



超高速光通信 超高速イーサネット 非線形光学 帯域ダブラ技術 OAM多重ミリ波伝送

増大する通信需要に対して通信ネットワークを大容量化していくには、それを支える無線通信システム・光ファイバ通信システムにおいて、個々の伝送路の特性を最大限に引き出すための最新のデジタル 変復調技術、デジタル信号処理を低減する光増幅中継処理技術、超高速フロントエンド集積技術、空間 多重化技術等の密な連携が必要になる.本特集ではNTT研究所が取り組んでいる各種技術を紹介する.



シャノン限界に迫る信号点シェーピング技術を 適用した超高速256 QAM光信号



シンボル速度100 Gbaudを超える 電気信号生成を実現する 超広帯域アナログマルチプレクサ回路

超高速通信技術



■ 将来の大容量通信インフラを支える超高速通信技術

将来の需要予測を考慮し、光ファイバ通信、無線通信それぞれにおいて、搬送波当り、 現在の100倍以上の1 Tbit/sを超える超高速通信の実現をめざした研究開発状況を紹介 する.

■ デジタル信号処理と回路技術を融合した超高速光通信技術

超情報化社会の基盤インフラとなる光ネットワークの実現に向け,デジタル信号処理 と高速回路技術を融合した超高速光伝送技術を紹介する.

■ 低雑音高出カパラメトリック増幅中継技術

伝送距離の制限緩和をめざすアプローチとして,低維音増幅ならびに非線形歪み補償 の可能性を持つ光パラメトリック増幅中継技術を紹介する.

超100 Gbaud光伝送を可能とする超高速光フロントエンドデバイス 技術

高シンボルレート光伝送の実現に向けた課題解決のためにNTT研究所で取り組んでいる超高速光フロントエンドデバイス技術の最新成果を紹介する.

■ テラビット級無線伝送をめざす大容量OAM多重伝送技術

28 GHz帯を用いたOAM多重伝送の実験において,世界初の120 Gbit/sのミリ波無線 伝送に成功したOAM多重伝送技術について紹介する. 16

22

27

32

特

将来の大容量通信インフラを支える超高速通信 技術

引き続き増大する通信需要に対して通信ネットワークを大容量化してい くには、それを支える無線通信システム・光ファイバ通信システムにおい て、個々の伝送路の特性を最大限に引き出すための最新のデジタル変復調 技術や伝送路の特徴を活かした種々の超高速フロントエンド集積技術、並 列化技術を駆使した構成・設計が必要になります.本稿では、将来の需要 予測を考慮し、光ファイバ通信、無線通信それぞれにおいて、搬送波当り、 現在の100倍以上の1Tbit/sを超える超高速通信の実現をめざした研究開発 状況を紹介します.

| みやもと | ゆたか†1 よしの | しゅういち†2 |
|------|-----------|---------|
| 宮本 | 裕 /吉野 | 修一 |
| おかだ | あきら†3 | |
| 岡田 | 顕 | |

NTT未来ねっと研究所^{†1} NTT未来ねっと研究所 所長^{†2} NTT先端集積デバイス研究所 所長^{†3}

大容量通信ネットワークの発展と 超高速通信技術の適用領域

近年では、PCやスマートフォン等 を通じた検索、動画視聴、電子決裁な ど日常生活になくてはならない通信 サービスが世界中に普及し、 それを支 える大容量通信ネットワークは私たち の生活において欠くことのできない基 盤になっています. モバイル通信では. 第5世代移動通信システム(5G)の 2019年度からの商用化開始に向けて、 最大20 Gbit/sに至る広帯域の通信. 自動運転や工場の自動化等をはじめと する低遅延の通信の実現に向けた精力 的な取り組みが進んでいます.また, 半導体・センサ技術の飛躍的な進歩に よるIoT (Internet of Things) 技術 の普及により、さまざまな端末からの 膨大なデータを蓄積し,機械学習や AI (人工知能) といった新技術により、 従来では不可能であったきめ細かい気 象予測や予防医療等の新しいアプリ ケーションも期待されています. これ からの通信ネットワークは、そのよう な新たなアプリケーションの創造を支 え、これまでよりさらに私たちの身近 な社会基盤として、空気のようになく

てはならないインフラとして,ますま す重要性が高くなると考えられます.

通信ネットワークの大容量化・高度 化を支える超高速通信技術の適用領域 を図1に示します.無線通信を用いた 超高速通信技術としては、コアネット ワーク用の固定マイクロ波通信に利用 するデジタル変復調技術が飛躍的な発 展を遂げ、光ファイバ通信が本格的な 実用化が始まる1980年代まで、長距 離コアネットワークを支えていまし た⁽¹⁾.これらの技術はさらなる発展を 遂げ、有線ケーブルの敷設が難しい区 間の経済的なリンクシステムとして現 在でも発展を続けています.また、無 線LANや携帯電話を中心とする無 線・移動体通信の大容量化を支える基 盤技術は、この四半世紀に飛躍的な発



展を遂げ,現在では、PCやスマート フォン(4G)等によるモバイルブロー ドバンドサービスとして1Gbit/sを 超えるスループットの無線アクセスが 世界中で普及しています.さらには、 次世代の5Gにおいては、ミリ波等の 新しい搬送波周波帯の特徴を活かした 無線アクセスの高速化に加えて、自動 運転や工場の自動化等の実現を想定 し、高い信頼性と低遅延性の両立も求 められています.

一方、光ファイバ通信を用いた超高 速通信技術は、1980年代から実用化 が始まり、この四半世紀で飛躍的な発 展を遂げました.現在では、1万km 以上の大陸間横断中継システム, 国内 の長距離コアネットワーク、メトロ ネットワーク、アクセスネットワーク に至るまで、広く普及しています。最 近では、データセンタ (DC) 間ネッ トワーク, DC内ネットワークや, 携 帯電話の基地局を結ぶバックホール等 の大容量化にもなくてはならない技術 となっています. これまで, 光ファイ バ通信システムでは、もっぱら1本の 光ファイバに光の通り道(コア)が1 つで、かつ導波モードが1つになるよ う設計されたシングルモードファイバ (SMF)が、基本の伝送媒体として用 いられてきました. 現在ではチャネル (波長) 当り100 Gbit/s容量の100チャ ネル相当の波長多重伝送により、ファ イバ1本当り10 Tbit/sを超える長距 離ネットワークが実用化されていま す⁽²⁾. また、DC間ネットワークにお いても、近年では200 Gbit/s級のチャ ネル容量を持つ低電力かつ小型な超高 速光通信の実用化が進んでいます⁽³⁾.

超高速通信技術のアプローチと 技術課題

次に,無線通信,光ファイバ通信に 共通した超高速通信技術のアプローチ と技術課題について紹介します.シス テムの通信容量Cは,よく知られた シャノンの定理によって以下の式に よって与えられます.

 $C = N \cdot B \cdot \log (1 + SNR)$

ここでNはチャネル多重数,Bは信 号帯域,SNRは信号対雑音比を表して います.通信システムの通信容量Cを 向上させるには,式に示すとおり,大 別して3つのアプローチがあります.

- アプローチ1は、チャネル当り の信号帯域Bを拡大しシンボル レートの高速化を図ることです。
- ② アプローチ2はSNRを向上させるためにシステム低雑音化と信号パワーの向上を図り、2値変調に比較して多値振幅位相(QAM)*信号等をはじめとする効率的デジタル変復調技術を採用することです。
- ③ アプローチ3は周波数あるいは 空間の自由度を用いた多重化(N を増加)を行うことでチャネル容 量を向上できます。

無線通信も光ファイバ通信も,適用 領域とその時々の実用化可能の要素技 術を用いて上述したいくつかのアプ ローチを組み合わせることでチャネル 速度の高速化を進めています.

主として見通し内ミリ波無線通信と 光ファイバ通信において上述した3つ のアプローチ軸を組み合わせた研究開 発状況と今後の技術トレンドを図2に 示します. ミリ波無線通信ならびに光 ファイバ通信で同じ偏波多重4値位相 変調 (QPSK) 符号により、1 Tbit/s を超える通信容量を実現するには、例 えばアプローチ1のシンボルレートの 高速化のみではシンボル速度を300 Gbaud以上にする必要があり、フロン トエンドデバイス実装や既存のDSP (Digital Signal Processing) 回路の アナログ・デジタル変換回路 (ADC), デジタル・アナログ変換回路 (DAC) のインタフェース速度の観点から現状 の技術レベルの延長では実現が難しい ことが分かります。そこで同じ帯域で より高効率な伝送を実現可能な多値 QAM変復調信号等を用いるアプロー チ2や、周波数軸や空間軸におけるサ ブキャリア多重により、シンボル速度 を実用的な範囲に抑えつつ、所望のデ ジタル変復調性能を実現するためのデ ジタル信号処理技術を実現することが 求められます.

最近の超高速デジタル変復調技術を 用いた通信システムの具体例として, 光ファイバ通信システムにおけるデジ タルコヒーレント光送受信回路構成例

* QAM:信号電界の振幅と位相を複数の信号レ ベルで変調することで多値符号を伝送する高効 率デジタル変調方式. を図3に示します^(2,3). 本システムで は,約100チャネルの100 Gbit/s信号 が波長多重伝送され,光増幅中継器に より一括増幅されながら1000 km級の 長距離伝送を実現します. 個々の波長 多重チャネルの光送受信機器では, 100 Gbit/sの情報ビット列を,光ファ イバでの長距離伝送に適した偏波多重 QPSK光信号を変復調することで長距

離伝送を実現しています.

ここで光送信器は、送信側DSP回 路部と光送信フロントエンド回路部か ら構成され、主信号半導体レーザ (LD)から発生した同じ波長の個々の 直交する偏波軸の光搬送波信号をシン ボル速度32 Gbaud級のQPSK符号で 変調することで1偏波当り50 Gbit/s (符号化率R=5/6の誤り訂正符号化



を適用しグロス容量で約64 Gbit/s), 両偏波で100 Gbit/sの超高速光信号 チャネルを生成しています.現在では, 変調方式を16QAMに変更することで, 同じシンボル速度でチャネル容量を2 倍の200 Gbit/s容量まで拡大できる技 術が実用化されています.

