

100 Tbps光通信を実現する 光変復調技術と光ノード技術

Technologies for Optical Transceivers and Optical Nodes to Increase Transmission Capacity to 100 Tbps

● 星田剛司

● 谷村崇仁

● 加藤智行

● 渡辺茂樹

● 陶 振寧

あらまし

人・情報・モノをつなぐハイパーコネクテッド・ワールドの実現や、IoT(Internet of Things)、ビッグデータ、人工知能(AI)、および第5世代移動通信システム(5G)を含むICTの将来にわたる発展には、情報の伝達を支える光ファイバー通信ネットワークの大容量化が不可欠である。ネットワークを流通するデジタルデータは増大する一方であり、2020年以降に光ファイバー 1芯あたり100 Tbps級の伝送容量が必要になると予測されている。しかし、従来技術の改良による大容量化は限界に近づきつつあり、限界を打破する新しい技術の研究開発が必須である。そこで筆者らは、光ファイバー通信ネットワークの主要な構成要素である光送受信器および光ノードについて、大容量化技術の研究開発に取り組んでいる。

本稿ではこのうち、大容量信号を送受信するための光変復調技術と、広帯域光信号を低電力にスイッチング処理するための光ノード技術の開発に関する最新の取り組みを紹介する。

Abstract

Enhancing the capacity of optical communication networks is essential to achieving a hyper-connected world in which people, information, and things are connected and to enabling continued development of information and communications technologies (ICT) such as the Internet of Things (IoT), big data, artificial intelligence, and 5G mobile communications. In particular, increasing optical fiber capacity to more 100 Tbps by 2020 or later is needed to handle the ever-increasing volume of digital data traffic. Since conventional technologies are getting close to the transmission limit, technological breakthroughs enabling higher capacity must be made. Given this requirement, we are researching and developing key technologies for optical transceivers and optical nodes that will enable transmission capacity to be increased. In this paper, we introduce our recent advances in optical modulation and demodulation technologies for sending and receiving large-capacity signals and in optical node technologies for achieving energy-saving broadband optical signal switching.

ま え が き

情報通信ネットワークを流通するデータトラフィックは、例えば国内のインターネットにおけるダウンロードトラフィック総量に見られるように、年率1.2～1.5倍程度のペースで飛躍的な増大を続けている⁽¹⁾。近年のトラフィックの増大要因としては、クラウド型のネットワークサービスの増加や、スマートフォン・タブレットの急速な普及によるモバイルトラフィックの急増が挙げられる。更に、2020年のサービス開始を目指した第5世代移動通信システム（5G）の研究開発も活発化しており、今後もトラフィックの増大は継続するものと予想される。

増大を続ける通信需要に応えるように、基幹ネットワークを支える光ファイバー通信システムは、これまで時間分割多重（TDM：Time Division Multiplexing）、1990年代から波長分割多重（WDM：Wavelength Division Multiplexing）、2000年代からデジタルコヒーレント技術などの新技術の開発や導入によって進化を続け、低廉かつ高信頼、そして低消費電力での情報伝送を実現してきた（図-1）⁽²⁾。今後、更なるトラフィック増大の要求に応えるためには、現状10 Tbps級にとどまっている伝送システム容量を2020年頃に100 Tbps級に増加させることが目標となる。しかし、従来技術の改良による大容量化は限界に近付いており、その限界を打破する新しい世代の技術開発が必要になる。

現在の基幹ネットワークは、図-2に模式的に示すように、主に光送受信器、光ファイバー（伝送路）、

光ノード、およびL2/L3などの電気スイッチングノードで構成される。富士通は、これらの機能をFUJITSU Network 1FINITY（ワンフィニティ）シリーズとして商品化している⁽³⁾。現状の光送受信器の主流は1波長あたり100 Gbpsが主流であるが、高次多値変復調技術の採用により、1波長あたり200 Gbpsの大容量化も実現している。伝送路は低損失（0.2 dB/km以下）の石英系光ファイバーであり、光増幅器と組み合わせることで超長距離通信が可能になっている。

複数のノードを有するネットワークにおいては、光送受信器による伝送容量の大容量化とともに、ノードにおける経路制御の処理容量を増大させることも必要である。この経路制御は、現状では主として電氣的スイッチにより実現されているが、近年の伝送容量の拡大に伴って、スイッチで消費される電力が爆発的に増大するという問題がある⁽⁴⁾。これに対して、ノードで消費される電力を抑えるために、光波長パス単位での経路切り替えが導入されている。このような技術を発展させて、電氣的スイッチをオフロードし、ダイナミックにパスを切り替える研究開発が進められている^{(4)～(6)}しか

