

[アクセス・モバイル融合制御技術]

アバランシェフォトダイオードを用いた 400GbE用の高感度光受信モジュールを開発

NTTデバイスイノベーションセンタでは、次世代イーサネット規格である400Gビットイーサネット（400GbE）の伝送距離拡大に向けた研究開発を進めている。最近の成果の1つが、アバランシェフォトダイオード（APD）という高感度素子を用いた400GbE用の受信モジュールの開発である。同受信モジュールを利用することで、現在検討中の規格の最大伝送距離10kmを超えた、約30kmの伝送ができる可能性がある。

次世代規格400GbEに向けて 大容量化と長距離化が必要

2017年内の標準化を目指して、400Gbpsの伝送を実現する次世代イーサネット規格（400GbE）の検討が進んでいる。現在検討中の400GbE規格のうち、伝送距離が最大なのは「400GBASE-LR8」で、10kmまでの伝送に対応している。しかし、モバイルバックホール回線などに400GbEを適用するケースを想定して、もっと長い伝送距離を求める声もある。

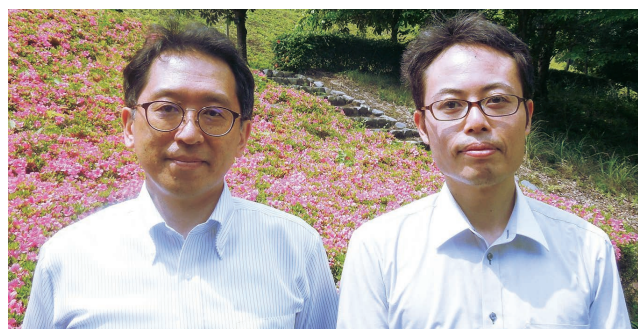
NTTデバイスイノベーションセンタ（以下、DIC）では、10km超の長距離伝送を400GbEで実現するための研究開発に取り組んでいる。「400GbEは標準化前の状態の

ため、デバイス技術の研究開発に当たっては、標準化動向をにらみつつ、ユーザーとなる方々のニーズをヒアリング等で掘り起こすようにしています。その作業を通じて長距離化のニーズがあることを把握

できましたので、長距離化に向けた研究開発に着手しました。」（スマートコネクションデバイスプロジェクト主任研究員 吉松 俊英氏）

伝送距離を延ばす方法の1つが、光信号を受ける光レシーバの受信感度を上げることである。光レシーバの中核的な素子であるフォトダイオード（PD）には主

に2つの種類がある。一般的に使用されるシンプルな構造の「pin-PD」と、構造が複雑だが増幅機能を備えていて受信感度が高い「アバランシェフォトダイオード（APD）」の2つだ。当然APDを



NTTデバイスイノベーションセンタ
スマートコネクションデバイスプロジェクト
[左から] プロジェクトマネージャ 木村 俊二氏
主任研究員 吉松 俊英氏

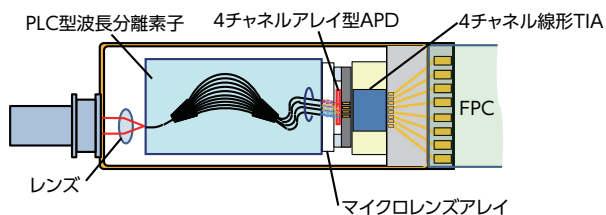
用いた方が光レシーバの受信感度を向上させやすい。

NTT 研究所には、10GbE の時代から APD を用いた高感度な光レシーバ用の受信モジュール（ROSA）の開発実績がある。そこで DIC は、APD を用いた 400GbE 用の ROSA（APD-ROSA）の開発に着手した。

400GbE 用 APD-ROSA 実現の 課題になると思われた変調方式

400GbE 用 APD-ROSA の実現に当たって、当初、大きな課題となると予想されたのが 400GbE で採用された「PAM4（4-level Pulse Amplitude Modulation）」という変調方式である。

従来のイーサネット規格では、0 と 1 の 2 値のみを使う NRZ（Non



TIA : トランスインピーダンスアンプ
FPC : フレキシブルプリント配線板

図1 開発した4チャンネルAPD-ROSAの構成と外観

Return to Zero) という変調方式を採用していた。これに対して PAM4 では、0 ~ 3 の 4 値を使う。「0 と 1 のどちらの状態かを判別できれば良かった NRZ に対して、PAM4 では 4 つの状態を受信側で判別しなければならないため、できるだけ信号波形を劣化させないようにしなければなりません。それには、PD における入力光の強さと出力電流の関係が一定であることが重要です。つまり、PD の入出力特性が線形性を持つ必要があります。しかし、APD は非線形的な入出力特性を持つため、400GbE への適用は困難ではないかと予想していました。」(吉松氏)

