

光電子融合技術

光技術と電子技術の追求と融合によって 壁を超える通信デバイス技術を開発する

NTT先端集積デバイス研究所は、世界をリードする最先端ネットワークデバイスの研究開発を進めている。現在注力しているのは、光ネットワークの超高速大容量化や超長距離化、光通信／情報処理装置の超低消費電力化の壁となる性能限界要因を打破する技術の開発である。ここでは、超長距離化を困難にしている「信号雑音（S/N）の壁」と超高速大容量化を困難にしている「高速・多値化の壁」を超える技術を紹介する。

PPLN導波路を活用して「S/Nの壁」を超える

光ネットワークの超高速大容量化や超長距離化には、通信システムの信号対雑音比（S/N比）を大幅に改善する必要がある。例えば、大容量化は周波数利用効率の向上で実現できるが、シャノンの通信理論によって、それには高いS/N比が必須であると分かっている。

また、超長距離化を阻害する要因の1つが光増幅器でのS/N比低下である。従来の光増幅器は原理的に必ずS/N比を低下させるため、光増幅器を経由するたびに信号が劣化して最終的には信号を読み取れなくなる。問題を解消するには、S/N比が



NTT先端集積デバイス研究所 光電子融合研究部

【上段左から】部長 重松 智志氏、主任研究員 山崎 裕史氏
研究主任 長谷 宗彦氏、主任研究員 梅木 毅伺氏

主幹研究員 野坂 秀之氏、主幹研究員 竹ノ内 弘和氏、主幹研究員 橋本 俊和氏

低下しない画期的な光増幅器を開発しなければならない。

NTT先端集積デバイス研究所（以下、先デ研）では、こうした「S/N

の壁」をPPLN（周期的分極反転ニオブ酸リチウム）という結晶で超える研究をしている。

PPLNとは、異なる波長の光を相互作用させる「非線形光学効果」という特性を持つニオブ酸リチウム（LN=LiNbO₃）結晶内の正負の電荷の向き（自発分極）を一定の周期で強制反転させた人工結晶である（図1）。元のLN結晶より圧倒的に高い非線形光学効果を得られる特徴を持つ。先デ研では、NTTが長年培ってきた高度な光導波路デバイス加工プロセス技術を生かして、高い変換効率と高強度の励起光（入

PPLN(周期的分極反転ニオブ酸リチウム)とは

異なる波長の光を相互作用させる「非線形光学効果」という特性を持つ結晶であるニオブ酸リチウム（LN=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。元のLN結晶より圧倒的に高い非線形光学効果を得ることができる

PPLN導波路デバイス



図1 PPLNとPPLN導波路デバイスの概要

射光の一種。後述)への耐性を両立するPPLN導波路デバイス(図1下)を開発している。

以下では、PPLN導波路デバイスで実現される、信号の歪みを補償して信号品質を向上させる「位相共役変換」と、低雑音な光増幅を実現する「位相感応増幅(PSA)」の2つの技術を紹介する。

信号の歪みを補償できる位相共役変換技術

PPLN導波路デバイスを利用すると、光の位相の正負を逆転させる位相共役変換を実現できる。位相共役変換した波(位相共役波)は、時間を遡るかのように伝わることから「時間反転波」と呼ばれる。

光信号が光ファイバを通じて伝送される際、伝送距離が延びるにつれて歪みが蓄積していく。現在のデジタルコヒーレント伝送技術では、この歪みを受信時にデジタル信号処理することで補償している。このデジタル信号処理はチャンネルごとに実施する必要があり、チャンネル数が増えるにつれて負荷が大きくなる。

光信号の歪みは、位相共役変換でも補償できる。伝送経路上で光信号を位相共役変換すれば、それ以降は蓄積した歪みを徐々に解消しながら光信号が伝わるからである(図2)。

この方法の利点は、複数チャンネルの信号を一括処理できることである。「複数チャンネルの信号の歪みを位相共役変換で一括処理しておけば、デジタル信号処理による歪み補償の処理

