

4 マルチテラビット光伝送

世界で初めて1波長で毎秒2.02テラビットの光信号を伝送することに成功

NTT 未来ねっと研究所（以下、未来研）では NTT 先端集積デバイス研究所（以下、先デ研）と共同で、増え続ける通信トラフィックを収容可能なネットワーク（以下、NW）の実現に資する研究に取り組んでいる。本稿では1波長あたりで世界最高速の光伝送実験に成功した実験について紹介する。

デジタルコヒーレント技術で 増大する通信トラフィック需要に 応える研究

AI やクラウドコンピューティングを活用する次世代のサービスやアプリケーションでは大容量かつ高速な通信を必要となる。このような継続した通信トラフィックの増大に対応していくため、IOWN(Innovative Optical and Wireless Network) 構想の基幹光通信NWであるAPN(All Photonics Network)には大容量化を経済的に実現することが求められている。

未来研はこのニーズに応えるため、光の波としての性質（偏波・振幅・位相）を利用したデジタルコヒーレント技術の研究に力を入れてきた。さらに先デ研の超高速デバイス技術と未来研のデジタル信号処理技術との高度な融合により1波長あたりの伝送容量の拡大に取り組んできた。

光通信の伝送容量を拡大するには光ファイバ1本あたりの伝送容量を増やすことが重要であり、さらに経済的な光伝送システムの実現には、1波長あたりの伝送容量を増やすことが必要である。この研究テ



NTT 未来ねっと研究所 トランスポートイノベーション研究部
(左から) 特別研究員 中村 政則氏 主任研究員 濱岡 福太郎氏
NTT 先端集積デバイス研究所 光電子融合研究部
特別研究員 長谷 宗彦氏 研究主任 徐 照男氏

マにおいては高速信号生成が求められるため、未来研と先デ研ではDAC(Digital Analog Converter)とAMUX(Analog Multiplexer)を組み合わせた帯域ダブラという技術の研究に取り組んできた。2019年3月には光の波形を1秒間に何回切り替えるかを示すシンボルレートが100ギガボー（以下、GBaud）を超える高速光信号を生成し、1波長あたり毎秒1テラビット（以下、Tbps）の長距離伝送を行うことに世界で初めて成功したことを発表している。

1波長あたり2Tbps以上の 長距離伝送を実現するための課題

現在、NTTでは1波長あたり最大1.2Tbpsを実現するデジタルコヒー

レント技術の開発を進めており、APNの基幹NWには将来的に1波長あたり2Tbps（マルチテラビット）以上の伝送速度が求められる。マルチテラビット光伝送の実現には、光送受信機の更なる広帯域化と同時に、光送受信回路部の理想からのずれ（信号経路長差や信号経路による損失ばらつき等）を極めて高精度に補償する技術が必要であった。

最先端の光伝送技術とデバイス 技術を活用した高速大容量な 光NW実現への取り組み

未来研にはこうした問題の解決につながる研究に取り組む組織がある。高速大容量かつスケラブルな光トランスポートNWの実現に向けた技術開発を行うNTTイノベ

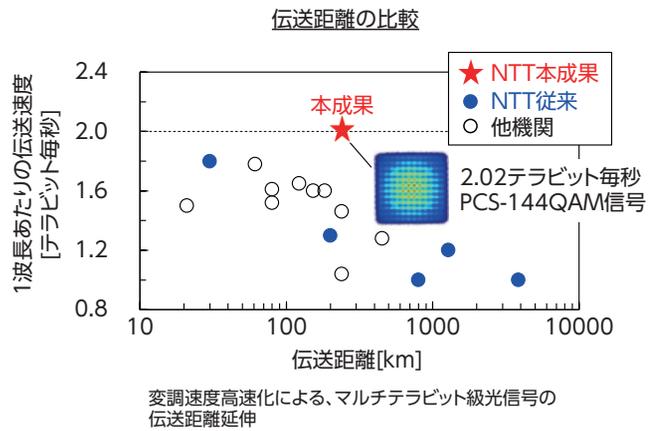
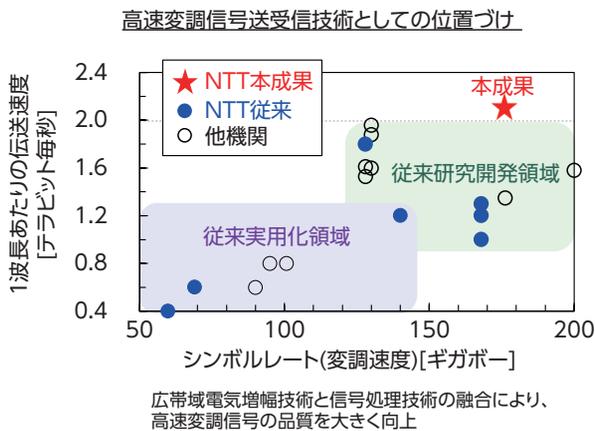


