

100 / 200Gbps CFP2 デジタルコヒーレントトランシーバ

三重野光子*
Mitsuko Mieno
新宅宏彰†
Hiroaki Shintaku
林 周作‡
Shusaku Hayashi

斧原聖史§
Kiyoshi Onohara
高橋啓介†
Keisuke Takahashi

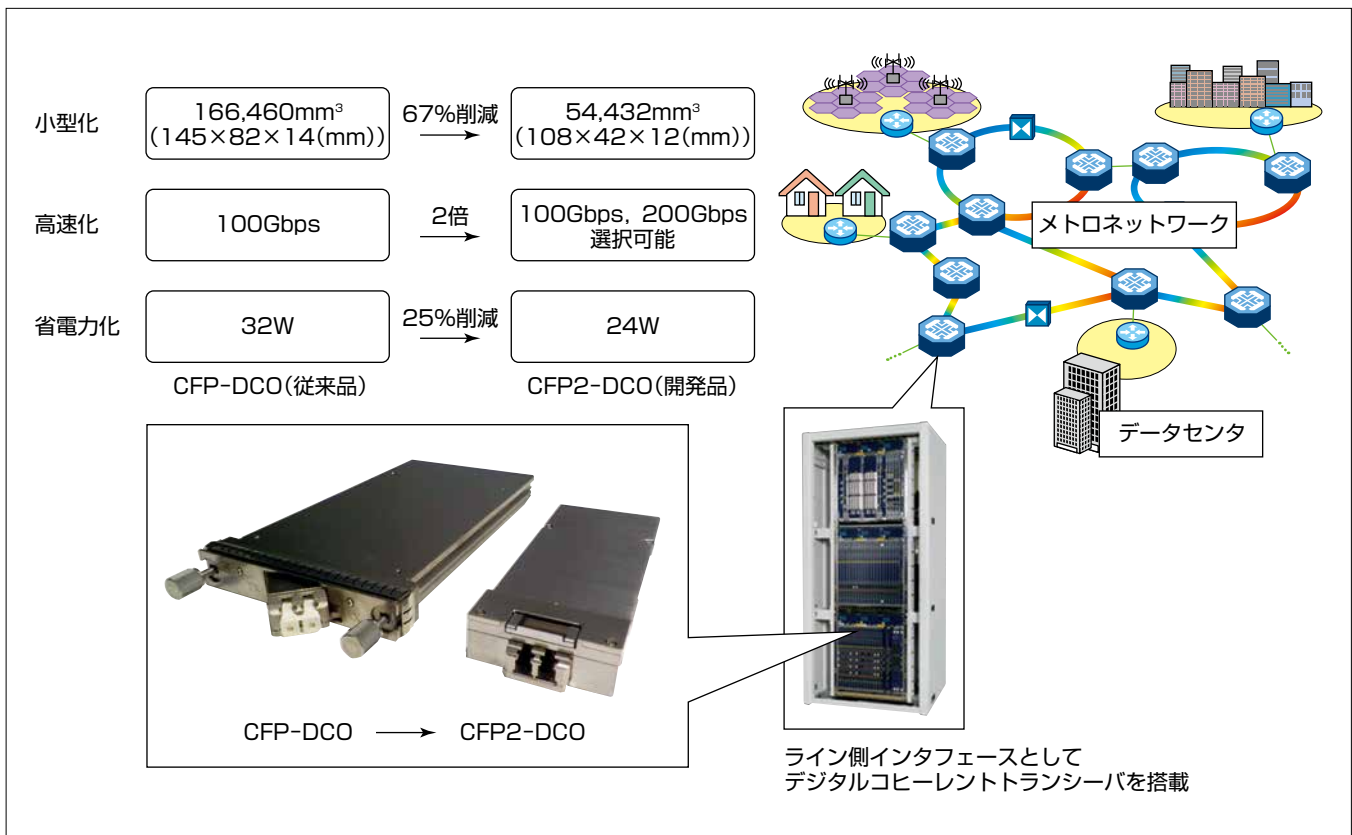
100/200Gbps CFP2 Digital Coherent Transceiver