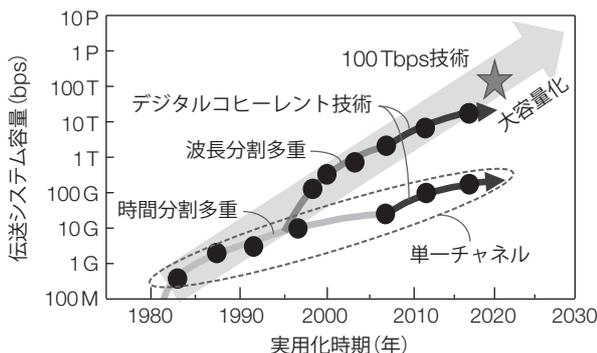


図-1 光伝送システム容量の動向

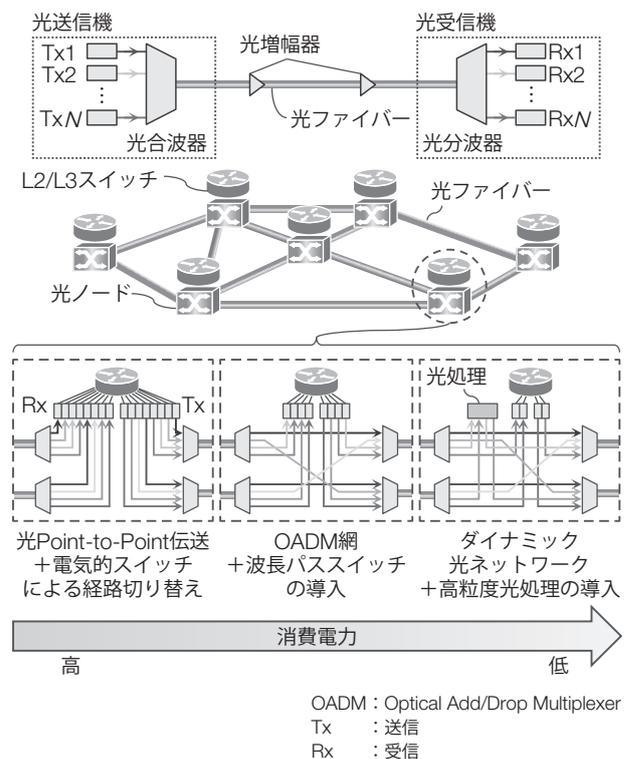


図-2 基幹ネットワークの模式図

し、普及に際しては様々な技術的課題があり、依然として電氣的スイッチの比重が大きいのが現状である。

本稿ではまず、100 Tbpsの伝送容量実現に向けた課題を述べる。更に、その課題の解決に向けた研究開発の例として、大容量信号を送受信する光変復調技術と、広帯域光信号を低電力にスイッチング処理する光ノード技術の開発に関する最新の取り組みを紹介する。

100 Tbpsシステム実現に向けた課題

伝送距離に対する最大伝送容量の関係を図-3に示す。ここで、中継器間隔100 km、光ファイバー損失0.2 dB/km、増幅器の雑音指数（NF：Noise Figure）3, 5, 7 dBとし、50 GHz間隔80波（C帯）と240波（C帯+L帯）のWDM信号に対するシャノン限界を最大伝送容量とする。現在一般的な光伝送システムでは、1波長あたり100 Gbpsの光送受信器を用いて、C帯と呼ばれる4 THz程度の帯域（波長にして1,530 nm～1,565 nm）で通信を行っている。この帯域において、50 GHzの周波数（波長）間隔でWDMを行うことで、およそ10 Tbpsの容量が実現されている。