図1 世界初の毎秒マルチテラビット(2テラビット超) 実証

ティブフォトニックネットワークセンタ(以下、IPC)だ。IPCでは、未来研が牽引する世界トップの光伝送技術と先デ研が有する最先端のデバイス技術の融合により、次世代の光通信方式の具現化と光伝送システムの更なるスケラビリティの可能性を探求に力を入れている。

超広帯域デバイスと高精度なデジタル信号処理技術の融合によるマルチテラビット光伝送

2022年9月にはこのIPCの枠組みによる研究の成果として、世界で初めて1波長あたり2.02Tbpsの光信号の240km伝送に成功したことを発表した。

「先デ研が開発した超広帯域デバ

イスと、未来研の高精度なデジタル信号処理技術の融合により、176GBaudの光信号に対して最大で2.11Tbpsの光信号生成し(図1左)、2.02Tbpsの光信号を240kmにわたって伝送することに成功しました(図1右)。本実験では80kmごとに増幅中継し、伝送距離に応じて最適な情報量を割り当てる技術により、マルチテラビット光伝送を達成しました(図2)。(中村氏)

以下、本研究成果の技術的な特徴や今後の研究などについて説明していく。

NTT独自の超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュール

本研究成果で重要な役割を果たしたのが、先デ研が開発した超広帯域ベースバンド増幅器ICモジュールであった。先デ研は2019年に当時世界で最も広い241GHzの帯域を有する増幅器ICを開発したことを発表している。この増幅器ICを110GHzまでの周波数に対応する1mm同軸コネクタ付きのパッケージに実装す

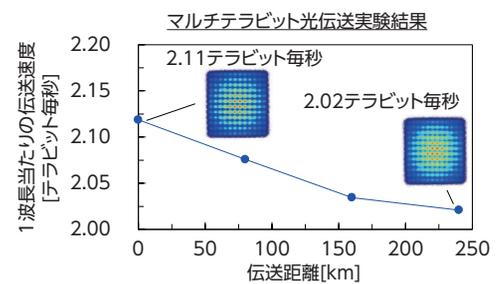


図2 1波長あたり毎秒2テラビット超の光増幅中継伝送実験結果

ることで、図3に示すように110GHzまでの周波数に対応する超広帯域性能と、十分な利得特性、出力パワーを有するモジュールを実現した。

本研究における実験ではこのベースバンド増幅器ICモジュールを光送信回路内部の光変調器駆動用ドライバアンプとして活用している。

「広帯域特性を持つICチップは開発済みでしたが、そのままではその特性を活かすことができません。コネクタ等を接続する際に生じやすい劣化や損失をなるべく抑えることが可能な回路を設計してパッケージ化することで、ICチップの特性を活かせるモジュールを実現しました。非常に高い精度を求められるデバイスであるため、劣化や損失を抑えるといっても容易ではなく、回路設計には苦労しました」(長谷氏)。

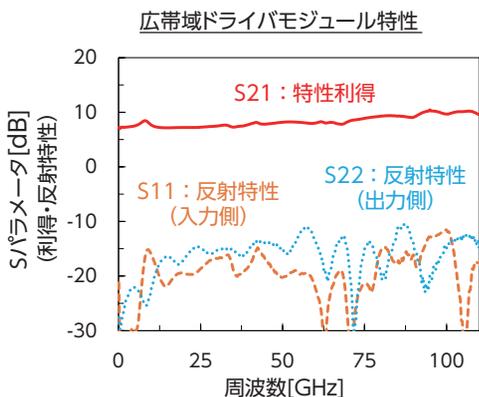


図3 広帯域ドライバモジュール特性

ベースバンド増幅器 IC モジュールを超小型化

本実験で使用したベースバンド増幅器 IC モジュールはプロトタイプであった。先デ研はその後小型化とユーザビリティの向上に取り組み、大幅な改良に成功している。

「実験機器等に接続するには、信号に含まれる直流 (DC) 成分を除去する DC ブロックという機能が必要です。この機能まで内蔵した上で体積比 1/10 という小型化に成功しました (図 4)。指の上に載るようなサイズです。今後中長期的には IOWN APN における光トランシーバーへの適用に向け研究開発を継続し、光変調器などとの融合集積に取り組む予定です。一方でハイエンドの実験や広帯域な増幅技術を必要とする計測には、現状のベースバンド増幅器 IC モジュールで実現している機能と性能が役立ちます。これらの用途におけるニーズが強いため、この成果だけを切り出して来年度中には実用化することを目指しています」(長谷氏)。