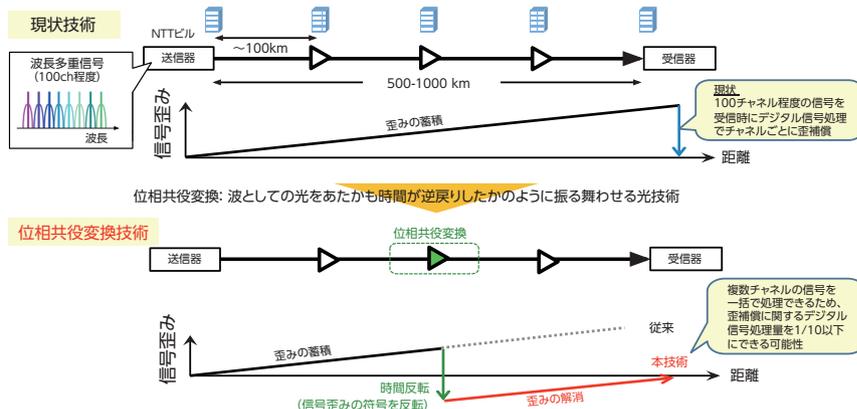


図2 位相共役変換による歪み補償の概念図

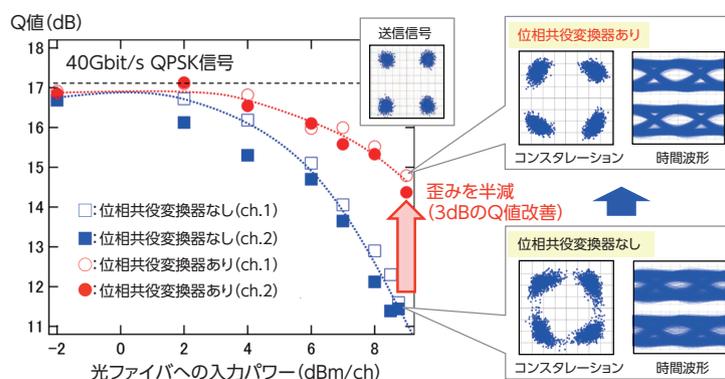


図3 位相共役変換器の有無による信号歪み特性の違い

量を10分の1以下にできる可能性があります。」(光電子融合研究部 主任研究員 梅木 毅 氏)

実際に、チャンネル容量40Gbit/sのQPSK(4位相偏移変調)信号を位相共役変換器で歪み補償した結果を図3に挙げた。位相共役変換器で信号を補償しない場合と比べると、入力パワーが高い信号の歪みを最大で半減できたことなどが分かる。

なお、位相共役変換で歪み補償ができることは2000年頃にはすでに知られていた。しかし、位相共役変換では、変換前と変換後でそれぞれ異なる帯域を使用するため、変換後に使用する帯域を予約帯域とし

て空けておかねばならない。また変換後は、変換前に使用していた帯域が空き帯域になってしまう。「これは、帯域を2倍使わないといけなことを意味します。同技術の大きな課題の一つでした。」(梅木氏)

先デ研では、この問題をたすき掛け方式によって解消した。例えば、変換前にA、Bの帯域を使用していたとすると、Aの信号をBの信号に、Bの信号をAの信号に同時変換するようにしたのである。

位相感応増幅(PSA)で低雑音な光増幅を実現

PPLN導波路デバイスを利用する

位相感応増幅 (PSA)