光受信器では同様に受信側DSP回 路部と光受信フロントエンド回路部か ら構成され、ほぼ数GHz内の周波数オ フセット量を持つ局発可変波長LDを 用いてイントラダイン受信を行い、光 ファイバ伝送中に生じた線形な波形歪 の除去, 偏波多重信号の分離, QPSK (16QAM) 信号の復調, 誤り訂正復号 化を経て元の情報ビット列を受信しま す. この時、DSP内のデジタル信号 処理回路部とDAC/ADC部のインタ フェースでは、8 bit量子化、サンプ リング速度2サンプル/シンボル,誤 り訂正符号の符号化率R=5/6を考慮 するとチャネル容量100 Gbit/sの場合 は、DSP回路内のスループットが2 Tbit/s ($\sim 8 \times 2 \times (6/5) \times 100$ Gbit/s)となり、膨大な並列デジタル データ信号のリアルタイムデジタル信 号処理が実現されています.

このことから,経済化・小型化に適 した実用的なDSP回路を実現するため には,DAC/ADC部とデジタル信号処 理回路部を大規模集積回路1チップに 集積化することが望ましいことが分か ります.さらに,DSP回路部とフロン トエンド回路部間では,4並列の広帯 域なアナログ電気信号〔各偏波軸 (X, Y) につき直交信号成分と同相信 号成分〕のお互いのスキューを抑えつ つ線形な電気信号のインターコネク ションを実現することが,高品質な超 高速デジタル変復調に必須となり ます.

超高速通信基盤技術の要素技術

本特集では、1 Tbit/s容量を実現す

る超高速通信基盤技術の4つの要素技術(図4)に着目し、それぞれの視点から現状の研究開発の状況を概観し、 今後の展望を紹介します.

■デジタル変復調回路の超高速 技術

デジタル変復調回路の超高速技術に ついては,光ファイバ通信システムと 無線通信システムに共通の普遍的な技 術課題です.本特集記事『デジタル信 号処理と回路技術を融合した超高速光 通信技術』では、高速化の要求が特に 厳しい光ファイバ通信システムを例 に、1波長当り1Tbit/s容量を超える 超高速デジタル変復調回路の必要な機 能とその実現性について最新の成果を 解説します.一般に、多値QAMデジ タル変復調は多値度の増加とともに高



いSNRを必要とし、送受信回路全体 での精緻な構成技術が必要となってき ます.ここでは、多値QAMデジタル 変調の特徴を活かした新しい符号化変 調技術の有効性について解説します.

■低雑音高出カパラメトリック増 幅中継技術

低雑音高出力パラメトリック増幅中 継技術は、光ファイバ通信システムな らでは光の波の性質を活用した新しい 光増幅中継技術であり、多値QAM信 号伝送に必要な光増幅中継システムの 低雑音化や、高速化に伴って増大する 伝送中の波形歪を光信号処理により補 償することで必要なデジタル信号処理 量を大幅に低減できる技術として期待 されています.

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) ØFET (Field

Effect Transistor) のゲート長数nm サイズの微細化領域(シリコン原子数 10個程度)では、これまでのようなト ランジスタ性能の高速化や低電力化の 技術トレンドが飽和するといった技術 予測もあり、チャネル速度の高速化と ともにDSPの信号処理量を抑えるた めの新たなシステムアーキテクチャや 要素技術が必要とされています。光増 幅中継ノードで光信号のまま多チャネ ルのコヒーレントな光信号処理を行う パラメトリック増幅中継は、光増幅時 の低雑音化を実現するとともに波形歪 補償を行い、光送受信回路内で必要な デジタル変復調時の信号処理量を大幅 に低減し、システム全体の消費電力を 下げることが可能となる基盤技術とし て期待されています。本特集記事『低 雑音高出力パラメトリック増幅中継技



術』ではNTT研究所で開発を進めて きた分極反転ニオブ酸リチウム結晶 (PPLN)を用いた低雑音高効率パラ メトリック光増幅中継技術,および最 近の成果を紹介します.

■超高速光フロントエンド集積 技術

本特集記事『超100 Gbaud光伝送を 可能とする超高速光フロントエンドデ バイス技術』では, 主に光送受信装置 の高性能化・小型集積化の実現に向 け、搬送波とベースバンド信号帯域の 光・電気変換を効率的に行うためのフ ロントエンド回路とデジタル信号処理 回路との間の超高速デバイス・イン ターコネクション実装技術を紹介しま す. フロントエンド回路とデジタル信 号処理回路間の安定な超高速インター コネクションの実現をするために、フ ロントエンド回路内にアナログ多重化 機能を具備した集積化フロントエンド 回路・実装技術の有効性を解説しま す. シンボル速度が100 Gbaudを超え る超高速領域においても、同軸ケーブ ルコネクタ等の帯域限界を超えて、波 形整形ならびにスペクトル整形された 多値超広帯域アナログ電気信号と光信 号間を歪なく安定に変換するための光 ファイバ通信用光フロントエンド集積 技術についての最新の成果を紹介し ます.

■軌道角運動量モード多重による 超高速化技術

本特集記事『テラビット級無線伝送 をめざす大容量OAM多重伝送技術』

では、無線通信における新たなモード 多重MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) 技術により、ミリ波搬送波帯 において1Tbit/s級の見通し内無線通 信を実現するための空間多重要素技術 について紹介します. 光ファイバ伝送 においては、既存のSMFの物理限界 を超えた大容量化に向けて、アプロー チ3の空間多重光通信技術の検討.お よび近年, 直交する複数の導波モード を用いたモード多重光通信技術の検討 が進んでいます. 最近では, MIMO-DSP技術の適用により6000 kmを超え る長距離伝送の可能性も示されつつあ り. アプローチ3のさらなるスケーラ ビリティが注目されています⁽⁴⁾.

一方. 伝送路が自由空間である無線 通信では、一般には光ファイバのよう な直交導波モードが定義できません が、最近、新たな電磁波の空間的な直 交性として軌道角運動量 (OAM: Orbital Angular Momentum) を用い た空間多重無線通信が提案され、 5G・ポスト5G等のミリ波を用いた バックホール無線回線の高速化技術の 候補として注目されています(5). 従来 の経路差を用いたMIMO空間多重技術 に加え、さらに電磁波の持つ軌道角運 動量の直交性を利用して空間多重度の さらなる向上を実現する最新技術につ いて紹介します. これらのモード多重 空間多重通信の実現には、各モードを 分離するための大規模信号処理を有限 な集積回路規模で実現するデジタル信 号処理技術とともに、各伝送路(自由 空間,光ファイバ等)の高速チャネル 変動に安定に追随する信頼性を両立す るDSPアーキテクチャ技術が重要と なり,今後の進展が期待されます.

今後の展開

本稿では、将来の通信ネットワーク の大容量化を支える超高速通信技術の 現状の課題と今後の動向について紹介 しました. 時々の実用化時点で利用可 能な大規模集積回路1チップ内に経済 的に収容可能なデジタル信号処理量の 制限の下で、高効率なデジタル信号処 理の高度化は今後もさらなる発展が期 待されます. ミリ波無線通信では、自 由空間における電磁波の持つ軌道角運 動量の自由度を導入した空間多重技術 により、1 Tbit/s級のバックホール等 に適用可能な超高速無線リンクの実現 が期待されます.また、光ファイバ通 信では、集積光フロントエンド技術や 光パラメトリック増幅技術、さらには 光ファイバ通信に適した空間多重技術 を適切に組み合わせ、デジタル信号処 理量の制限やSMFの物理限界を緩和 することにより、1 Tbit/s超える超高 速チャネルの長距離伝送の実現が期待 されます. これらの最新技術のタイム リーな研究開発・実用化により, Tbit/s超級の超高速信号を誰でも容易 にハンドリングできるような時代の実 現をめざします.

■参考文献

 小檜山・小牧: "64/256QAMディジタルマイ クロ波伝送方式," 信学誌, Vol.68, No.8, pp.889-895, 1985.

- (2) 鈴木・宮本・富澤・坂野・村田・美野・柴山・渋谷・福知・尾中・星田・小牧・水落・久保・宮田・神尾: "光通信ネットワークの 大容量化に向けたディジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発,"信学誌, Vol.95, No.12, pp.1100-1116, 2012.
- (3) 木坂・富澤・宮本: "Beyond 100 G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, Vol.28, No.7, pp.10-14, 2016.
- (4) K. Shibahara, T. Mizuno, L. Doowhan, Y. Miyamoto, H. Ono, K. Nakajima, S. Saitoh, K. Takenaga, and K. Saitoh: "DMD-Unmanaged Long-Haul SDM Transmission Over 2500-km 12-core × 3-mode MC-FMF and 6300-km 3-mode FMF Employing Intermodal Interference Cancelling Technique," OFC 2018, Th4C.6, San Diego, U.S.A., March 2018.
- (5) D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, Y. Yagi, T. Kaho, H. Shiba, and T. Shimizu : "An Experimental Demonstration of 28 GHz Band Wireless OAM-MIMO (Orbital Angular Momentum Multi-input and Multi-output) Multiplexing," IEEE VTC 2018-Spring, Porto, Portugal, June 2018.



(左から) 宮本 裕/ 吉野 修一/ 岡田 顕

ネットワークを駆使した将来の新サービ スや産業創生を支える社会基盤を実現する べく,NTT研究所では超高速通信技術のタ イムリーな研究開発・実用化を通して、今 後の大容量通信ネットワークのさらなる発 展を支えていきたいと考えています.