100 Gbpsの光送受信器では4値位相変調（QPSK：Quadrature Phase Shift Keying）による変復調が

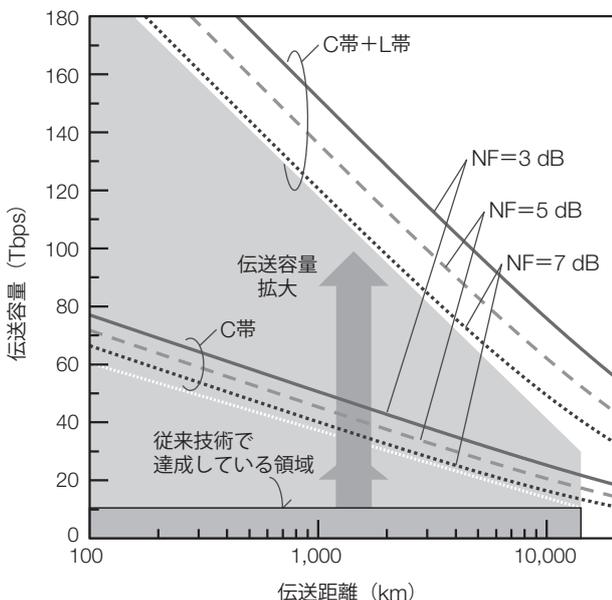


図-3 伝送距離に対する最大伝送容量の関係

行われているが、変調の一層の多値化を進めることによる大容量化が考えられる。しかし、多値化を進めるに従って、高い信号対雑音比でなければ受信できなくなることから、特定の距離を伝送するために光ファイバー1本で実現できる伝送容量は制限される（シャノン限界）。変復調の多値化のみでQPSKの10倍の容量を実現するためには、多値度として2の20乗（1,048,576値）が必要となってしまう、現実解とはなり得ない。一方、新しい波長帯を開拓することによって、伝送可能帯域を拡大させることも考えられる。しかし、広帯域化のみによる10倍の容量実現もまた、光増幅技術の実用性の観点などから見通しが立たない。

そこで、100 Tbpsの実現に向けては、高次多値変復調技術と広帯域化技術を適切に組み合わせることになる。例えば、C帯に加えてL帯（C帯の長波長側にある1,565 nm～1,635 nm）を併せた波長範囲に従来の3倍の帯域を確保した上で、QPSKの3倍の容量を実現する64値直交振幅変調方式（QAM：Quadrature Amplitude Modulation）を採用し、更にWDMの波長チャンネルの間隔を2割削減することで、およそ10倍の容量が実現できる。

高次多値変復調技術は伝送容量拡大のためのキーテクノロジーであるが、変調の多値化に伴って、システム全体に高い信号対雑音比を確保する技術が課題となる。更に、光伝送路や送受信器内の電気回路の非線形特性に起因するひずみの影響も深刻になるため、これを解決する補正技術の実現が課題となる。^{(7), (8)}

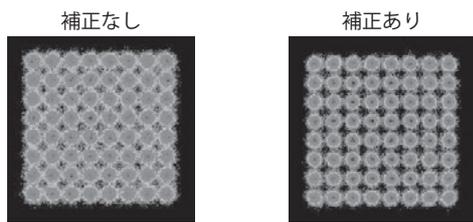
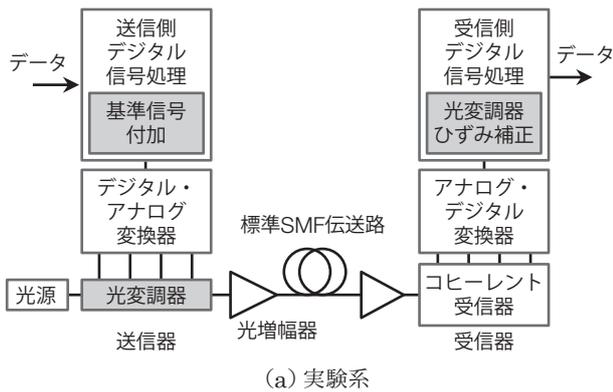
一方、伝送する光信号の容量が10倍になると、ノードにおいても10倍の電氣的処理容量が必要になり、これに伴ってネットワークの消費電力が急激に増大することも問題となる。CMOS（Complementary Metal Oxide Semiconductor）電子回路の進化に頭打ちの傾向が予測される中、100 Tbps級のネットワークを実現するためには、従来電氣的に行ってきた処理を光処理に置き換えることがますます重要となる。しかし、光ノードによるスイッチでは、同じ波長の光が同じ光ファイバー内を伝搬することができないという問題（波長衝突）を解決することが課題となる。⁽⁶⁾

高次多値変復調技術

100 Tbpsの伝送容量実現に向けて、従来の3倍の周波数利用効率を実現するDP-64QAM (Dual Polarization 64QAM) 技術の研究開発を進めている。

一般に、DP-64QAMに代表される高次多値変調信号を用いる光送受信器の構成部品には、線形性などへの高い精度が求められる。しかし、高精度部品の使用は通信システムのコストを押し上げる。また、高い精度を維持しながら集積化することは困難であるため、システムの小型化が難しいという課題がある。これらの課題を解決するために、筆者らは光送受信器の主要部品の一つである光変調器のひずみを補正する新しい光通信方式を開発した (図-4 (a))。