信号光と位相を同期させた励起光を使ったパラメトリック増幅によって、信号光の主位相成分だけを増幅する光増幅技術

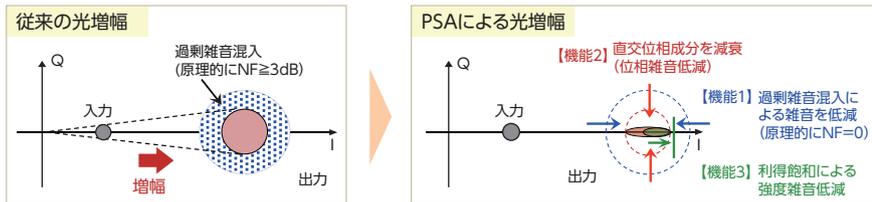


図4 位相感応増幅 (PSA) による低雑音な光増幅の概要

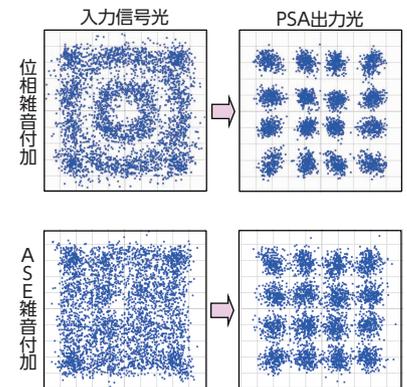


図5 PSAによる多値信号増幅

と、位相感応増幅 (PSA) という光増幅を実現できる。これは、信号光と位相を同期させた励起光 (ここでは増幅エネルギーを供給するための入射光) と信号光を相互作用させることで信号光の主位相成分だけを増幅 (パラメトリック増幅) する技術である (図4上)。

PSAは、雑音を低減する3つの機能を備えている (図4下)。特に重要なのが、原理的には雑音指数 (NF) が0dBであること。NFとは入力 S/N 比と出力 S/N 比との比で、これが0dBであるということは入力と出力で S/N 比が変わらないことを意味する。これに対し、誘導放出現象を利用する従来の光増幅では、原理的にNFは3dB以上になる。NFが3dBとは、入力の S/N 比に対して出力の S/N 比が2分の1に劣化することを意味する。

「実際にPSA方式の増幅器でNFを評価したところ、従来の増幅器では達成不可能な1.8dBであることを実証できました。」 (梅木氏)

長距離伝送では、一般に中継増幅器を多段使用する。従来方式を使っ

ている場合は、中継増幅器を経由するたびに S/N 比が低下するため、あまり伝送距離を延ばせない。これをPSA方式に置き換えれば S/N 比の低下を大幅に抑えることができ、伝送の超距離化を実現できる。

現在先デ研では、PSAをデジタルコヒーレント伝送システムなどの多値変調信号の増幅に活用する研究開発を進めている。PSAの一部は多値変調信号の増幅に対応しており、そうしたPSAを使えば図5のような変換を実現できる。図5は、16値の変調信号をPSAで増幅した例である。入力信号光に値を識別できないほど雑音を加えたに

もかかわらず、増幅後は明確に16値を識別できる状態になっている。

帯域ダブル技術により、「高速・多値化の壁」を超える

さらなる大容量化に向けて、光送信器が送出する信号の多値化が進められている。光送信器の多値化でキーになる機能は、デジタル信号処理を担当するDSPとデジタル信号をアナログ信号に変換するDACの2つである。これらの機能を導入することで、柔軟な信号処理が可能になり、多値化を実現できるようになる (図6)。

しかし現在のCMOS LSIには、生成できる信号が20GHz程度まで

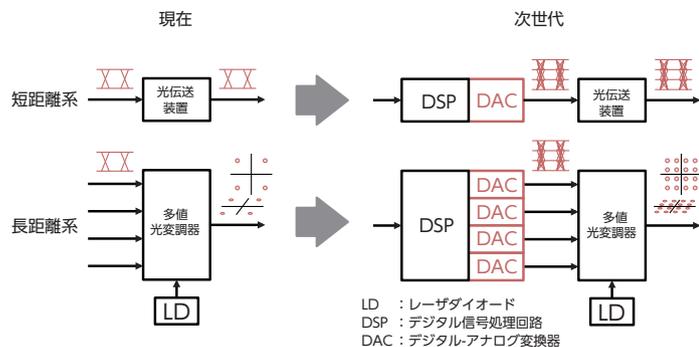


図6 次世代の光送信器にはDSPとDACの導入が進む

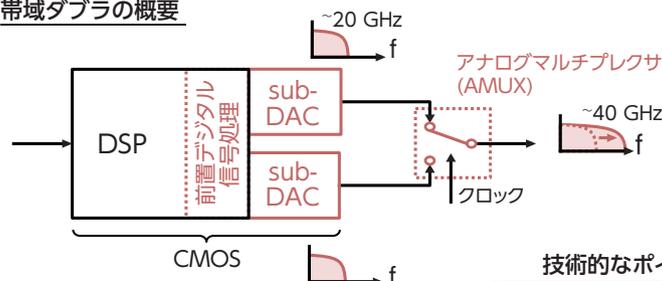
という制限がある。今後、通信システムの高速化が進むと、ここがボトルネックになる恐れがある。