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所 イノベイティブフォトニックネットワークセンタ TEL 046-859-3011 FAX 046-859-5541 E-mail pt-hosa-mirai@lab.ntt.co.jp

デジタル信号処理と回路技術を融合した 超高速光通信技術

本稿では、高度な情報化社会を支える光トランスポートネットワークに おいて基盤技術である超高速光通信技術を紹介します.データトラフィッ クの多くを占めるイーサネットは、400 Gイーサ(400GE)が標準化され、 1 Tbit/sを超えるような信号速度の標準化議論も開始されています.本技 術は、イーサネットに代表される高速クライアント信号を光ネットワーク 上で経済的に伝送するための技術です.高度なデジタル信号処理と超高速 回路技術を融合することにより、光信号の速度とその品質を大きく向上さ せることができ、1 チャネル当り1 Tbit/sを超えるような経済的な超高速 光通信の実現が期待されています.

| こばやし | たかゆき | はまおか | ふくたろう |
|-----------------|-----------------|-----------------|-------|
| 小林 | 孝行 | /濱岡 | 福太郎 |
| ^{なかむら} | ^{まさのり} | ゃまざき | ひろし |
| | 政則 | ∕山崎 | 裕史 |
| ^{ながたに} | tradic | ^{みやもと} | |
| 長谷 | 宗彦 | /宮本 | |

NTT未来ねっと研究所

超高速光通信技術

超高速光通信技術は、光ネットワー クの伝送性能を左右する基盤技術で す. 基幹ネットワークにおいては, 2017年に標準化が完了した400Gイー サ(400GE) などの超高速クライア ント信号を、デジタルコヒーレント伝 送技術⁽¹⁾に基づいた高速光チャネルに 多重収容し、さらに複数の高速光チャ ネルを波長軸に多重すること(WDM: Wavelength Division Multiplexing) で長距離・大容量光ネットワークを実 現しています.一方、SNSや動画配 信などさまざまなサービスの基盤と なっているデータセンタにおいて、内 部におけるサーバ間のデータ伝送や. 複数のデータセンタ拠点間の通信需要 が非常に高まっています. 基幹網に比 べ、伝送距離は短距離となりますが経 済性が求められており、シンプルな送 受信機構成で実現可能な強度変調・直 接検波 (IM-DD: Intesnsity Modulation Direct Detection) 方式によって、 高速データ通信が実現されています.

光信号高速化の技術課題

1チャネル当り100 Gbit/sおよび

400 Gbit/s級のクライアント信号を収 容可能な光通信技術が実用化されてい ます⁽²⁾. イーサネットの標準化におい ては、次の伝送速度規格の議論が開始 されており、その伝送速度の候補とし て800 Gbit/sや1.6 Tbit/sなどが挙 がっています.将来的に、光ネットワー クにおいては、1チャネル当り1 Tbit/sを超える高速なクライアント信 号を収容することが期待されていま す. 光信号の高速化を実現する3つの 軸を図1に示します. 従来のIM-DD 方式では光の強度 (on/offの2値信号) を利用していましたが、図2に示すよ うなデジタルコヒーレント技術によっ て、光の振幅・位相を利用して1パル ス当り4値以上の信号を伝送可能にな りました.加えて、送受信器内でデジ タル信号処理を行うことにより、偏波 の分離や光ファイバ内で生じる波長分 散や偏波モード分散による波形歪みを 等化・補償することが可能になり、伝 送可能な情報量と伝送距離が飛躍的に 向上しています.現在、実用化されて いる1チャネル当り100 Gbit/s級の光 信号は、32 Gbaudの4値のQPSK





図2 デジタルコヒーレント送受信機の概要

(Quadrature Phase Shift Keying)信号を偏波多重することによって実現されています.また,400 Gbit/s級の光信号は、32 Gbaudの16QAM (Quadrature Amplitude Modulation)^{*1}偏波多重信号を2キャリア(波長)束ねて1つの伝送チャネルとすることで実現されています.さらに、光信号を高速化するためには次の3つの方向性が考えられます.

■ボーレートの高速化

ボーレート(光パルスの速度)を高 速化していけば、それに比例して1波 長当りの伝送速度は向上します.同じ 多値度の信号であれば、ボーレートを 高速化しても過剰な受信感度劣化はあ りませんが、高速なボーレート信号を 送受信するためには、それに対応した 高速なDAC (Digital-to-Analog Converter), ADC (Analog-to-Digital Converter)や変調器ドライバのよう な電気デバイス、光変調器、BPD (Balanced Photo Detector)等の光デ バイスが必要になります.また、周波 数領域では、ボーレートに比例して光 信号が占める帯域が広がり、波長多重 可能な信号の数が制限されてしまうの で、後述する高次多値化と併用しない と伝送システム全体の容量は増加しま せん.

■高次多値化

信号伝送に用いる光振幅のレベルと

位相の数を増やすことによって、1つ の光パルスで伝送可能なビット数を向 上させることができます.ボーレート が同じ場合,多値数に応じて伝送速度 が対数的に向上しますが^{*2},多値数 が向上するにつれて,DAC/ADCの 分解能や線形性などデバイスへの要求 条件が高くなり,所要の信号対雑音比 (SNR: Signal-to-Noise Ratio) も上 昇するため伝送可能な距離が短くなっ たり,信号歪みに対する耐力も低下し

*1 QAM:信号電界の振幅と位相を複数の信号 レベルで変調することで多値符号を伝送す る高効率デジタル変調方式.

*2 対数的な向上:例えば、4 (=2²)値から16 (=2⁴)値に多値度を増やすと伝送速度は2 倍になりますが、16値から64 (=2⁶)値に増 やしても1.5倍にしかなりません。 ます.現在は、正方形の信号点配置を 持つQAMが用いられていますが、信 号点配置を工夫することによって、所 要のSNRを改善することが可能です.

■マルチキャリア化

1つのチャネルを複数の波長(キャ リア)の光信号で構成することで、1 チャネル当りの容量をキャリア数に比 例して向上させることができます. 光 ネットワークにおいて論理的な高速 チャネルを構成するのに有効な手法で あり、例えば、実用化されている1波 長当り200 Gbit/sの光信号を5波長束 ねて1チャネルとすることで1Tbit/s のチャネル速度を実現することができ ます. しかしながら、必要な送受信機 の数が増えてしまうため、上述のボー レートの向上や多値化によって、1波 長当りの伝送速度を向上させながら. 伝送性能や経済性を考慮してマル チキャリア技術を適用する必要があり ます.

以上から、1チャネル当り1Tbit/s を超えるような超高速光伝送の実現に は、ボーレートと多値度の向上が重要 であり,高速なデバイスの開発を進め ながら,デバイスの要求条件を緩和す るようなデジタル信号処理技術や高 感度な信号フォーマットが必要になり ます.

デバイス性能を最大に引き出すデ ジタル較正技術と高感度化技術

高速信号を送受信するときに、 電気 デバイスや光デバイスの帯域が. 各々 要求条件を満たしていても信号が劣化 する場合があります。例えば、図2に 示すようにデジタルコヒーレント方式 の送信機では、DACは4つ、IQ変調 器は各偏波成分用に2つ必要です。 受 信側では、BPD、ADCそれぞれ4つ が含まれています. これらのデバイス やデバイス間の結線部分の特性は製造 誤差等が存在しており、すべてが接続 された状態の周波数特性が均一になる とは限りません. 高ボーレート信号や 高次多値信号では、そのような誤差が 信号品質に大きな影響を与えます. NTT研究所では、受信側におけるデ バイス不完全性のデジタル補正処理に

加え,送信側でデジタル信号処理によ り送信機内のデバイスの周波数特性や ばらつきを超精密に予等化し較正する ことによって,大幅な信号改善の改善 に成功しています.64 Gbaud 64QAM 信号の較正前・較正後の光スペクトル を図3(a)に示します.予等化処理に よって,光スペクトルが平坦化し,較 正前には,分離が難しかった信号点が, 図示されているように64点が識別可 能な品質まで改善しています⁽³⁾.

また、多値化による感度劣化に対し て、信号の高感度化を信号点配置の観 点から検討を進めています.従来では、 QPSK、16QAM、64QAMのような多 値QAM信号は、すべての信号点が確 率的に等しく現れるような信号点配置 になっています.多値QAM信号は、 送りたいビット列から単純な信号マッ ピング・デマッピング処理で実現可能 ですが、情報理論的な観点からは最適 な信号点配置ではありません.最近で は、情報理論に基づいて、最適に近い 信号点配置を実現可能な、多値QAM の信号点が確率分布を持つように配置



する信号点シェーピング技術が注目さ れています. 専用のマッピング・デ マッピング処理が必要となりますが. 多値QAMより小さい所要SNRで同じ 情報ビットを送ることが可能です.ま た、ベースとなる多値QAM信号を変 えることなく、信号点の確率分布を変 化させることで、 伝送する情報ビット の数を変化させることが可能なため. 変復調のための信号処理アルゴリズ ムの変更も不要です。NTT研究所で は、前述の予等化による較正技術と 256QAMベースの信号点シェーピング を適用することで、1波長当り800 Gbit/sの実証実験に成功しています⁽⁴⁾ (図3(b)). 本技術を用いれば、次世 代のイーサネット規格候補である800 Gbit/sや1.6 Tbit/sのクライアント 信号を1波長ないしは2波長で光ネッ トワークに収容することが可能になり ます.

高速信号生成のための帯域ダブラ 技術

高速な光信号を生成するうえで,重 要なデバイスの1つがDACです. DACはデジタル信号処理LSI(Large Scale Integration circuit)と一体集 積されますが,Si CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor) を用いたDACのアナログ帯域は,現 状40 GHz程度になっています.前述 の較正技術によってある程度の補正が 可能ですが,100 Gbaudを超えるよう

な高ボーレート化に対しては、ボトル ネックとなります.NTT研究所では、 DACのアナログ帯域を2倍に拡張可 能な帯域ダブラ技術を提案していま す.本技術は、所望の広帯域信号に対 して前置信号処理を施し2つのDAC から出力させて、アナログマルチプレ ク サ 回 路 (AMUX: Analog Multiplexer)⁽⁵⁾によって信号を合成するこ とで、DACのアナログ帯域の2倍の 帯域を持つ高速信号を生成するが可能 です. 私たちは、2種類の帯域ダブラ 方式(図4)を提案しており、両方式 ともにデジタルコヒーレント伝送技術 へ適用し. 32 GHzのアナログ帯域を 持つDACを用いて超高速ボーレート 信号の実証実験を実施しました.