要 旨

基幹系光通信システムでは、長距離大容量化・高機能化に加えて運用コストを低減するために高密度化・低消費電力化の要求が高まっている。これらの市場要求に応えるため、三菱電機はCFP MSA (Centum gigabit Form-factor Pluggable Multi-Source Agreement) 準拠版100/200Gbps CFP2-DCO (Digital Coherent Optics) トランシーバを開発した。小型光集積デバイスと最新のプロセスルールを適用したデジタルコヒーレントLSIを適用し、高密度実装技術と高効率放熱技術の組合せによって、CFP2パッケージ(108×42×12(mm))に実装し、従来品であるCFP-DCOトランシーバと比較して体積比で67%削減を

実現した。伝送速度は100Gbpsと200Gbpsに対応し、光・電気デバイスの高集積化と適応型電圧制御(Adaptive Voltage Scaling)技術によって、消費電力24W以下(従来品比25%削減)を達成した。

高性能の誤り訂正機能として低密度パリティ検査符号を採用し、光信号の雑音耐力を従来品比で1.5dB改善した。動作モードの切替えでメトロネットワーク向けに最大600km伝送が可能であり、データセンタ向けにも適用可能である。また、高密度波長多重システムの周波数グリッドを12.5GHz単位で設定可能にして、周波数利用効率改善への貢献が期待できる。



CFP-DCO / CFP2-DCO トランシーバ

当社は2016年にデジタルコヒーレント方式を採用したCFP MSA準拠版100Gbps CFP-DCOトランシーバを開発した。今回、更なる高密度化、大容量化、低消費電力化の市場要求に応えるため、100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバを開発し、CFP-DCOトランシーバと比較して体積比67%削減、消費電力25%減を実現した。この製品はメトロネットワークだけでなく、データセンタでも、今後のトラフィック需要増に貢献する。

1. ま え が き

基幹系光通信システムでは、長距離大容量化・高機能化に加えて運用コストを低減するために高密度化・低消費電力化の要求が高まっている。これらの市場要求に応えるため、データ信号を光位相変調し、光ファイバを介して伝送するデジタルコヒーレントトランシーバの小型化・低消費電力化が進んでいる。プラグブル型の光トランシーバ規格のCFP MSA⁽¹⁾は、光トランシーバベンダーが市場への安定供給を目的にパッケージサイズやピン配置等の仕様を取り決めている。クライアント側インタフェースのデファクト標準として広く普及しているCFPだが、近年はライン側インタフェースとしてデジタルコヒーレントLSIを搭載したCFPトランシーバの開発が進められている。クライアント側インタフェースのCFPトランシーバと区別するためコヒーレントCFP又はCFP-DCOトランシーバと呼ばれている。大きさや仕様によってCFPやCFP2, CFP4, CFP8と分類されている。

今回、伝送速度は100Gbpsと200Gbpsを選択可能で、低消費電力のデジタルコヒーレントトランシーバをCFP2⁽²⁾のパッケージで実現し、良好な送受信特性が得られた。

2. 100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバの主要諸元と機能

2.1 主要諸元

開発した100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバの外観を図1に、主要諸元を表1に示す。最新のプロセスルールを適用したデジタルコヒーレントLSIによって、高性能の誤り訂正機能(低密度パリティ検査符号)を実現し、光信号雑音耐力を1.5dB改善した。伝送距離はメトロネットワークに適用可能な600kmを達成した。また、光出力波長は1,529~1,567nmの範囲に対応し、周波数利用効率を高めるため周波数グリッドを12.5GHz単位で設定可能にした。最小受光感度は-24dBmを確保し、光ファイバ増幅器が不要になる無再生中継伝送は90kmまで可能である。

