

CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバ

斧原聖史* 石井健二***
 飯島理** 備海正嗣***
 大浦崇靖**

100Gbps Digital Coherent Transceiver Compliant with CFP Multi-Source Agreement

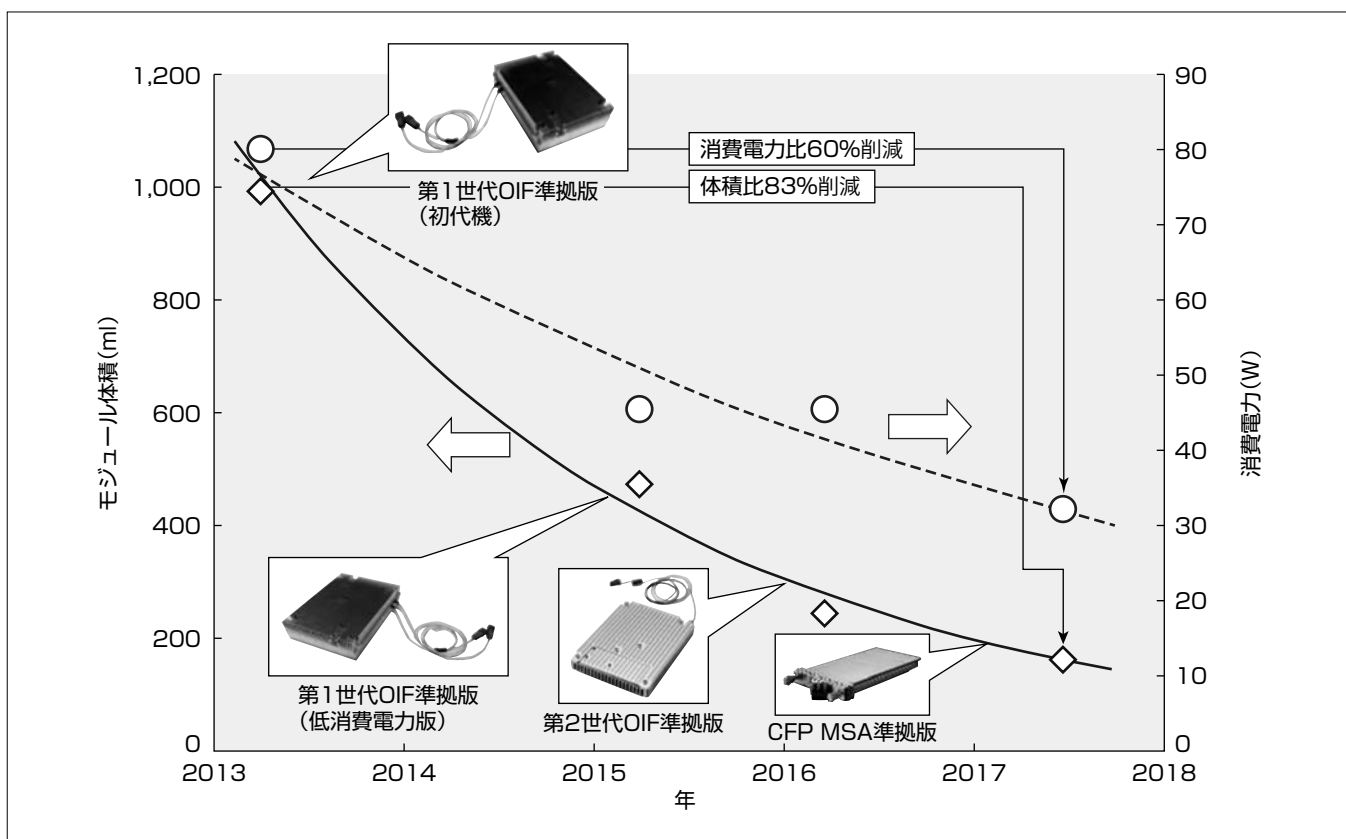
Kiyoshi Onohara, Osamu Iijima, Takayasu Oura, Kenji Ishii, Masashi Binkai

要旨

基幹系光通信システムでは、長距離大容量・高機能化に加えて運用コストを低減するために高密度・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、CFP MSA(Centum gigabit Form-factor Pluggable Multi-Source Agreement)準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバを開発した。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を新規採用し、光部品配置及び高速信号配線の最適化、高効率放熱技術によって、CFPパッケージ(145×82×14(mm))に実装した。従来製品である第1世代OIF(Optical Internetworking

Forum)準拠版(初代機)と比較して体積比で83%削減を実現した。また、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32W以下(初代機比で60%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初代機比で1.5dB改善した。伝送距離換算で1.4倍延伸化し、最大3,000km伝送が可能である。また、高密度波長多重システムの周波数グリッドを12.5GHz単位で設定可能とし、周波数利用効率改善への貢献が期待できる。