そこで先デ研では、光送信器の帯域を2倍にする「帯域ダブラ」を開発した。帯域ダブラの概要は図7上の通りである。

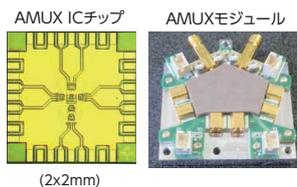
技術的なポイントは2つある。一つは、2個のDACからのアナログ信号を合成して倍の帯域の1つのアナログ信号として出力する高速な「アナログマルチプレクサ (AMUX)」を開発したことである。「デジタル信号を時間軸に多重化するデバイスは精力的に高速化されていますが、アナログ信号を時間軸に多重化する高速デバイスは未開発でした。NTTが長年研究しているリン化インジウム (InP) 系の材料を使ったヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) を使って高速なスイッチング回路を実現しました。」(同研究部 研究主任 長谷宗彦氏)

開発したAMUX ICチップとAMUXモジュールの外観を図7下に挙げた。このAMUXモジュールを利用すれば、50GHz以上の出力信号帯域を実現できる。実際にAMUXモジュールに任意波形発生器からの2つの20GHz帯域のアナログ信号を入力したところ、図8のように40GHz帯域の出力信号が得られた。なお、処理の関係上、出力信号には不要イメージが追加される。しかしこれは、「特定周波数以下の信号だけを通過させるローパスフィルタを使うことで簡単に除去できます。」(長谷氏)

帯域ダブラの概要



AMUX ICチップとモジュール



技術的なポイント

AMUXは、アナログ信号を線形に時間多重化するアクティブスイッチ。デジタル動作のMUXは高速化が進んでいるが、アナログ動作のMUXで高速なものは未開発だった。NTT先端集積デバイス研究所は、高速なInP系の系を用いて高速動作するAMUXを開発した

AMUXからの出力信号が所望のものとなるように、DSPの出力信号を前もって処理する「前置デジタル信号処理」を追加

図7 帯域ダブラとアナログマルチプレクサ (AMUX) の概要

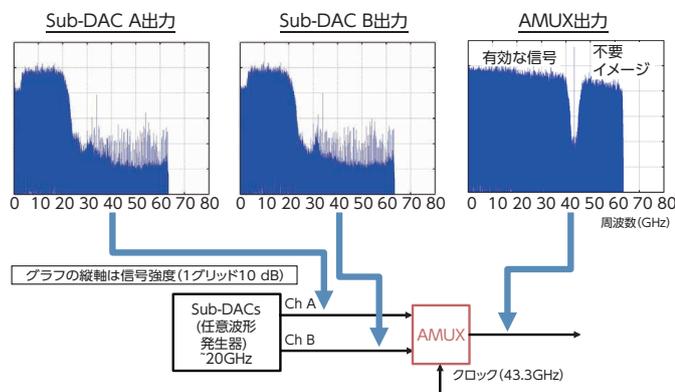


図8 帯域ダブラによるシームレスな帯域拡張を実証

もう一つのポイントは、AMUXからの出力信号が所望のものとなるように、DSPの出力信号を前もって処理する「前置デジタル信号処理」を実施することである。前置デジタル信号処理によってシームレスな帯域拡大ができた。

帯域ダブラを使えば、CMOS LSIが不得意な高速信号生成をアシストできる。これによって1Tbpsを超えるような超大容量の光トランシーバを実現できる。「現在までに、160Gbps

級の4値強度変調信号による光伝送実験に成功しています。これは、光4値強度変調としては世界最速の数値です。」(同研究部 主任研究員 山崎 裕史氏)

先デ研では今後もこうした光技術と電子技術を融合させる研究開発を進めていく考えだ。「PC内の伝送やデータセンタ内伝送、長距離伝送などの幅広い光伝送システムのボトルネック解消を目指していきます。」(同研究部 部長 重松 智志氏)