消費電力は、光・電気デバイスの高集積化とデジタルコヒーレントLSIに対する適応型電圧制御技術によってCFP2-DCOのMSA規格である24W以下を達成した。

2.2 機能

開発したCFP2-DCOトランシーバは、デジタルコヒーレントLSI、波長可変光源、コヒーレント集積デバイス(Coherent Optical Sub Assembly : COSA)、光アンプ、PD(Photo Detector)、監視制御IC、電源ICから構成され

る(図2)。COSAは電気ドライバアンプ、光位相変調器とコヒーレント受信器を集積したデバイスであり(図3)、COSAを搭載することによって、従来の部品構成から面積比約74%削減できる。クライアント側の送信データ信号(OTL4.4準拠)は、デジタルコヒーレントLSIで誤り訂正符号が付与され、COSA内の電気ドライバアンプで増幅され、光位相変調器で水平偏波と垂直偏波にそれぞれ変調信号を生成す



図1. CFP2-DCOトランシーバ

表1. 主要諸元

項目	仕様	
動作ケース温度(°C)	0~70	
電源電圧(V)	3.3	
消費電力(W)	24	
光送信特性	伝送速度(Gbps)	111.81 223.62
	変調フォーマット	DP-QPSK DP-16QAM
	光出力波長(nm)	1,529~1,567
	光出力パワー(dBm)	-3.5~+3.0
	周波数グリッド(GHz)	12.5
	波長安定度(GHz)	±1.5
	EVM(%rms)	14
光受信特性	最小受光感度(dBm)	-24
	DGD耐力(ps)	150
	最大伝送距離(km)	600
電気種信号入出力特性	主信号インタフェース	OTL4.4
外形	寸法(W×L×H)(mm)	108×42×12
	光コネクタ	LC型

EVM : Error Vector Magnitude, DGD : Differential Group Delay, OTL : Optical channel Transport Lane

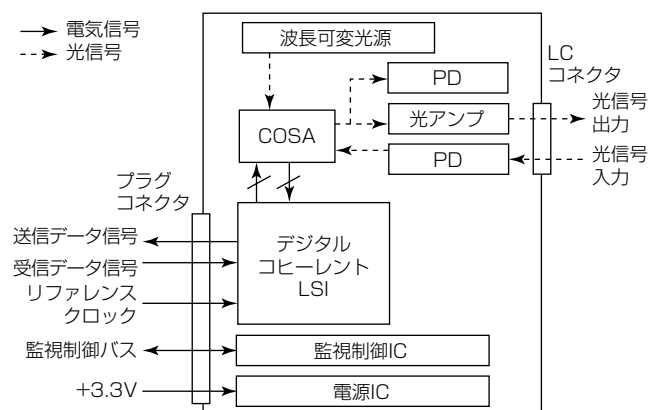


図2. CFP2-DCOトランシーバの機能ブロック図

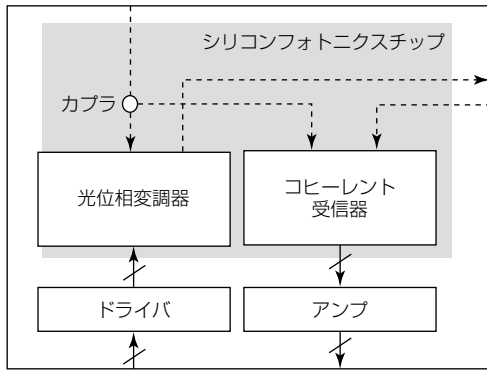


図3. COSAの機能ブロック図

る。変調フォーマットは、100Gbpsでは偏波多重四位相変調(Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying : DP-QPSK), 200Gbpsでは偏波多重16直交振幅変調(DP-16 Quadrature Amplitude Modulation : DP-16QAM)を適用する。変調した光信号は光アンプで増幅され、トランシーバから出力される。受信側は、COSA内のコヒーレント受信器で光信号を偏波ダイバーシチ受信し、デジタルコヒーレントLSIに入力する。デジタルコヒーレントLSIでは、高速A/D(Analog/Digital)変換部でデジタル信号に変換した後、デジタル信号処理によって、搬送波位相推定、偏波分離、波長分散補償及び誤り訂正復号を行う。リファレンスクロックは、デジタルコヒーレントトランシーバの位相同期回路に用いられ、デジタルコヒーレントトランシーバが搭載されるホストボードから供給される。監視制御ICでは、各コンポーネントの初期設定や状態監視を行う。送受信データ信号の符号誤り訂正数、受信Q値等の統計データ及び警報信号を処理し、監視制御バスを通じて、ホストボード内の監視制御ICと通信できる。