図4(a)のスペクトル折り返しを用い た方式で生成した120 Gbaud信号の伝 送実験結果を図5(a)に示します。1波 長当りネットレート^{*3}600 Gbit/s信 号の4000 km級の長距離伝送に成功し ています⁽⁶⁾. また,図4(b)の加減算処 理による方式では、AMUX回路を2 つ集積した回路を試作し、図5(b)に 示すように120 Gbaud QPSK信号の 生成に成功しています(7). 理論的には, ボーレートの半分の帯域が必要なた め. 100 Gbaud以上の信号を40 GHz 帯域のDACを用いて高品質に生成す るのは困難です.本技術によって、既 存のDACの帯域を拡張することがで き,信号の高ボーレート化が可能です. また、前述の較正技術・高感度化技術 を組み合わせることで、マルチキャリ ア技術を用いずに1波長で1Tbit/s を超えるような超高速信号伝送の実現 もみえてきています.

超高速光通信技術の短距離通信へ の適用

データセンタにおけるサーバ間の通 信やデータセンタ間のような特に多く のトラフィックが発生する最大数10 km程度の短距離通信向けの光通信技 術として、IM-DD方式が、システム 構成がシンプルで経済性が高いことか ら注目されています。現在標準化が完 了している400Gイーサネットでは. 4値パルス振幅変調 (PAM4: 4level Pulse Amplitude Modulation) による1波長当り100 Gbit/sの信号を 4 並列伝送する方式が採用されてお り、4組の送受信機が必要となります. NTT研究所では、帯域ダブラ技術を 超広帯域InP変調器[®]と併せて短距離 通信に適用し、1組の送受信機を用い て、400 Gbit/sのビットレートで 20 kmの伝送に成功しました⁽⁹⁾.これは 単一の波長および偏波を用いた IM-DD方式としては、世界最高速度 となります. その伝送実験結果を図6 に示します.本実験では、帯域ダブラ 方式により広帯域な電気信号を生成す るとともに、非常に広帯域な周波数特 性を持つInP光変調器を合わせて用い ることで、電気信号の広帯域性を保っ たまま光信号を生成することが可能に なりました.また,変調方式としては, DMT (Discrete Multi-Tone) 方式を 採用し、256本のサブキャリア信号を デジタル信号処理によって生成し、電 気および光デバイスの周波数特性に応 じてサブキャリアごとに最適な信号 ビットを割り当てることで、ほぼ最適 なビット割当を実現しています. 例え ば、図6(b)に示すように、SNRが高 い6.96 GHzのサブキャリアには 64QAM信号を、SNRが低めの79.10 GHzのサブキャリアには、16QAMを 採用しています.帯域ダブラ技術と広 帯域な変調器の適用によって、高い周 波数領域でも16QAMのような多値数 の信号を割り当てることが可能になり ました.本技術により、1波長当り 400 Gbit/sを超える伝送速度を経済性 の高い単純な送受信器構成のIM-DD 方式によって実現することが期待され



*3 ネットレート:光信号として1秒間に伝送 されるデータビットを表したもの.



ます.

今後の展開

本稿では,超情報化社会の基盤イン フラとなる光ネットワークの実現に向 け,デジタル信号処理と高速回路技術 を融合した超高速光伝送技術を紹介し ました.本技術により,1波長当り 1 Tbit/s超の超高速光伝送の実現がみ えてきています.今後も,さらなる高 速化を推進するとともに,本技術が高 信頼な基盤技術として役立つよう引き 続き研究開発を進めていきます.

■参考文献

- 宮本・佐野・吉田・坂野: "超大容量デジタ ルコヒーレント光伝送技術,"NTT技術 ジャーナル, Vol.23, No.3, pp.13-18, 2011.
- (2) 木坂・富澤・宮本: "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, Vol.28, No.7, pp.10-14, 2016.
- (3) A. Matsushita, M. Nakamura, F. Hamaoka, S. Okamoto, and Y. Kisaka : "High-spectralefficiency 600-Gbps/carrier Transmission Using PDM-256QAM Format," Journal of Lightwave Technology (Early Access), 2018.
- (4) M. Nakamura, A. Matsushita, S. Okamoto, F. Hamaoka, and Y. Kisaka: "Spectrally Efficient 800 Gbps/Carrier WDM Transmission with 100-GHz Spacing Using

Probabilistically Shaped PDM-256QAM," Proc. of ECOC 2018, Rome, Italy, Sept. 2018.

- (5) 長谷・山崎・濱岡・野坂・宮本:"光送信器 の広帯域化に向けた帯域ダブラ技術,"NTT 技術ジャーナル, Vol.29, No.3, pp.62-66, 2017.
- (6) M. Nakamura, F. Hamaoka, A. Matsushita, H. Yamazaki, M. Nagatani, A. Hirano, and Y. Miyamoto: "Low-Complexity Iterative Soft-Demapper for Multidimensional Modulation Based on Bitwise Log Likelihood Ratio and its Demonstration in High Baud-Rate Transmission," Journal of Lightwave Technology, Vol.36, No.2, pp.476-484, 2018.
- (7) F. Hamaoka, M. Nakamura, M. Nagatani, H. Wakita, H. Yamazaki, T. Kobayashi, H. Nosaka, and Y. Miyamoto: "Electrical spectrum synthesis technique using digital pre-processing and ultra-broadband electrical bandwidth doubler for high-speed optical transmitter," Electronics Letters, Vol.54, No.24, pp.1390-1391, 2018.
- (8) 長谷・脇田・小木曽・山崎・井田・野坂: "超 100 Gbaud 光伝送を可能とする超高速光フロ ントエンドデバイス技術," NTT技術ジャー ナル, Vol.31, No.3, pp.27-31, 2019.
- (9) H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, Y. Ogiso, M. Nakamura, M. Ida, T. Hashimoto, H. Nosaka, and Y. Miyamoto : Transmission of 400-Gbps Discrete Multi-Tone Signal Using >100-GHz-Bandwidth Analog Multiplexer and InP Mach-Zehnder Modulator," Proc. of ECOC 2018, Rome, Italy, Sept. 2018.



(上段左から)小林 孝行/ 濱岡 福太郎/ 中村 政則 (下段左から)山崎 裕史/ 長谷 宗彦/ 宮本 裕

NTT研究所では,信号処理技術およびデ バイス技術の両面から研究開発を進め,今 後の光ネットワークの高速化・大容量化の 要求にこたえていきたいと考えています.

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所 フォトニックトランスポートネットワーク研究部 TEL 046-859-4373 FAX 046-859-5541 E-mail takayuki.kobayashi.wt@hco.ntt.co.jp 特

低雑音高出力パラメトリック増幅中継技術

近年,飛躍的な進歩を遂げたデジタルコヒーレント技術の持つ潜在能力 を一層向上させ,電気的なデジタル信号処理(DSP)技術のみならず,光 のコヒーレンシを駆使した革新技術でブレークスルーを生み出すことが望 まれています.本稿では,ネットワークの信号対雑音比(SNR: Signal to Noise Ratio)の劣化を最小限に抑え,伝送距離の制限緩和をめざすアプロー チとして,低雑音増幅ならびに非線形歪み補償の可能性を持つ光パラメト リック増幅中継技術を紹介します.

| 梅木 | 毅伺 | ,2 かざま /風間 | 拓志 |
|-------------------|-------------------------|----------------------|--------------------|
| こばやし 小林 | ^{たかゆき†} 孝行 | ^{2 えんぶつ} | こうじ†1 晃次 |
| ^{かさはら} | _{りょういち†} 亮一 | 1 みやもと /宮本 | ^{ゆたか† 2} |

NTT先端集積デバイス研究所^{†1} NTT未来ねっと研究所^{†2}

さらなる周波数利用効率向上に向けた 信号対雑音比の抜本的改善の必要性

近年,デジタルコヒーレント光通信 技術は飛躍的な進歩を遂げ,周波数利 用効率は向上による光通信システムの 大容量化が進展しています.シャノン の通信理論によれば、高い周波数利用 効率を得るためには高い信号対雑音比 (SNR: Signal to Noise Ratio) が必 須の条件となりますが、光増幅器から の雑音の累積と伝送ファイバ自体の中 で生じる非線形光学効果に起因した信 号歪みにより(図1(a))、SNRの限界 が指摘され始めています⁽¹⁾. これらの 原理限界を打破し光通信システムの SNRを抜本的に改善できる新たな技 術の必要性が急速に高まっています.



PPLN導波路を用いた光パラメトリッ ク増幅による低雑音高出力中継技術

現状の光通信システムで広く用いら れているEDFA(Erbium Doped Fiber Amplifier)に代表される従来の 光増幅器では、標準量子限界^{*1}によ り増幅前後でSNRが必ず3dB以上劣 化し、多段に中継すると過剰な雑音が 累積してしまいます(図1(b)).信号 の光位相に依存した増幅特性を有する 位相感応増幅(PSA: Phase Sensitive Amplification)を用いることが できれば、理想的には雑音指数 (NF)^{*2}が0dB⁽²⁾、つまりSNRの劣 化のない光増幅が可能となります(図 1(b)).

また、現状のデジタルコヒーレント システムでは、送受信回路において光 ファイバ伝送後のさまざまな波形歪み を電気デジタル信号処理により補償し て長距離伝送を実現していますが、今 後さらなる大容量化を進めると、光 ファイバ特有の信号波形の歪み(非線 形歪み)が顕在化し、これが伝送距離 を制限する要因となります(図1(c)). 位相共役変換(OPC: Optical Phase Conjugation) は、時間反転波を生成 させて、光をあたかも時間が逆戻りし たかのように振る舞わせる光技術で、 光ファイバ伝送路の中間地点で位相共 役変換を行うことで, 伝送路の前半で 受けた歪みを伝送路の後半で修復でき ます. これによって、従来よりも強い 強度の光信号を光ファイバで伝送する ことができ、SNRを向上させること が可能になります. さらに、複数の信 号チャネル(波長)の波形歪みを一括 して処理できるため, 歪み補償の信号 処理量, 電力の大幅な削減が期待でき ます.