デジタル信号処理による歪補償技術で光信号品質を改善

高品質な超高速光信号を生成するには、高速電気信号を歪なく増幅し、光変調器に入力する必要がある。超広帯域ベースバンド増幅器 IC モジュールを光変調器駆動用ドライバアンプとして使用する際、高出力パワー領域では、入力パワーを上げても出力パワーが飽和する非線形性が課題となる (図 5 左)。これに起因し、信号品質の劣化が生じる (図 5 右)。

この問題に対処するため、未来研

は光変調器ドライバで生じる信号歪みを非常に高い精度で補償するデジタル信号処理技術を開発した。

「グラフ (図 5 右) に示すように、この補償技術を適用すると高出力パワー領域において光信号品質を改善させることが可能になりました。また、ドライバアンプの飽和による信号歪のみならず、高品質な高速信号生成には光送受信機内では様々な信号歪みを高精度に補償する必要があります。従来技術では歪み補償の精度向上に伴い演算規模が指数関数的に増加することが課題でした。今回、演算規模を大幅に低減しつつ高い補償精度を実現可能な等化技術を新たに開発し、超高速光信号の品質改善を実現しました」(中村氏)。

光信号における変復調方式の最適設計

1 波長あたりの伝送容量を最大化するためには、光の波としての性質 (偏波・振幅・位相) に対し、送信側でどのように情報を載せて、受信側でどのようにその情報を取り出すか (変復調方式) の最適設計が不可

欠である。変復調方式の最適設計では、変調速度とシンボルあたりの情報量、誤り訂正の符号化率が重要なパラメータとなる。これらのパラメータを情報理論に基づき最適化し、1 波長あたりの伝送容量を最大化している。今回の実験では、変調速度が 176GBaud、光の振幅と位相に 144 点の信号点を割り当てる QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 方式が最適となった。この 144QAM の信号点に対して、各信号点の出現確率を変化させる PCS (Probabilistic Constellation Shaping) を適用し、シンボルあたり

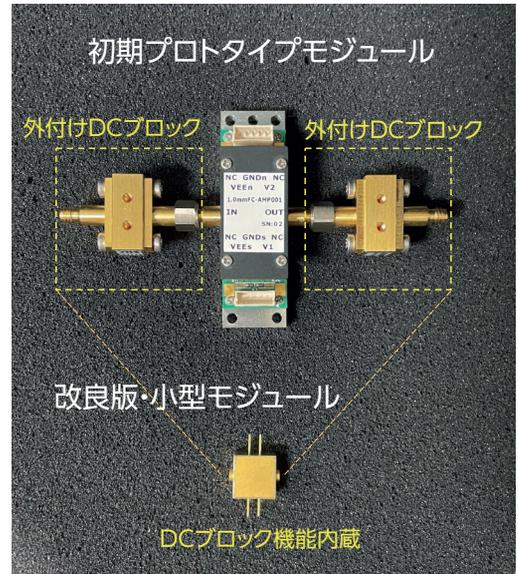


図 4 ベースバンド増幅器 IC モジュールを小型化

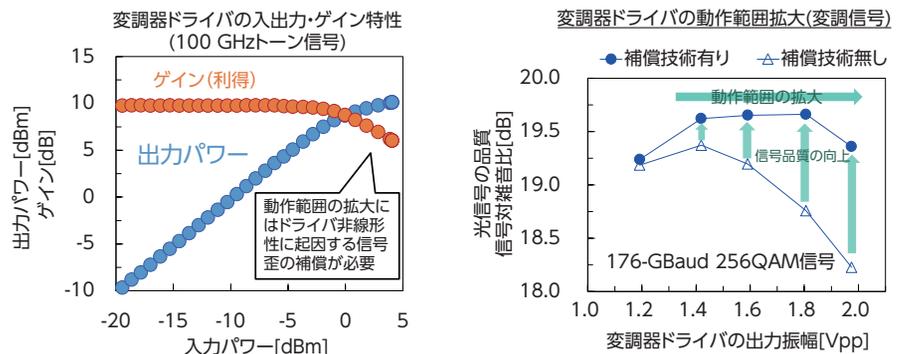


図 5 超高精度な光送受信回路歪補償による超広帯域ベースバンド増幅器の動作範囲拡大

の情報量を変化させている。さらに、光伝送路で加わった雑音によって生じた情報の誤りを受信側で訂正するための冗長信号の比率（符号化率）を最適化することで、誤り無しに送信可能な情報量を最大化している。