3. 100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバの技術

3.1 送信技術

3.1.1 変調制御技術

COSAは光位相変調器と電気ドライバアンプ、コヒーレント受信器を集積しており、トランシーバの信号品質は光位相変調器の制御によって大きく変わる。図4に示すとおり、マッシュツェンダ型の光位相変調器はI-ch, Q-ch, P-chの3chの位相を制御する必要がある。

従来のLN(ニオブ酸リチウム)変調器は導波路に電界を印加して位相を制御していたが、COSAはシリコンデバイスであるため、ヒーターを用いて導波路の温度を変化させて位相を制御する。そのため、温度変化よりも低速の数百Hzで制御する必要がある。今回使用したCOSAは各チャンネル

の位相制御用ヒーターが一つの構成であり、この構成ではI-ch又はQ-chの位相制御を行った際にP-chの位相関係も変動する。これに対応するため、P-chとI-ch(Q-ch)の調整を交互に行う制御方式を新規に開発し、高精度な位相変調を実現した⁽³⁾⁽⁴⁾。

図5はDP-QPSK変調信号の水平偏波成分と垂直偏波成分のコンステレーションマップを示している。光変調信号の品質はエラーベクトル振幅(EVM)で評価を行った。EVMは、復調信号が複素平面上にプロットされるコンステレーションマップの基準点からのベクトル差のスカラ量と基準ベクトルのスカラ量との比で定義される。この評価手法はコヒーレント受信によるデジタル信号処理が必要なため、厳密には送信側だけの信号品質を評価できない。このため、リファレンス受信器を用いて評価を行った。EVMは水平偏波成分及び垂直偏波成分の平均値12.841%rmsであり、良好な光信号品質が得られた。

3.1.2 200G変調技術

DP-QPSKからDP-16QAMに変調方式を変更することで、200Gbps CFP2-DCOトランシーバを実現した。DP-16QAMにすることで変調損失は大きくなるため、位相制御に用いる光出力モニタ用のフォトダイオード(PD)の高感度化が求められる。そこで、COSAの光位相変調器に内蔵されるPDでなく、トランシーバ出力モニタ用の高