これらPSA/OPCは、非線形光学効 果における光パラメトリック増幅 (OPA: Optical Parametric Amplification)による励起光からのエネル ギー移行を用いることで実現できます (図1(d)).非線形光学媒質に信号光 と信号光のほぼ2倍の周波数を有す る励起光を入力し、信号光と励起光の 波長配置や位相関係を適切に取ること によって、 位相感応な光増幅や位相共 役変換を行うことができます. 私たち の研究グループでは、非線形光学媒質 として用いる周期分極反転ニオブ酸リ チウム (PPLN: Periodically Poled Lithium Niobate) *³の結晶自体の光 損傷耐性の向上と結晶の持つ耐性を損 なうことのない導波路構造作製技術の 開発⁽³⁾. 微細導波路加工技術の高精度 化⁽⁴⁾により、高い励起光パワーの入力 を可能とし、従来に比べて極めて高い 変換効率と高強度の光出力の両立に成 功しました. さらに, 波長の大きく異 なる励起光・信号光を簡便かつ安定的 に合分波するカプラとPPLN導波路 を集積したOPAモジュールを実現し ました (図1(d)). モジュールは, 信 号光, 励起光のそれぞれの波長に適し たファイバからの入出力を誘電体多層 膜ミラーで合分波できる構成としてい ます. これにより、 光ファイバとPPLN 導波路との低損失な光結合を実現する と同時に安定性を確保しました.

位相感応光増幅器の高利得化と 適用性拡大

OPA過程では、 周波数2ωの励起 光からω」とω2の信号光とアイドラ 光へのエネルギー移行が起きます. $\omega_1 = \omega_0$ の場合は縮退型と呼ばれ、励 起光の位相を基準として、光信号の2 つの直交する位相に対して一方には利 得を与え、他方には減衰を与える位相 感応な増幅特性を得ることができます (図2(a)). 本研究の開始当初はPPLN モジュールの増幅利得は6 dB(4倍) 程度であったのに対し、PPLN導波路 の効率化およびモジュールの結合損失 の抜本的改善により、現在では25 dB (320倍)以上の増幅利得を実現(図2 (b)) しており、増幅媒質としてファ イバ伝送路の損失補償が十分可能なレ ベルに達しています.

さらに,既存の光通信システムで用 いられる波長多重(WDM)技術やデ ジタルコヒーレント技術との親和性の 観点も極めて重要であり,デバイスと しての性能向上と同時に,PSAの適

- *1 標準量子限界:量子光学における不確定性 原理に起因した制約であり、レーザ光増幅 器を含む従来の位相感応ではない光増幅器 に課せられる理論限界です.
- *2 雑音指数:信号を増幅したときの入出力間 でのSNRの劣化の度合いを示す指数、雑音 指数が高いほど増幅により信号品質が劣化 します.
- *3 周期分極反転ニオブ酸リチウム:異なる波長の光どうしを相互作用させることが可能な「非線形光学効果」と呼ばれる特殊な特性を持つ結晶であるニオブ酸リチウム(LiNbO₃)において、自発分極と呼ばれる結晶内の正負の電荷の向きを一定の周期で強制反転させた人工結晶です。周期分極反転ニオブ酸リチウムは、元のニオブ酸リチウム結晶よりも圧倒的に高い非線形光学効果を得ることができます。



応領域の拡大を進めてきました.例え ば、前述の縮退型のOPAでは単一波 長かつ2値の変調信号しか取り扱うこ とができません.また、PPLNに代表 される二次非線形光学媒質には偏波依 存性があるため、単一偏波しか増幅す ることができませんでした(図2(a)).

私たちは、OPAにおいて $\omega_1 \neq \omega_2$ の非縮退型と呼ばれるパラメトリック 過程に着目し、アイドラ光を信号光の 位相共役光とすることで多値変調信号 の増幅(図2(c))と複数チャネルの信 号の一括増幅に成功しています.また、 偏波多重(PDM: Polarization Division Multiplexing)信号に対する位相感応 増幅に関しても、偏波ダイバシティ構 成を用いることで可能としました.こ の構成では、入力信号を偏光ビームス プリッタ(PBS: Polarization Beam Splitter)で分離した後、2つのOPA を用いて独立に増幅し、PBSを用い て再合波します.

実際に, 偏波ダイバシティ構成にお いて位相共役なアイドラ光を用いた非 縮退パラメトリック増幅を適用し, 偏 波 多 重 お よ び 波 長 多 重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) された多値変調信号の位相感応増幅を 行った結果を図 2 (d)に示します⁽⁵⁾. 送 信器では, 100 GHz間隔で16波のキャ リ ア を 配置 し, 20 GbaudのPDM -16QAM信号の信号光・位相共役光対 を生成しました. 伝送路には80 kmの 分散補償伝送路を用い, 受信器では光 フィルタでWDM信号のうちの1波を 切り出し, デジタルコヒーレントレ シーバで受光し, オフラインでの信号 処理により復調しました.

図2(d)の入出力の光スペクトルか ら分かるように、16波WDMの全波に 対し、20 dB以上の利得で一括増幅で きていることが確認できます.また、 同図に示した、PSAを同等利得の EDFAに置き換えた場合の出力スペク トルに対して、約5 dBの明らかな光 信号雑音比 (OSNR: Optical Signal to Noise Ratio)の差が確認できます. 図2(d)には、コヒーレントレシーバ で受信・復調したPSAおよびEDFA それぞれのコンスタレーションも示し ています.復調した信号に対しても OSNRの差に対応した約1dBの信号 品質(Q値)の差が確認できており, PSAで増幅することで低雑音に増幅 され、シンボルを明瞭に識別できるこ とが分かります.

相補スペクトル反転位相共役変換 器の提案と,非線形信号歪み補償

デジタル信号処理技術では非線形歪 み補償が可能であり,すでに実用段階 を迎えていますが,補償性能を向上す るためには信号処理回路規模が大きく なり,消費電力が増大する課題があり

ます. 電気的なデジタル信号処理を用 いずに非線形歪みを補償する手段の1 つとして、位相共役変換*4を用いる 方法が以前から検討されていました が、従来の位相共役変換では波長変換 により2倍の信号チャネルを占有し、 伝送可能な帯域が半分以下に減少して しまうため大容量光通信への適用には 大きな課題となっていました。このよ うな課題を克服するため、波長多重信 号の長波長側と短波長側の信号チャネ ル群をいったん空間的に分離し、それ ぞれの信号チャネル群に対して高効率 PPLN導波路デバイスを用いて位相共 役変換を行う新しい光信号処理回路を 開発しました(図3(a)). これによっ

て,光ファイバの大容量性を損なうこ となく複数波長を一括で波形歪み補償 できる相補スペクトル反転位相共役変 換器を実現しました.

実際に波長多重信号の一括位相共役 変換を行った結果を図3(b)に示しま す.22.5 Gbaudの偏波多重16QAM信 号を25 GHz間隔で92波の波長多重を 行い,1周320 kmの周回伝送路を12

*4 位相共役変換:光は電波と同じように波としての性質を持っており、この波の振動するタイミングを位相と呼びます.位相の正負を逆転させた波は位相共役波と呼ばれ、位相を逆転させる過程を位相共役変換と呼びます.位相共役波は、動画の逆再生のように、あたかも時間をさかのぼるかのように伝わることから「時間反転波」と呼ばれることもあります.



周(3840 km)伝送させた結果です. 送信直後と、3840 km周回伝送後の光 スペクトルの比較から、伝送後ではそ れぞれ46チャネル分の短波側・長波 側のバンドが12回入れ替わっていま すが、元の信号帯域を保持したまま変 換できていることが分かります.また、 励起光用の帯域である短波-長波長の 間の中心の1チャネル分を除いて、 ガードバンドなしでの変換を実現する ことができています.これにより位相 共役変換器を用いた伝送実験として は、世界一の大容量性(13.6 Tbit/s) と高周波数利用効率(5.84 bit/s/Hz) の両立に成功しました⁽⁶⁾.

さらに、1 チャネル当り400 Gbit/s の信号に対して,本方式の適用性を実 証するため、96 Gbaudの偏波多重 8QAM信号を用いた伝送実験も実施し ました.位相共役変換を用いた場合と、 用いない場合のそれぞれの最適入力パ ワーにおける伝送距離の比較評価結果 を図3(c)に示します. 変換の有/無の 場合のファイバへの信号光の最適入力 パワーはそれぞれ+6 dBm/+2 dBmで あり、より強い光信号を用いて光ファ イバで伝送でき、これにより、最大伝 送距離(誤り訂正符号のしきい値Q= 5 dBを用いた場合) が7040 kmから 9600 kmに延伸可能なことを実証しま した. これにより、位相共役変換によ る信号歪み補償が400 Gbit/s超級の高 速ボーレート信号(100 GHz級広帯域 信号)にも適用可能なことを世界に先 駆けて示すことができました(7).

今後の展開

本稿では、ネットワーク大容量化の 鍵となる光通信システムの抜本的な SNR改善に向け、光通信への適用を めざした光パラメトリック増幅技術の 研究開発について紹介しました。本技 術は低雑音増幅や光信号歪み補償のほ かにも、波長変換によるさまざまな波 長域におけるコヒーレント光の生成・ 増幅応用.スクイーズド光や光子対生 成といった量子情報処理応用への展開 が見込まれます. 今後も本技術をさら に進展させ、光のコヒーレンシを駆使 した革新技術の創出をめざしていきま す。本研究の一部は独立行政法人情報 通信機構 (NICT) の高度通信・放送 研究開発委託研究「光周波数·位相制 御光中継伝送技術の研究開発|の一環 としてなされたものです.

