,JThA45, Mar. 2007.

[8] A. Naka, H. Maeda, T. Kataoka, S. Matsuoka, "Development of Commercial Remotely-Pumped EDFA system," SubOptic2007, WE2.13, May 2007.

[9] A. Matsuura, T. Matsuda, T. Seki, H. Takechi, H. Maeda, A. Naka, K. Oda, " Field PMD Measurements of a New 900 km Repeatered Submarine System Designed for 43 G WDM Transmission," SubOptic2010, THU 3A02, May 2010.

[10] S. Yamamoto, K. Saito, A. Naka, H. Maeda, "Hitless Spectrum Defragmentation in Flexible Grid Optical Network Using Maximum Ratio

Combining in Wavelength Diversity Transmission," OECC2015, JThB.33, Jun 2015.

[11] Kohei Saito, Masahiro Yokota, Fukutaro Hamaoka, Shuto Yamamoto, Takashi Kotanigawa, Hideki Maeda, Akira Nakai, "Evaluation of Maximum Ratio Combining in Route Diversity Transmission and Application to Hitless Optical Path Switching in Field Installed Fibre," ECOC2015, P.4.1, Sep. 2015.

[12] S. Yamamoto, K. Saito, A. Naka, H. Maeda, "Compatibility between Nonlinear Compensation and Crosstalk Compensation Using MIMO Processing in Super-High-Density Multi-Carrier Transmission System," ECOC2015, T.h.2.5.3, Sep. 2015.

[13] Akira Naka, Kohei Saito, Kazuki Tomita, Hideki Maeda, "Maximum Ratio Combining Characteristics Affected by Laser Phase Noise for Wavelength Diversity Digital Coherent System," OECC2016, WA2-36, Jul. 2016.

[14] Kohei Saito, Takashi Kotanigawa, Hideki Maedai, "High-density multi-carrier optical transmission using MIMO-based subcarrier crosstalk compensation," OECC2107., pp. 715-716, Aug 2017.

[15] F. Hamaoka, Takeo Sasai, Kohei Saito, Takayuki Kobayashi, Asuka Matsushita, Masanori Nakamura, Hiroki Taniguchi, Shoichiro Kuwahara, Hiroki Kawahara, Takeshi Seki, Josuke Ozaki, Yoshihiro Ogiso, Hideki Maeda, Yoshiaki Kisaka, and Masahito Tomizawa, "Dual-Carrier 1-Tb/s

Transmission Over Field-Deployed Large-Core Pure=Silica-Core Fiber Link Using Real-Time Transponder," OECC2019, PDP.1, July 2019.

[16] H. Kawahara, Kohei Saito, Masahiro Nakagawa, Takashi Kubo, Takeshi Seki, Takeshi Kawasaki, Hideki Maeda, Tomohiro Sekino, Naoki Bannai, Masaki Shinkai, Tomoki Sakamaki, Kenjiro Yamanaka, and Takashi Kurimoto, "Real-time demonstration of 600Gbps/carrier WDM transmission and highly-survitable adaptive restoration on field installed fiber," OECC2019, TuB2-2, July 2019.

- 連名著書(国内講演)

[1] 深田陽一, 前田英樹, 高橋哲夫, 林義博, "海底光増幅器中継伝送方式(商用伝送路)を用いた10Gbit/s/ch波長多重伝送実験 : 2×10Gbit/s 2,715kmならびに5×10Gbit/s 905km波長多重伝送," 電子情報通信学会技術研究報告OCS, 95(272), 93-98, Sep. 1995.

[2] 深田陽一, 前田英樹, 林義博, 今井 崇雅, "偏波スクランブリングによるスペクトル拡がりの解析," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-1102, Sep. 1996.

[3] 村上誠, 前田英樹, 大川典男, 今井崇雅, "光位相変調の併用による長距離光増幅中継伝送特性の改善," 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-106, Sep. 1997.

[4] 村上誠, 前田英樹, 今井崇雅, "光帯域阻止フィルタリングによる光増幅中継伝送系の四光波混合抑圧," 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-115, March 1998.