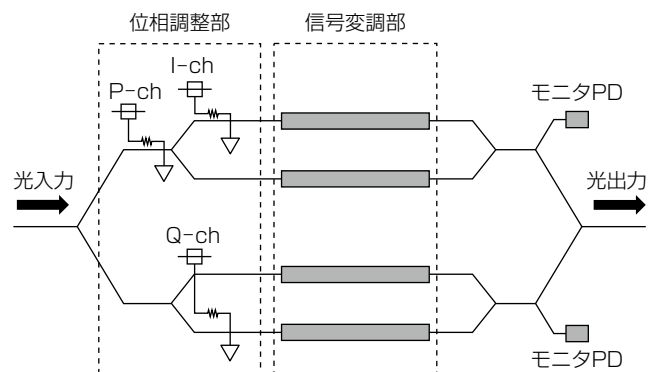


図4. 光位相変調器の構成

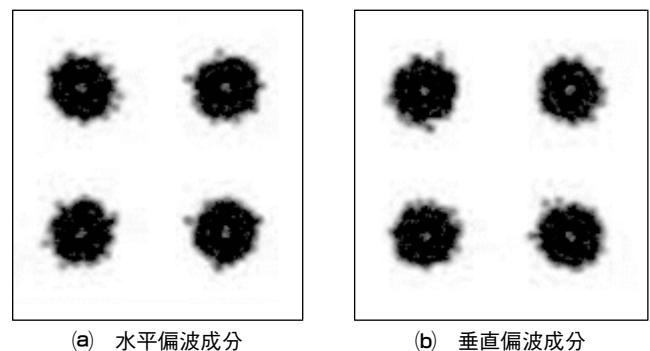


図5. DP-QPSK変調信号のコンステレーションマップ

感度な外部PDを用いて位相制御を行った。これによって、変調損失の増大による感度不足を解消でき、高精度な位相変調を行うことができ、EVMは水平偏波成分及び垂直偏波成分の平均値10.763%rmsであり、良好な光信号品質が得られた(図6)。

3.2 受信技術

光受信側に要求される性能は、光伝送路内に光増幅器がある場合とない場合で異なる。前者の場合、伝送距離は受信信号の符号誤り訂正限界での光信号対雑音強度比(OSNR)によって制限され、後者の場合は同条件での受信光平均強度によって制限される。今回開発したCFP2-DCOトランシーバは、メトロネットワーク向けとデータセンタ向けの用途があるため、それぞれの性能を評価した。このトランシーバでの受信Q値の符号誤り訂正限界は、軟判定誤り訂正機能有効時は6.2dB(誤り訂正後ビット誤り率： 10^{-15})であり、軟判定誤り訂正機能無効時は、8.4dB(同)である。メトロネットワーク向けには軟判定誤り訂正機能を有効にして、その誤り訂正限界での光信号対雑音強度比は12.5dBであった。また、データセンタ向けには軟判定誤り訂正機能を無効にして、波長1,548.5nm、環境温度25℃とした条件での受信光平均強度に対する符号誤り率特性を図7に示す。受信信号の符号誤り訂正限界での受信光平均強度が-27.9dBmであることを確認した。これは、光出力信号平均強度を0dBmとした場合、無再生中継伝送が90km以上可能であることを示す。

3.3 低消費電力化技術

CFP MSAで規定されているCFP2-DCOトランシーバの消費電力の最大値は24Wであり、従来のCFP-DCOトランシーバの32Wと比較して8W以上の削減が必要になる。そのため、デジタルコヒーレントトランシーバの各構成部品での低消費電力化が重要なポイントになる。CFP2-DCOトランシーバでは、従来トランシーバから採用しているデジタルコヒーレントLSIの適応型電圧制御技