■参考文献

- R.-J. Essiambre, G. Kramer, P. J. Winzer, G. J. Foschini, and B. Goebel: "Capacity limits of optical fiber networks," J. Lightwave Technol., Vol.28, No.4, pp.662-701, 2010.
- (2) C. M. Caves: "Quantum limits on noise in linear amplifiers," Phys. Rev. D, Vol.26, No.8, pp.1817-1839, 1982.
- (3) Y. Nishida, H. Miyazawa, M. Asobe, O. Tadanaga, and H. Suzuki: "0-dB wavelength conversion using direct-bonded QPM-Zn: LiNbO₃ ridge waveguide, " IEEE Photonics Technol. Lett., Vol.17, No.5, pp.1049-1051, 2005.
- (4) T. Umeki, O. Tadanaga, and M. Asobe: "Highly efficient wavelength converter using direct-bonded PPZnLN ridge waveguide," IEEE J. Quantum Electron., Vol.46, No.8, pp.1206-1213, 2010.
- (5) T. Umeki, T. Kazama, T. Kobayashi, S. Takasaka, Y. Okamura, K. Enbutsu, O. Tadanaga, H. Takenouchi, R. Sugizaki, A. Takada, R. Kasahara, and Y. Miyamoto: "Polarization-diversity In-line Phase Sensitive Amplifier for Simultaneous Amplification of Fiber-transmitted WDM PDM-16QAM Signals," Proc. of OFC 2018, paper M3E.4, San Diego, U.S.A., March

2018.

- (6) T. Umeki, T. Kazama, A. Sano, K. Shibahara, K. Suzuki, M. Abe, H. Takenouchi, and Y. Miyamoto: "Simultaneous nonlinearity mitigation in 92 × 180-Gbit/s PDM-16QAM transmission over 3840 km using PPLN-based guard-band-less optical phase conjugation," Opt. Express, Vol.24, No.15, pp.16945-16951, 2016.
- (7) T. Kobayashi, T. Umeki, R. Kasahara, H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, H. Takenouchi, and Y. Miyamoto: "96-Gbaud PDM-8QAM Single Channel Transmission over 9,600 km by Nonlinear Tolerance Enhancement using PPLN-based Optical Phase Conjugation," Proc. of OFC 2018, paper Th3E. 4, San Diego, U.S.A., March 2018.



 (上段左から)小林孝行/梅木毅伺/ 宮本 裕
(下段左から)笠原 亮一/風間 拓志/ 圓佛 晃次

非線形光学デバイスを用いた光信号処理 技術により光情報通信のさらなる発展へ貢 献していきます.

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所 企画担当 TEL 046-240-2022 FAX 046-240-4328 E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

超100 Gbaud光伝送を可能とする 超高速光フロントエンドデバイス技術

光通信ネットワークの進展を支えるためにチャネル容量(1 波長当りの伝送容量)を拡大する検討が精力的に進められてお り、100 Gbaudを超えるような高シンボルレート(変調速度)で の光伝送技術に近年注目が集まっています.本稿では、高シン ボルレート光伝送の実現に向けた課題に触れ、それら課題解決 のためにNTT研究所で取り組んでいる超高速光フロントエンド デバイス技術についての最新成果を紹介します.

| ながたに | むねひこ† | 1,2 わきた | ひとし† | 1 お ぎ そ | よしひろ † |
|--|------------|---------------|------------------|---------------------------|----------------|
| 長谷 | 宗彦 | /脇田 | 斉 | /小木曽 | 自義弘 |
| _{やまざき} 山崎 | ひろし† 裕史 | 1.2 いだ /井田 | みのる† 実 | ^{1 の さ か} /野坂 | Dでゆき†1,2 秀之 |
| NTT先端集積デバイス研究所 ^{†1} NTT未来ねっと研究所 ^{†2} NTTデバイスイノベーションヤンタ ^{†3} | | | | | |

光伝送技術トレンドと光トランシー バにおける課題

高精細映像配信,クラウドコン ピューティングやIoT (Internet of Things)など,新しい情報通信サー ビスの普及・拡大を背景として,光通 信ネットワークを流れるトラフィック は急速な勢いで増え続けています.特 に大容量かつ長距離伝送技術が求めら れる基幹系の光通信ネットワークに目 を向けると,通信トラフィックの増大 に対応するため,2010年以降デジタ ルコヒーレント光伝送技術が新たに導 入され⁽¹⁾,現在ではチャネル容量400 Gbit/s(1波長当り400 Gbit/s)の光 伝送システムの運用が始まろうとして います.通信トラフィックは今後も指 数関数的に増え続けることが予測され ており、光通信ネットワークのさらな る大容量化を持続的かつ経済的に推進 していく必要があります.経済性を担 保する観点においては、1対の光送受 信器で伝送可能なチャネル容量(1波 長当りの伝送容量)を拡大することが 不可欠であり、信号の変調多値度を上 げるかシンボルレート(変調速度)を 高速化するかのどちらかのアプロー チ、もしくはその両方のアプローチを とる必要があります.伝送距離の確保 に向けては、信号対雑音比が重要なた め、変調多値度を抑えながらシンボル レートを高速化するほうが有利である ことから、100 Gbaudを超えるような 高シンボルレートでの長距離光伝送技 術が次世代の基幹系ネットワークシス テムに対するソリューションとして非 常に注目を集めています.

しかしながら,高シンボルレート光 伝送の実現に向けては,光トランシー バ(光送信器および光受信器)におけ る課題も存在します.従来のデジタル コヒーレント光伝送用の光トランシー バの構成図を図1に示します.100 Gbaudを超えるような高シンボルレー



ト伝送に対応しようとすると、光トラ ンシーバを構成する各デバイスには少 なくとも50 GHz (シンボルレートの ナイキスト周波数) 以上のアナログ帯 域が求められることになります。特に Si $(\mathcal{V} \cup \mathcal{I} \mathcal{V})$ CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 技術で 実現されるデジタル・アナログ変換器 (DAC) やアナログ・デジタル変換器 (ADC) が送受信器における帯域のボ トルネックとなっており、最先端 CMOSプロセスを用いたとしてもそ れらのアナログ帯域は50 GHzには大 きく届きません (図2). 今後、さら なるCMOSの微細化が進んだとして も、それらアナログ帯域性能について は大幅に改善することは難しいと予測 されており、いかにこれらDACや ADCのアナログ帯域を拡張するかが 高シンボルレート光伝送実現への大き なカギとなります. また, 100 Gbaud を超えるような超高速・広帯域電気信 号の取扱いは、信号配線の引き回しや それに伴う高周波での損失増大の点で 難しいことから,光フロントエンド部 分,具体的には送信側では光変調器ド ライバアンプと光変調器,受信側では 受光器とトランスインピーダンスアン プを近接配置し1つの一体集積型モ ジュールとして仕上げることが必然的 に求められ,その複雑さなど実装面で の難しさも顕在化してきます.

帯域ダブラ技術の提案と有用性検証

前述のCMOS DACおよびADCの アナログ帯域限界を打ち破るべく,こ れまでに私たちは帯域ダブラという NTT研究所オリジナルの新しい帯域 拡張技術の提案を行ってきました⁽²⁾. 私たちの提案する帯域ダブラ技術を適 用した光トランシーバ構成図を**図3**に 示します.送信側では所望の信号に対 して適切な前置デジタル信号処理を施





28 NTT技術ジャーナル 2019.3

し、2つのSub-DACからのアナログ 信号をアナログマルチプレクサ (AMUX) により合成することで2倍 の帯域の信号を生成し、受信側では受 光した広帯域信号をアナログデマルチ プレクサ (ADEMUX) で2分の1の 帯域の信号に分離し、それらを2つの Sub-ADCで受けて適切な後置デジタ ル信号処理を施すことで所望の信号を 復調するという手法です.利用可能な アナログ帯域を2倍化する手法である ことから「帯域ダブラ技術」と呼んで います、この帯域ダブラ技術で用いる AMUXおよびADEMUXについては. NTT研究所が長年培ってきた超高速 トランジスタ技術であるInP(インジ ウムリン) HBT (InPヘテロ接合バイ ポーラトランジスタ) 技術⁽³⁾により実 現しています。詳細な信号処理の原理 説明についてはここでは割愛します が、本技術によりCMOS DACとADC のアナログ帯域を2倍に拡張すること

ができ、従来の2倍のシンボルレートで の信号伝送が可能となります.すでに提 案原理の実証実験に成功しており⁽⁴⁾, さらに送信帯域ダブラ技術の適用に より120 GbaudでのProbabilisticallyshaped偏波多重64QAM(64値の直交 振幅変調)信号を用いた世界初の 1 Tbit/sチャネル容量での長距離波長 多重光伝送にも成功しています.

最新AMUX ICと160 Gbaud級 の変調信号生成

伝送特性をより引き上げるために、 現在AMUXおよびADEMUX IC(集 積回路)のさらなる高速・高性能化の 検討を進めており、2018年には新た に開発した $0.25 \,\mu$ m InP HBT技術⁽⁵⁾ を適用して110 GHzを上回るアナログ 帯域を有するAMUX IC⁽⁶⁾の実現に成 功しました. $0.25 \,\mu$ m InP HBTおよ びAMUX ICの概要と基本特性を**図4** に示します. $0.25 \,\mu$ m InP HBTにつ

いては、トランジスタの速度性能指標 である電流利得遮断周波数 (f_r), 最 大発振周波数 (fmax) がそれぞれ460 GHz, 480 GHzと高速・高周波動作に 極めて優れた特性を有しています。ま たAMUX ICについては、2つのアナ ログ入力信号をクロック信号で交互に 出力する機能を有しており、2つの入 力バッファとクロックバッファ, AMUXコアおよび出力バッファにて 構成されます.また、本ICにはモ ジュール等への実装時に生じる高周波 特性の劣化(高周波での損失)を補償 するため、 周波数応答にブロードな ピーキング特性を持たせる回路技術を 提案・導入し、アナログ信号およびク ロック信号経路ともに110 GHzを上回 る帯域を確保しています.本AMUX ICを帯域ダブラとして用いると、原 理上110 GHzアナログ帯域を有する 220 GS/s級のDACを構成することが 可能となります. すなわち, 200 特



Gbaud級の信号生成にも対応可能なポ テンシャルを持ったICです.実際に 本AMUX ICを帯域ダブラに適用し. 高シンボルレート信号の生成実験を実 施した結果を図5に示します。本実験 では. 40 GHzアナログ帯域のSub-DAC (計測器) からの出力をAMUX で合成し、80 GHz信号帯域を有する 160 GbaudのPAM-4 (4値の振幅変 調) 信号を生成するデモンストレー ションを実施しました.結果として、 図5のアイダイアグラムに示すように 160 Gbaudでの明瞭なPAM-4 信号生 成に成功し⁽⁷⁾、本AMUX ICの有用性 を実証しました、この技術をデジタル コヒーレント光伝送へ適用すると. 160 Gbaudでの変調信号生成が可能と なり、1 Tbit/sを大きく上回るチャネ ル容量の実現が見込めます。

ー体集積型光フロントエンドモ ジュール実現に向けた取り組み

冒頭でもう1つ課題として述べたよ うに、100 Gbaudを超える高速・広帯 域信号の取扱いは難しく、光デバイス を含むフロントエンド部での一体集積 化が高シンボルレート用の光トラン シーバでは重要となります.特に送信 側については、AMUX、光変調器ド ライバアンプ,光変調器を近接配置し, 1つの集積モジュールとして仕上げる ことが技術を実用化するうえでのポイ ントとなります.そこで私たちは,そ のような一体集積型光フロントエンド モジュールの実現を見据えて, AMUX ICへの光変調器ドライバ機能 の搭載(AMUX-DRV ICの実現),ま たAMUX-DRV ICと光変調器の協調 設計についても併せて検討を進めてき ました.