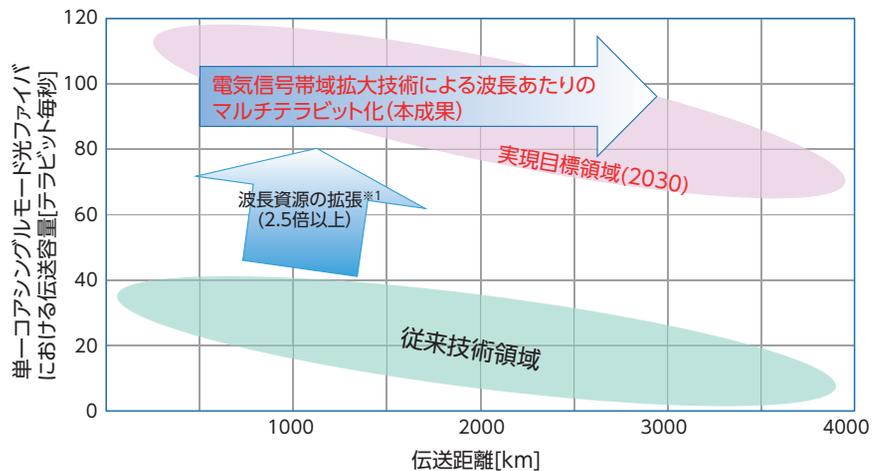
「本実験では、変調速度、シンボルあたりの情報量、誤り訂正の符号化率を最適化した結果、誤り無しに送信可能なビット数として6ビットであり、これを変調速度176 GBaudで2つの偏波に多重することで、1波長あたり2.11Tbpsの信号を生成・復調に成功しました」（中村氏）。

次世代の光伝送方式の創出とそれを 実現する最先端デバイスの開発

未来研では、光伝送システムの黎明期から現在まで、最先端の光伝送方式の研究開発を先導してきており、近年ではブレークスルー技術であるデジタルコヒーレント光伝送方式の高度化を進めている。未来研 IPC では、先デ研と連携し、次世代の光伝送方式の創出を推進している。

前述のように、未来研が主導するデジタルコヒーレント光伝送の更なる高速化に向けて、本実験で使用したベースバンド増幅器 IC モジュールは、将来の光送受信機の超高速化を見据えて先デ研が開発したまだ世の中にはないものである。

「最先端デバイスのプロトタイプを用いた次世代の光伝送方式の実証において、その性能を最大化する難しさがありました。また、世界中の研究機関においてもデジタルコヒーレント光伝送方式の高速化は非常に注力されている研究分野です。その中で我々は、これまでの研究で培ったノウハウを活かし、試行錯誤を繰



*1: 報道発表(2021年1月) 世界初、光パラメトリック増幅器による広帯域光増幅中継伝送に成功～従来光増幅器の2倍超の大容量化が可能に～
<https://group.ntt.jp/newsrelease/2021/01/28/210128b.html>

図6 本成果の位置づけと今後の展開

り返しながら1波長あたり2Tbpsを超える毎秒マルチテラビットの光信号を世界で初めて伝送することに成功しました」（中村氏）。

中長期の研究に加えニーズに 応じて個別の技術を早期に実用化

未来研は波長資源を拡張するこれまでの研究成果と本研究成果をベースに、従来技術の2倍に相当する高速大容量化の実現を目指している(図6)。その目標に向けた今後の研究活動について、濱岡氏は次のように述べている。

「次の研究テーマには、本成果を波長多重伝送に適用することと、伝送距離の長延化が含まれます。具体的には、NTTの基幹網への適用に十分な伝送距離を目指すことになると考えています。」

本稿で紹介した研究成果は複数の技術を組み合わせることにより達成された。世界最高性能を達成するためには、ボトルネックとなる箇所の中には許されず、全ての要素技術において高い性能が求められる。それゆえ、

各技術はそれぞれが単独で利用価値のあるものであるため、ニーズに応じて随時実用化にも取り組む方針だ。実際にベースバンド増幅器 IC モジュールは前述のように先デ研が来年度中の実用化を目指している。未来研のデジタル信号処理についても可能なものから実用化に取り組むとして、中村氏は次のように述べている。

「現状の実用レベルの2倍以上となる波長あたりの大容量化と長距離化を両立可能なデジタルコヒーレント技術のさらなるスケーラビリティの可能性を示すことができました。今後も世界一を目指す将来技術の研究にはIPCの枠組みを活用して先デ研と協力しながら取り組みます。また、IOWN構想の実現に向け実用化研究に取り組むNTTデバイスイノベーションセンタと連携し、実用化に資する研究にも取り組んでいます。今回適用したデジタル信号処理技術についても光伝送システムへ実装する検討を始めています。可能な技術から早期に実用化することも重視しています。」