開発した方式では、送信器側で伝送路における信号ひずみの影響を受けにくい独自の基準信号をデータ信号と併せて送信し、受信器側で光変調器のひずみを効果的に補正する。従来の光受信器では、伝送路等化後にキャリア位相再生を行う必要があるため、光変調器のひずみが大きい場合は補正が困難であった。今回、独自の基準信号を用い



(b) 受信結果 (64QAM)

図-4 DP-64QAM光信号伝送および光変調器のひずみ補正技術検証実験

ることで、伝送路等化より前に位相再生を可能とする技術を開発した。この技術によって、受信器はまず位相再生と光変調器のひずみ補正を行い、その後伝送路等化を行うことができる。そのため、大きな光変調器のひずみを受信側で補正できるようになる (図-4 (b))。

この技術を適用し、シングルモードファイバー (SMF) を用いてDP-64QAM伝送実験を行ったところ、160 kmの無中継光信号伝送に成功した⁽⁸⁾。

この受信端補正技術により、精度の低い光変調器をDP-64QAMなどの高次多値変調技術と組み合わせて使うことが可能となり、低コスト・小型ながらも大容量の光通信システム実現への道が開けると考えている。

光ノードにおける波長変換技術

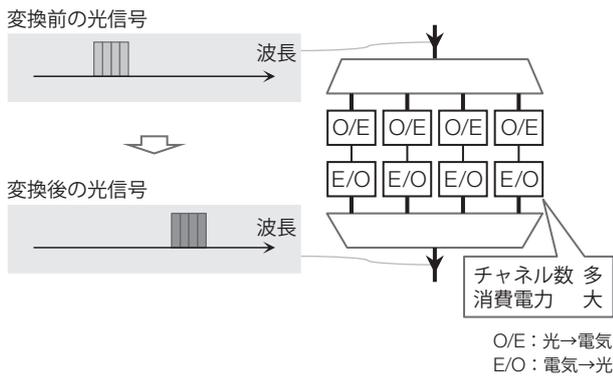
光ネットワークの低消費電力化に有効な光処理技術として、光ノードでの波長衝突を解決する波長変換技術の研究開発を進めている。

波長変換技術としては、光受信器で一旦電気信号に変換し、再度送信器から送信する方法が考えられる (図-5 (a))。これには、光→電気→光の相互変換に伴って処理遅延が増大することと、波長ごとに変換回路が必要であり、変換波長数の増加に比例して消費電力が増大することという二つの課題がある。この消費電力の増大を抑えるために、非線形光学効果と波長フィルターを用いた一括光波長変換技術の実験報告がなされている (図-5 (b))⁽⁹⁾。しかし、変換前の信号の波長を除去するため、変換前後の波長の組み合わせに制限が生じてしまう問題があった。

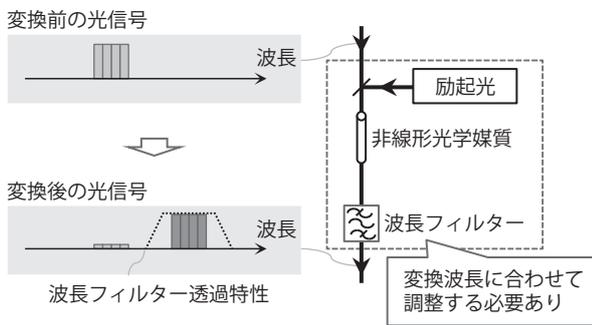
そこで、図-5 (c) に示すような偏波状態を制御する波長変換⁽¹⁰⁾について、偏波多重された光信号を一括で変換する光回路構成を新たに提案した。これを用いて、入力光の波長や変調方式に制約されことなく柔軟に運用できる波長変換技術の効果を、1 Tbps超の光信号を用いて実証した⁽¹¹⁾。(注)

この波長変換技術では、波長変換と同時に光信号の偏波状態が変化する。このため、従来技術の波長フィルターではなく、偏波子によって波長変

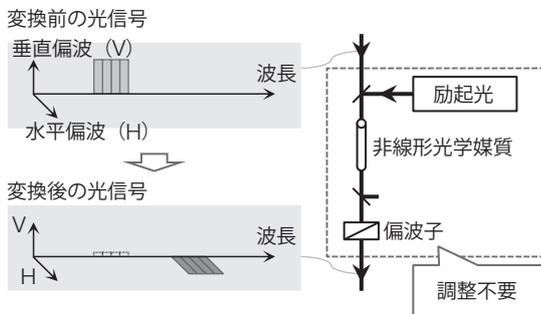
(注) この実証実験は、ドイツのフラウンホーファー・ハインリッヒ・ヘルツ研究所との共同研究により実施した。