AMUXおよび光変調器ドライバア ンプについては、どちらもICにより 実現されるデバイスですので、個別に 実現しそれぞれを接続するよりも、一 体ICとして完結させるほうが信号品 質確保や消費電力低減の観点からメ リットがあります.そこで、先に述べ たAMUX ICに対して、出力バッファ を高利得かつ大きな線形出力振幅を 持ったアンプに置き換えることで、光 変調器ドライバアンプ機能を持った AMUX IC、すなわちAMUX-DRV IC を実現しました.

光変調器には、NTT研究所で研究・ 開発を進めている80 GHz級の電気-光 (EO)変換帯域を有するInPマッハ ツェンダー型光変調器をベースとした 光IQ変調器⁽⁸⁾の利用を想定していま す.出力部に設けたアンプに対して, 光変調器の周波数特性を補償するよう に80 GHzにかけてのブロードなピー キング特性を付加し,さらに光変調器 とのインピーダンス整合に配慮しなが ら変調に必要な駆動振幅を確保するた めの利得設定を行うなど,性能の最大 化を図るための電気と光の協調設計を 行いました.

私たちが考えるAMUX-DRVとInP 光変調器の一体集積型モジュールのコ ンセプトと、実現したAMUX-DRV ICおよびInP光変調器のそれぞれの周 波数応答特性を図6に示します. AMUX-DRV ICについては、設計の ねらいどおり80 GHzにかけてのブ ロードなピーキング特性と変調器駆動 に必要な利得特性が確認でき, InP光 変調器と組み合わせた際に80 GHzま でのフラットなEO応答特性実現の見 通しが得られました.また.実際に本 AMUX-DRV ICとInP光変調器を近接 配置したサブアセンブリを作製し、80 GHz帯域をフルに活用したDMT (Discrete Multi-Tone) 変調による 400 Gbit/s光伝送に成功していま す⁽⁹⁾. これは、強度変調-直接検波 (IM-DD: Intensity Modulation-Direct Detection) 方式での世界レコードと





なる伝送容量です.今後は、一体集積 型光フロントエンドモジュールを完成 させ、デジタルコヒーレント光伝送へ の適用検証を進めていく予定です.

今後の展開

本稿では、100 Gbaudを超えるよう な高シンボルレート光伝送に向けた課 題と、それらの解決に向けた帯域ダブ ラ技術、一体集積型光フロントエンド モジュール実現に向けた取り組みを紹 介しました.今後も、光フロントエン ドデバイスのさらなる高速・高性能化 を推進するとともに、それら技術の実 用化に向けた取り組みを加速していき ます.

■参考文献

- 宮本・佐野・吉田・坂野: "超大容量デジタ ルコヒーレント光伝送技術,"NTT技術 ジャーナル, Vol.23, No.3, pp.13-18, 2011.
- (2) 長谷・山崎・濱岡・野坂・宮本: "光送信器の広帯域化に向けた帯域ダブラ技術," NTT技術ジャーナル, Vol.29, No.3, pp.62-66, 2017.
- 山幡・栗島・深井・福山・平田: "高信頼 InP-HBT集積回路製造技術," NTT技術 ジャーナル, Vol.19, No.11, pp.62-65, 2007.

- (4) H. Yamazaki, M. Nagatani, S. Kanazawa, H. Nosaka, T. Hashimoto, A. Sano, and Y. Miyamoto: "Digital-Preprocessed Analog-Multiplexed DAC for Ultrawideband Multilevel Transmitter," J. Lightwave Technology, Vol.34, No.7, pp.1579-1584, 2016.
- (5) N. Kashio, K. Kurishima, M. Ida, and H. Matsuzaki: "Over 450-GHz f_t and f_{max} InP/ InGaAs DHBTs With a Passivation Ledge Fabricated by Utilizing SiN/SiO₂ Sidewall Spacers, "IEEE Trans. Electron Devices, Vol. 61, No. 10, pp. 3423-3428, 2014.
- (6) M. Nagatani, H. Wakita, H. Yamazaki, M. Mutoh, M. Ida, Y. Miyamoto, and H. Nosaka: "An Over-110-GHz-Bandwidth 2:1 Analog Multiplexer in 0.25- μ m InP DHBT Technology, "Proc. of IMS 2018, Philadelphia, U.S.A., June 2018.
- (7) H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, M. Nakamura, S. Kanazawa, M. Ida, T. Hashimoto, H. Nosaka, and Y. Miyamoto: "160-GBd (320-Gb/s) PAM4 Transmission Using 97-GHz Bandwidth Analog Multiplexer," IEEE Photonics Tech. Lett., Vol. 30, No. 20, pp. 1749-1751, 2018.
- (8) Y. Ogiso, J. Ozaki, Y. Ueda, N. Kashio, N. Kikuchi, E. Yamada, H. Tanobe, S. Kanazawa, H. Yamazaki, Y. Ohiso, T. Fujii, and M. Kohtoku: "Over 67 GHz Bandwidth and 1.5-V V π InP-Based Optical IQ Modulator with n-i-p-n Heterostructure," J. Lightwave Technology, Vol.35, No.8, pp.1450-1455, 2017.
- (9) H. Yamazaki, M. Nagatani, H. Wakita, Y. Ogiso, M. Nakamura, M. Ida, T. Hashimoto, H. Nosaka, and Y. Miyamoto: "Transmission of 400-Gbps Discrete Multi-Tone Signal Using >100-GHz-Bandwidth Analog Multiplexer and InP Mach-Zhender Modulator," Proc. of ECOC 2018, Roma, Italy, Sept. 2018.



(後列左から)井田 実/野坂 秀之/
山崎 裕史
(前列左から)脇田 斉/長谷 宗彦/
小木曽 義弘

増加の一途をたどるトラフィックに対応 するために光通信ネットワークの高速・大 容量化は今後も不可欠です.私たちは革新 的なデバイス技術の創出により従来の限界 を突破し,光通信ネットワークのさらなる 発展に貢献していきます.

◆問い合わせ先

NTT先端集積デバイス研究所 研究推進担当 TEL 046-240-2022 FAX 046-240-4328 E-mail sende-kensui-p@hco.ntt.co.jp

テラビット級無線伝送をめざす 大容量OAM多重伝送技術

NTTは、5Gのさらに次世代を実現する革新的無線通信技術の開拓をめざ し、テラビット級無線伝送の実現に向けた研究開発を進めています。同一 周波数帯を用いて同時に複数の電波を送信できる新たな空間多重技術とし て、電磁波の軌道角運動量(OAM: Orbital Angular Momentum)を活用し たOAM多重伝送技術に取り組んでいます。本稿では28 GHz帯を用いた OAM多重伝送の実験において、世界初の120 Gbit/sの伝送に成功した本技 術の詳細を紹介します。

| 研究背景とテラビッ | ト級無線伝送 |
|-----------|--------|
| 技術への取り組み | |

これから実現される5Gにより,コ ネクティッドカー,VR (Virtual Reality)/AR (Augmented Reality), 高精細映像伝送を含むあらゆる分野で 無線通信の利用は加速されます.モバ イルトラフィックは,年率1.5倍で増 加すると予想されており,このような 傾向から,2030年代には,数百ギガ ビット級からテラビット級の無線伝送 が必要であると考えられます.

NTTは、将来の無線通信需要に備 え、テラビット級無線伝送の実現をめ ざす研究開発に取り組んでいます.大 容量無線通信の実現には,空間多 重*1数の増加,伝送帯域幅の広帯域 化,変調多値数の増加の3つの方向性 があります(図1).これらのうち, 変調多値数を増やす方法は,すでに限 界に達しつつあります.例えば,1度 に10ビットの情報を伝送する 「1024QAM (Quadrature Amplitude Modulation)」の2倍の容量を得るた めには,1度に20ビットの情報を伝送 する100万以上の多値変調が必要にな り,このアプローチでの大容量化の実 現は困難です.NTTは(準)ミリ波 帯*2を用い伝送帯域幅を広帯域化す



| ^{りぃ} | どうはん †1 ささき | ^{ひろふみ†1} |
|---------------|---------------|-------------------|
| 李 | 斗煥 /笹木 | 裕文 |
| 。 | やすのり†1 やまだ | ^{たかゆき†1} |
| 八木 | 康徳 /山田 | 貴之 |
| , u | たかな†1 はまだ | ひろし†2 |
| 加保 | 貴奈 /濱田 | 裕史 |

NTT未来ねっと研究所^{†1} NTT先端集積デバイス研究所^{†2}

るとともに、本稿で説明する軌道角運 動量 (OAM: Orbital Angular Momentum)^{*3}の性質を持つ電波を使っ た空間多重数増加の研究に取り組んで います.