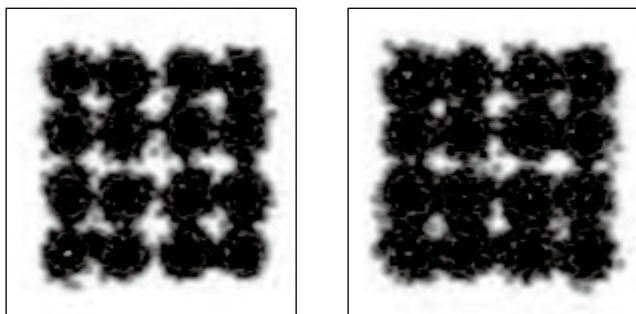


図6. DP-16QAM変調信号のコンステレーションマップ

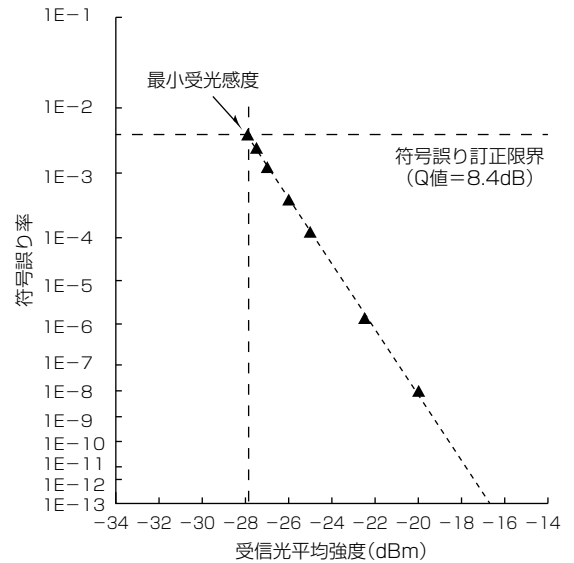


図7. 受光感度特性

術を適用した。適応型電圧制御とは、LSIの駆動電圧及びジャンクション温度をモニタし、動作条件に応じて最適な電圧を供給する技術である。LSI内の電圧及び温度モニタ結果から電圧制御部で電圧条件を算出する。デジタルコヒーレントLSIは、起動時に各機能ブロックを初期設定する際に、急激な消費電力上昇に伴う電圧降下が生じるため、運用時よりも高い電圧を供給する必要がある。このため、適応型電圧制御による消費電力抑圧効果は非常に高い。

この技術の適用によって、メトロネットワーク向けは24W以下、データセンタ向けでは22W以下の消費電力を達成した。また、伝送距離1,000km以上の更なる長距離ネットワーク向けでも28W以下を実現した。

3.4 高密度実装技術

3.4.1 実装技術

CFP2(108×42×12(mm))はCFP(145×82×14(mm))から体積比で約67%小型化する必要がある。その実現には光・電気部品の小型化だけでなく、プリント基板上、及び筐体(きょうたい)内部空間の部品実装も高密度化する必要があった。それぞれの実装密度の比較を表2に示す。

CFP-DCO等の従来の設計手法は、プリント基板上の部品配置を設計後、筐体内部の部品配置・配線等の空間設計を実施していた。この開発では筐体内部の空間をより高密度化するために、三次元で部品配置と空間設計を同時に

表2. 実装密度の比較

	実装密度		
	CFP-DCO	CFP2-DCO	比
プリント基板上	49.8%	59.1%	1.2倍
筐体内部空間	25.2%	36.9%	1.5倍

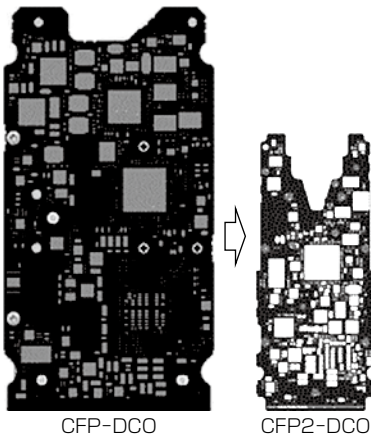


図8. プリント基板上的実装密度比較

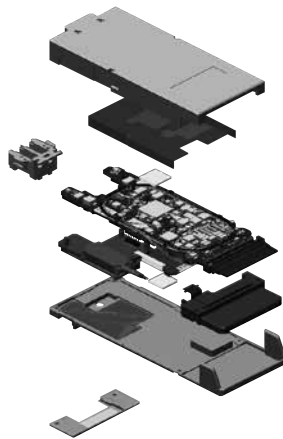


図9. CFP2-DCO トランシーバの構成

行う設計手法を適用した。

三次元設計の適用によって、プリント基板上的部品配置に関する制約条件が緩和可能になり、プリント基板上的実装密度がCFP-DCOの1.2倍に向上した。三次元設計では、部品配置のほか、光ファイバルーティング設計も並行して実施した。光ファイバは所定の曲げ半径以下になると、光パワーの損失が生じるため、曲げ半径の確保が筐体内の空間を逼迫(ひっばく)させる要因になっていた。この課題を解決するため、波長可変光源やデジタルコヒーレントLSIの搭載面と異なる面に光ファイバをルーティングするため、プリント基板の形状を最適化した。これらの施策でCFP-DCOから内部空間比1.5倍の高密度化を実現した。図8にCFP-DCOとCFP2-DCOのプリント基板上的実装密度比較を、図9にCFP2-DCOトランシーバの構成を示す。