(a) 電気信号への変換を用いた波長変換



(b) 非線形光学効果と波長フィルターを用いた波長変換



(c) 提案する新しい波長変換技術

図-5 波長変換技術

換前の光信号を除去できるようになる。変換前の光信号を垂直偏波・水平偏波の二つの成分に分離して並列に波長変換し、再び合成することにより、偏波多重信号にも対応可能とした。更に、励起光の波長間隔を制御することにより、変換後の波長を容易かつ任意に調整できることも本技術の特長である。

本技術により、従来は例えば1 Tbpsの大容量光信号を波長変換するために電気信号への変換装置が10台必要となっていた場合でも、1台の波長変換

装置による一括変換が可能になり、同等の機能を大幅に低い電力で実現できる。また、変換前後の波長に制約がないため、柔軟にネットワークの構成を変更でき、次世代光ネットワークの実現に対する貢献も期待できる。

む す び

本稿では、近未来の光ネットワークに求められる100 Tbps光通信技術の課題を述べ、富士通研究所が解決に向けて取り組んでいる技術開発の一端を紹介した。そして、シリコンフォトニクスなどの集積回路技術と組み合わせることで、光送受信器の低コスト化および小型化の同時実現につながるものと期待される光変調器のひずみを補正する技術と、将来の低消費電力で柔軟なネットワークへの適用が期待できる波長変換技術を実証した。

これらの技術に加え、広帯域な光増幅技術を統合していくことで、次世代の大容量光ネットワーク基盤が実現され、5Gモバイルネットワークや多様なIoT (Internet of Things) サービスを支える次世代分散コンピューティングなどのICTの進化をもたらすことが期待される。

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フィックの集計・試算. 2016年11月の集計結果の公表.
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000119.html
- (2) 宮本 裕ほか：毎秒ペタビット級伝送の実現を目指した高密度空間多重光通信技術. NTT技術ジャーナル, Vol.26, No.8, p.52-56 (2014).
- (3) 富士通：光伝送システム「1FINITY」シリーズのラインアップを大幅拡充.
<http://pr.fujitsu.com/jp/news/2016/03/23.html>
- (4) K. Ishii et al. : Unifying Top-Down and Bottom-Up Approaches to Evaluate Network Energy Consumption. Journal of Lightwave Technology, Vol.33, No.21, p.4395-4405, November 2015.
- (5) T. Richter et al. : Coherent Subcarrier Processing Node Based on Optical Frequency Conversion and Free-Running Lasers. Journal of Lightwave Technology, Vol.33, No.3, p.685-693, February 2015.

- (6) X. Wang et al. : Efficient All-Optical Wavelength Converter Placement and Wavelength Assignment in Optical Networks, Proceeding of Optical Fiber Communication Conference. W2A.52, March 2016.
- (7) T. Hoshida : Mitigation of Nonlinear Propagation Impairments by Digital Signal Processing. Proceeding of European Conference on Optical Communication, Th.1.A.1, September 2016.
- (8) L. Dou et al. : 420 Gbit/s DP-64QAM Nyquist-FDM Single-Carrier System. Proceeding of Optical Fiber Communication Conference, Tu3A.5, March 2016.
- (9) S. J. B. Yoo : Wavelength conversion technologies for WDM network applications. Journal of Lightwave Technology, Vol.14, No.6, p.955-966, June 1996.
- (10) T. Kato et al. : THz-Range Optical Frequency Shifter for Dual Polarization WDM Signals Using Frequency Conversion in Fibre. Proceeding of European Conference on Optical Communication, W.3.C.1, September 2016.
- (11) T. Kato et al. : Continuously Tunable Optical Frequency Shifter of 1.6-Tb/s Superchannel up to THz-Range by Polarization Switched Frequency Conversion. Proceeding of Optical Fiber Communication Conference, Th1F.2, March 2017.



加藤智行 (かとう ともゆき)

ネットワークシステム研究所
光ネットワークプロジェクト
光ファイバー通信システムの研究開発
に従事。



渡辺茂樹 (わたなべ しげき)

ネットワークシステム研究所
光ネットワークプロジェクト
光ファイバー通信システムの研究開発
に従事。



陶 振寧 (たお ぜんにん)

富士通研究開発中心有限公司
通信技術研究部
光ファイバー通信システムの研究開発
に従事。

著者紹介



星田剛司 (ほしだ たけし)

ネットワークシステム研究所
光ネットワークプロジェクト
光ファイバー通信システムの研究開発
に従事。



谷村崇仁 (たにむら たかひと)

ネットワークシステム研究所
光ネットワークプロジェクト
光ファイバー通信システムの研究開発
に従事。