OAM多重伝送の原理とNTTが考 案したOAM-MIMO多重伝送技術

■OAM多重伝送技術

OAM多重伝送技術とは、異なる OAMモードを持つ複数の電波にそれ ぞれ信号を乗せて無線伝送をすること で,同時に送信するデータ信号の数(多 重数)を増加させる技術です^{(1),(2)}. OAMとは、電波の性質を表す物理量 の1つであり、電波の進行方向の垂直 平面上で位相が回転しながら進行する ように表されます.この位相の回転数

- *1 空間多重:複数のデータ系列を,空間的に 独立な複数の電波を用いて,同時刻・同 周波数帯において並列に伝送する伝送方法 です.
- *2 ミリ波・準ミリ波:ミリ波は,波長が1~10 mmと非常に短く,マイクロ波と同様に強い 直進性があります.周波数帯域は30~300 GHzに相当します.準ミリ波は,波長が数 cm程度のミリ波に近い電波の俗称であり, 10~30 GHz付近の周波数帯域の電波のこと をいいます.
- *3 軌道角運動量:電波の性質として、位置座標とそれに共役な運動量の積で表される電波の持つ角運動量の1つで、異なる軌道角運動量を持つ電波は相関がないため、重ね合わせても独立に分離できます。

をOAMモードと呼びます. OAMの性 質を持つ電波は,同一位相の軌跡が進 行方向に対して螺旋形状に表れます (**図2**).例えば,図2(a)は,OAMモー ド1,OAMモード2,OAMモード3 の同一位相の軌跡を表します.

OAMの性質を持つ電波は、送信時 と同じ位相の回転数を持った受信機を 使うことで受信することができます. また、各OAMモードを持つ電波は、 互いに直交であり、異なるOAMモー ドを持つ複数の電波を同時に送信して も、送信時のOAMモードに合った位 相の回転数を持った受信機を用意すれ ば、それぞれの電波を分離することが できます.この特徴を利用し、複数の 異なるデータを同時に伝送することが できます.例えば、図2(b)は、OAMモー ド1、OAMモード2、OAMモード3 にそれぞれ異なる信号を乗せて、同時 に伝送する場合の例を表しています.

電波のOAMに関する研究は,20世 紀初頭にさかのぼり,2010年代以降 は、ミリ波帯の無線通信技術の成熟に つれ、ミリ波帯での広い帯域幅を用い たOAM多重伝送が研究されてきてい ます.近年の結果としては、米国の南 カリフォルニア大学により、2014年 に28 GHz帯で,2016年に60 GHz帯を 用いて32 Gbit/sの伝送が報告されて います^{(3),(4)}.

■OAM-MIMO多重伝送技術

理論的には、OAMモード(位相の 回転数)は無限に増やせますので、 OAM多重伝送により、多重数を無限 に増やすことができます.しかしなが ら、OAMの性質を持つ電波は、OAM モードが高くなるほど(位相の回転数 が多くなるほど)、電波の進行により 電力が空間的に広がる性質があり、高 いOAMモードを持つ電波を用いた伝送には、現実的な限界があります。

NTTは、このような限界を考慮し つつ効率的に多重数を増やすため、 OAM多重伝送に、現在広く利用され ているMIMO (Multiple-Input Multiple-Output)^{*4}技術を統合したOAM-MIMO多重伝送技術を考案しまし た⁽⁵⁾.実環境での送受信が可能な低い OAMモードからなるOAM多重伝送 を、複数セットで同時に伝送すること で、従来を凌駕する多重伝送が実現で きます. MIMO技術を巧みに統合する ことによって,異なるOAMモード間 で互いに干渉しない性質を維持しつ つ,複数セットの同一のOAMモード 間の信号分離ができます.

OAM-MIMO多重伝送技術の構成例 を図3に示します.この図は、後述す る伝送実験を実施した合計11多重伝 送を行う例を表します.左は、中心に

*4 MIMO:送信機と受信機の双方で,複数の アンテナを用いて通信品質を向上する無線 信号処理技術.





1つと同心円の4つの円形アレーアン テナ(UCA)を表します.中心の1 つのアンテナで構成されるUCA#0以 外のUCA#1~4はそれぞれ,OAM モード-2,-1,0,1,2を生成し, 5つのOAMモードの電波を多重する ことができます.同一のモード内で多 重された信号は,受信機でMIMO技術 により分離します.

28 GHz帯を用いた実験にて,世界 で初めて120 Gbit/sの伝送に成功

NTTは、OAM-MIMO多重伝送技術 の有効性を示すため、28 GHz帯にて 帯域幅2 GHzを使う送受信装置を試 作しました(図4).本送受信装置は、 異なる半径を持つ4つの同心円状の UCAと中央に1つのアンテナで構成 されています。各UCAは16個のアン テナ素子で構成され、5つのOAMモー ドの電波の送受信ができます。中心の アンテナは、軸合わせおよびOAMモー ド0の送受信に使います。これらのア ンテナ素子を介して、合計21のデータ 信号の同時伝送が可能です。準ミリ波 以上の周波数帯でGHz級の伝送帯域 幅を使うOAMの性質を持つ複数の電 波を同時に伝送できる装置は、世界初 になります。

本送受信装置と実験系の構成を図5 に示します.送信側では,送信信号列 を生成し,デジタルーアナログ変換器 として複数台の任意波形発生器を使用 してアナログIF (Intermediate Frequency:中間周波数)帯信号に変換し, 送信装置に入力します.入力された信 号は,28 GHz帯に変換してからOAM モード生成回路を介して各UCAによ り送信されます.受信側では,各 UCAが受信した電波をOAMモード分 離回路でOAMモードごとに分離して からアナログーデジタル変換器として 使用されるデジタルオシロスコープに より、デジタル信号に変換し、受信信 号処理を行います.ここで、OAMモー ド生成回路とOAMモード分離回路は、 それぞれ、5×16と16×5の広帯域バ トラーマトリクス回路を設計して実現 しました.これにより、本生成回路と 分離回路ごとに、5つのOAMモード の使用ができます.

本試作装置を用いて実験室において



図4 試作した送受信装置



NTT技術ジャーナル 2019.3 35

300 GHz帯ミキサIC



チップサイズ 1mm × 1mm





図 6 300 GHz帯のミキサICとモジュール

10 mの距離で伝送実験を実施しました. OAM多重される複数の電波にデータ信号を乗せ、原理に従って無線伝送が可能であることを確認しました. さらに、9.6~13.3 Gbit/sのデータ信号11本を多重し、同時に処理できる信号処理技術を実現し、合計120 Gbit/sの大容量無線伝送に世界で初めて成功しました⁽⁶⁾.

広帯域化技術への期待

最近,広い帯域幅を活かす技術が検 討されつつあります.例えば,図6で示 す300 GHz帯のミキサICとモジュール は,従来の300 GHz帯無線フロントエ ンドで課題となっていた伝送帯域幅の 拡大と信号対雑音比(SNR)の向上 とを両立させました⁽⁷⁾.このデバイス を用いて,25 GHzの広い帯域幅を使 い,1ストリームで100 Gbit/sの伝送 を実現しました.このような広帯域 IC技術とOAM多重伝送技術を併用す ることにより,さらなる大容量への期 待ができます.

今後の展開

今回の成果は、OAM多重の可能性

を示したものですが、実社会で利用す るためには、多様な環境における大容 量無線伝送の実験評価、およびそこで 顕在化する課題の解決が必要です.次 のステップとして、屋外での伝送実験 によりフィールドでの実現性を検証す る予定です.また、より広い帯域幅が 使える周波数帯を活用し、テラビット 級の無線通信の実現に向けた研究開発 を推進していきます.

■参考文献

- A. E. Willner: "Communication with a twist," IEEE Spectrum, Vol.53, No.8, pp.34-39, 2016.
- (2) D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, K. Hiraga, and T. Nakagawa: "Orbital angular momentum (OAM) multiplexing: An enabler of a new era of wireless communications," IEICE Trans. Commun., Vol.E100-B, No.7, pp.1044-1063, 2017.
- (3) Y. Yan, G. Xie, M. P. J. Lavery, H. Huang, N. Ahmed, C. Bao, Y. Ren, Y. Cao, L. Li, Z. Zhao, A. F. Molisch, M. Tur, M. J. Padgett, and A. E. Willner: "High-capacity millimeterwave communications with orbital angular momentum multiplexing," Nature Commun., Vol.5, p.4876, 2014.
- (4) Y. Ren, L. Li, G. Xie, Y. Yan, Y. Cao, H. Huang, N. Ahmed, Z. Zhao, P. Liao, C. Zhang, G. Caire, A. F. Molisch, M. Tur, and A. E. Willner: "Line-of-Sight Millimeter-Wave Communications Using Orbital Angular Momentum Multiplexing Combined with Conventional Spatial Multiplexing," IEEE Trans. Wireless Commun., Vol.16, No.5, pp.3151-3161, 2017.
- (5) D. Lee, H. Sasaki, H. Fukumoto, Y. Yagi, T. Kaho, H. Shiba, and T. Shimizu: "An

Experimental Demonstration of 28 GHz Band Wireless OAM-MIMO (Orbital Angular Momentum Multi-Input and Multi-Output) Multiplexing," Proc. of IEEE VTC 2018-Spring, Porto, Portugal, June 2018.

- (6) H. Sasaki, D. Lee, H. Fukumoto, Y. Yagi, T. Kaho, H. Shiba, and T. Shimizu: "Experiment on Over-100-Gbps Wireless Transmission with OAM-MIMO Multiplexing System in 28 GHz Band," Proc. of IEEE GLOBECOM 2018, Abu Dhabi, U.A.E., Dec. 2018.
- (7) H. Hamada, T. Fujimura, I. Abdo, K. Okada, H. Song, H. Sugiyama, H. Matsuzaki, and H. Nosaka: "300-GHz. 100-Gb/s InP-HEMT Wireless Transceiver Using a 300-GHz Fundamental Mixer," IEEE MTT-S IMS, June 2018.



 (上段左から) 李 斗煥/八木 康徳/ 濱田 裕史
(下段左から)山田 貴之/笹木 裕文/ 加保 貴奈

世界に先駆けてテラビット級無線を実現 する新技術を確立することで、NTT研究所 のCOEの地位獲得に貢献するとともに、5G のさらに次世代の技術として、事業の優位 性確保に貢献します.

◆問い合わせ先

NTT未来ねっと研究所 ワイヤレスシステムイノベーション研究部 TEL 046-859-4778 FAX 046-859-3351 E-mail doohwan.lee.yr@hco.ntt.co.jp