[5] 角田正豊, 前田英樹, 林義博,“海底光リングネットワーク経済化構成についての一検討,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-119, Sep. 1998.

[6] 村上誠, 前田英樹, 今井崇雄,“ファイバ高次分散マネジメントによる16×10Gb/s長距離波長多重伝送,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-167, Sep. 1998.

[7] 村上誠, 松田俊哉, 前田英樹, 角田正豊, 多田康彦, 今井崇雅,“FSA-WDM海底光増幅中継伝送システム-4×10Gb/sアップグレード,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-142, March 2000.

[8] 角田正豊, 前田英樹,“対抗信号が波長域を共用する双方向光増幅器,”電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-130, March 2001.

[9] 角田正豊, 前田英樹, 今井崇雅,“10中継8x10Gbit/s非対称双方向光伝送実験,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-118, Aug. 2001.

[10] 舩津玄太郎, 前田英樹, 那賀明,“実効断面積 (Aeff) 拡大ファイバを適用した遠隔励起光増幅システムの伝送特性改善,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-38, March 2003.

[11] 舩津玄太郎, 前田英樹, 那賀明,“RZ-DPSK方式を適用した遠隔励起光増幅システムの伝送特性評価,”電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-65, March 2004.

[12] 那賀明, 前田英樹, 舩津玄太郎, 松岡伸治, 片岡智由,“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,” 電子情報通信学会技術研究報告OCS, 105(76), May 2005.

[13] 松浦暁彦 , 前田英樹 , 那賀明, 松岡伸治,“遠隔励起光増幅方式による長スパン1000km WDM伝送実験,”電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-40, Sep. 2007.

[14] 松浦暁彦, 前田英樹, 那賀明, 松岡伸治,“遠隔励起光増幅方式によるWDM多中継伝送 : 遠隔励起光増幅方式における伝送劣化要因の検討,”電子情報通信学会技術研究報OCS, 107(444), Jan. 2008.

[15] 松田俊哉, 松浦暁彦, 関剛志, 武智宏人, 前田英樹, 那賀明, 織田一弘,“43G 900km有中継海底システムの伝送設計とフィールドPMD測定,”電子情報通信学会技術研究報OCS, 110(176), Aug. 2010.

[16] 福田亜紀, 林理恵, 武田知典, 植松芳彦, 笹山浩二, 前田英樹,“自動リアクティブ型帯域ブースト機能の適用領域,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-6-20, March 2014.

[17] 山本秀人, 齋藤航平, 那賀明, 前田英樹,“MIMO処理による信号間クロストーク補償を用いた超高密度マルチキャリア偏波多重QPSK信号の伝送特性評価,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-43, Feb. 2015.

[18] 山本秀人, 齋藤航平, 那賀明, 前田英樹,“最大比合成を用いた波長ダイバーシティ伝送によるフレキシブル光ネットワークに対する無瞬断波長デフラグの実現,” 子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-66, Aug. 2015.

[19] 齋藤航平, 横田昌宏, 濱岡福太郎, 鈴木昌弘, 山本秀人, 関剛志, 小谷川喬, 前田英樹, 那賀明,“経路ダイバーシティ伝送における最大

比合成を用いたビットレス光経路切替,” 電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, B-10-67, Aug. 2015.

[20] 横田昌宏, 北村圭, 宮村崇, 前田英樹, “Beyond 100G光トランスポート網の信頼性向上に関する提案,” 電子情報通信学会総合大会講演論文集, B-10-22, Mach. 2016.

[21] 平田孝志, 山本宏, 鎌村星平, 植松芳彦, 前田英樹, 山本幹, “巡回型保守実現のための設備設計最適化,” 電子情報通信学会技術研究報告NS, 117(3), 31-36, April 2017.

[22] 植松芳彦, 沖野修, 林理恵, 岡利幸, 木村正二, 前田英樹, “光トランスポート網における機能分離トレンドの利用法,” 電子情報通信学会技術研究報告PN,117(473), 67-74, March 2018.