3.4.2 放熱技術

CFP2サイズへの小型化によって、体積当たりの発熱密度が上昇し、各使用部品が適切に動作するための放熱設計は極めて重要になる。特に100Gbpsを超える超高速信号のデジタルコヒーレント処理は、最新のプロセスルールが適用されたLSIでもトランシーバ全体の消費電力の約半分を占める。そのため、精密な熱解析で周辺回路への影響を最小化する部品配置を行い、筐体表面に熱を効率よく伝導する必要がある。発熱量が大きいLSIや光部品は筐体への接地を数 μm 単位で管理し、十分な放熱効果を得た。

プリント基板上的放熱は熱流体解析ツールで、プリント基板上的発熱部品をモデル化し、熱解析を実施した。プリント基板表面も利用した熱伝導設計によって、部品配置を最適化して各部品温度を規定値内に収めた。

図10に動作ケース温度70°Cでのプリント基板の熱解析結果を示す。プリント基板上的温度差分は最大20°C以下で、設計どおりの放熱効果が得られていることを確認した。

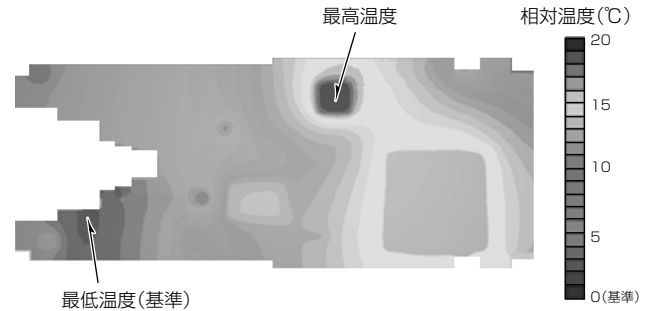


図10. プリント基板の熱解析結果

4. 将来に向けて

デジタルコヒーレントトランシーバは、LSIの微細化及び低消費電力化の恩恵を受けて、従来主流になっていたメトロネットワーク向けからデータセンタ向けに需要が移りつつあり、今後もこの傾向は続くと思われる。また、日本では2020年に第5世代移動通信システム(5G)の本格サービスも開始され、2030年頃に実用化が見込まれるBeyond 5G/6Gシステムのモバイルフロントホールの候補としてコヒーレント技術の採用が検討されている。

最後に、デジタルコヒーレントLSIの小型化・省電力化には、LSIの微細化技術だけでなく、光ファイバの波長分散補償、偏波分離、位相推定、誤り訂正等のデジタル回路削減の寄与も重要であることを述べておきたい。これら技術の発展とともにデジタルコヒーレントトランシーバの更なる小型・省電力化が進むことが望まれる。

5. むすび

CFP MSA仕様に準拠した100/200Gbps CFP2-DCOトランシーバを開発した。従来品のCFP-DCOトランシーバから体積比67%削減の高密度実装を実現し、最大伝送速度を200Gbpsまで高速化した。光信号送信部、光信号受信部共に設計仕様を満足する良好な特性を得ており、筐体温度70°Cの環境下で24W以下の低消費電力化も実現した。この開発成果が、将来の光通信ネットワークの大容量化・高密度化に寄与することを期待する。

参考文献

- (1) CFP MSA : Management Interface Specification 100/40Gigabit Transceiver Package Multi-Source Agreement Ver.2.6 (r06a) (2017)
- (2) CFP MSA : CFP2 Hardware Specification Rev.1.0 (2013)
- (3) Ishikura, N., et al. : Transmission Characteristics of 32-Gbaud PDM IQ Monolithic Silicon Modulator Operating with 2-VPPD Drive Voltage, ECOC2016, W2.E4 (2016)
- (4) Takiguchi, T., et al. : 40G RZ-DQPSK Transmitter Monolithically Integrated with Tunable DFB Laser Array and Mach-Zehnder Modulators, OFC2011, OMU3 (2011)