結果的にこれは杞憂だった。実際に APD-ROSA を作製して PAM4 信号を流して検証したところ、APD の非線形性が信号波形に与える悪影響はほとんどなかったからである。「調査を進めると、出力電流の平均値は非線形的な特性を示す一方、TIA の許容入力レベルまで入力光のパワーを大きくしても、出力電流の PAM4 波形の 0 ~ 3 レベルのバランスは崩れることはなく、悪影響が出ないことが分かりました。」(吉松氏)

APD-ROSA の受信特性を調査し 約 30km の伝送可能性を確認

400Gbps 用の APD-ROSA の研究開発は 2016 年 10 月までにひとまず終了し、図 1 のような構成と外観の 4 チャンネル APD-ROSA を開発した。これ 1 つで PAM4 信号を使った 200Gbps の通信に対応でき、400Gbps 用の光トランシーバには

2 つの APD-ROSA を入れることで対応する。「2 つ入れた場合にも、光トランシーバの最新規格 CFP8 で規定されるサイズに収まるように、APD-ROSA のサイズを抑えました。」(吉松氏)

作製した 4 チャンネル APD-ROSA の受信特性を調べた結果が図 2 である。

縦軸がビットエラーレートを表し、これが赤線で示した誤り訂正の限界値を超えると信号を正しく受信できなくなることを意味している。

開発した APD-ROSA の最小受信感度はマイナス 21.2dBm で、これは 400GBASE-LR8 が要求する最小受信感度に比べて 9.3dB も高感度である。つまり、400GBASE-LR8 よりも伝送距離を延ばせることになる。「400GBASE-LR8 の ROSA だけを今回開発したものに置き換えれば、約 30km の長距離伝送が可能になると推定できます。」(吉松氏)

400GbE で 10km 超の伝送が可

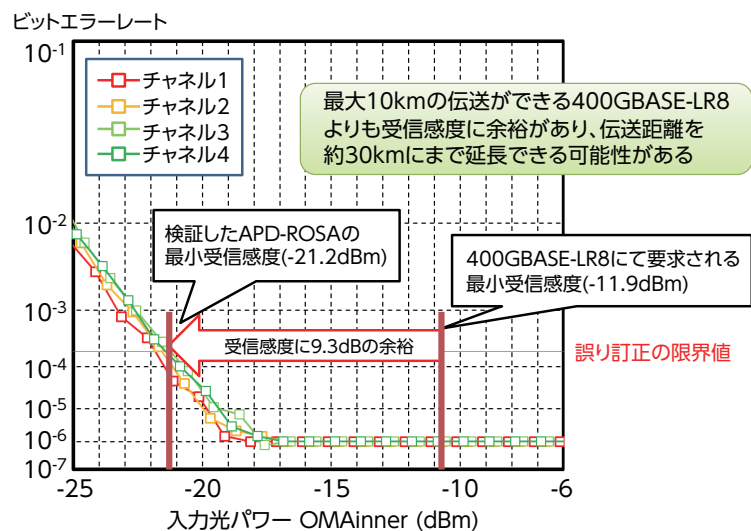


図2 4チャンネルAPD-ROSAの受信特性

能であることを示したのは非常に大きな成果と言える。「今回の開発は比較的スムーズに進められました。ただそれは、NTTがこれまで培った要素技術があってこそだと考えています。」(吉松氏)

近々、10km 超の伝送距離に対応する 400GbE 規格の標準化に向けた検討が始まる見通しである。そこでは、DIC が開発した APD-ROSA の性能をベースに議論が進められると予想されている。

今後は、単体で 400Gbps の通信に対応できる ROSA の開発に取り組んでいく考えだ。ボーレート(変調速度)を 2 倍にすれば 400Gbps に対応できるが、実現はそう簡単ではないという。「物理的な限界が近づいていることもあり、一筋縄ではいきません。実装方法を最適化して高周波特性を改善することで何とか実現できるのではないかとこの感触を得ています。」(吉松氏)