基幹系ネットワークを支える100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの変遷

三菱電機は2013年にデジタルコヒーレント方式を採用した100Gbps光トランシーバの第1世代OIF準拠版(初代機)を開発した。その後、小型・低消費電力化の市場要求によって第1世代OIF準拠版(低消費電力版)、第2世代OIF準拠版を市場投入してきた。今回開発したCFP MSA準拠版は、初代機と比較して消費電力比60%削減、体積比83%削減を実現した。環境に配慮しつつ、今後の通信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・高機能化に加えて運用コストを低減するために高密度・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・低消費電力化が進んでいる。光ネットワーク技術に関するフォーラム標準化団体であるOIFが100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの標準化⁽¹⁾を推進しており、これまで、第1世代光トランシーバ(5×7(in))、第2世代光トランシーバ(4×5(in))が標準化されている。一方、CFP MSA⁽²⁾⁽³⁾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たプラグ型の光トランシーバ規格であり、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。近年、LSIの微細化技術の進展によって、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おり、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(CFP-Digital Coherent Optics)トランシーバと呼ばれている。

2. CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの主要諸元と機能

2.1 主要諸元

開発したCFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレント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)⁽⁴⁾を実現し、光信号雑音耐力を1.5dB改善するとともに、最大伝送距離を従来比1.4倍に延伸した。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単位で設定可能とした。最小受光感度は、-30dBmを確保し、光ファイバ伝送路中に光ファイバ増幅器が不要となる無再生中継伝送が最大100km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⁽⁵⁾によってCFP MSAの規格である32W以下を達成した。

2.2 機能

機能ブロック図を図2に示す。デジタルコヒーレントトランシーバは、デジタルコヒーレントLSI、波長可変光源、光変調器、コヒーレント受信器、監視制御IC、電源ICから構成される。クライアント側の送信データ信号(OTL4.10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、マッハツェンダー型光変調器で、水平

偏波と垂直偏波にそれぞれ変調した偏波多重四位相変調信号を生成し、光信号として出力される。受信側は、コヒーレント受信器で光信号を偏波ダイバシティ受信し、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。このリファレンスクロックはOTL4.10信号のレーン速度の1/16又は1/64を選択可能である。

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



図1. CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバ

表1. 主要諸元

項目	仕様	備考	
動作ケース温度(°C)	0~70		
電源電圧(V)	3.3		
消費電力(W)	32		
光送信特性	光出力パワー(dBm)	0	
	光出力波長(nm)	1,529~1,567	C帯
	周波数グリッド(GHz)	12.5	
	波長安定度(GHz)	±1.5	
光受信特性	EVM(%rms)	12	
	最小受光感度(dBm)	-30	
	DGD耐力(ps)	150	0.1dBペナルティ
電気主信号入出力特性	最大伝送距離(km)	3,000	
	主信号インタフェース	OTL4.10	
外形	寸法(W×L×H)(mm)	145×82×14	
	光コネクタ	LC型	

EVM: Error Vector Magnitude, DGD: Differential Group Delay

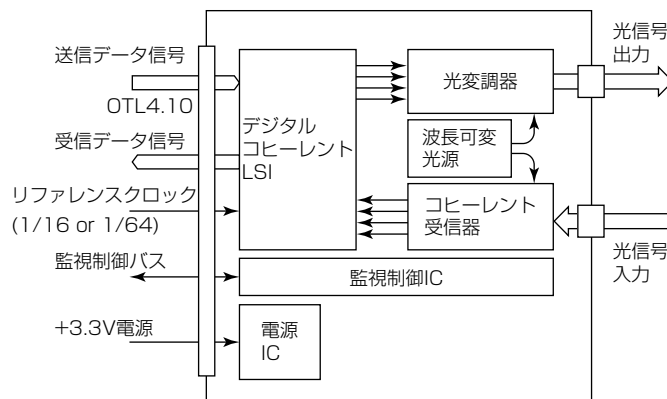


図2. 機能ブロック図

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、HOSTボード内の監視制御ICと通信することができる。

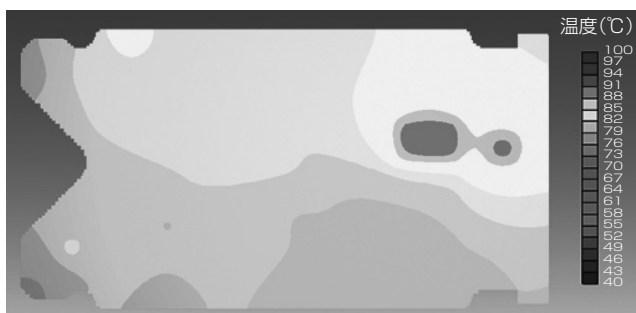
3. CFP MSA準拠版100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバの性能

3.1 プリント基板の熱設計

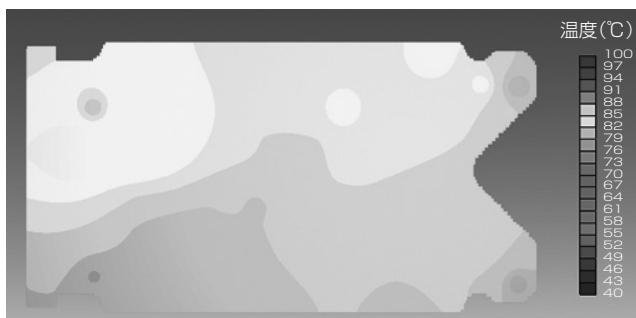
デジタルコヒーレントトランシーバの小型化で、プリント基板の熱設計は重要である。特に、100Gbpsを超える超高速信号に対するデジタルコヒーレント処理は、最新プロセスルールを用いたLSIでもトランシーバ全体の消費電力の約半分を占めるため、精密な熱解析によって周辺回路への影響を最小限にとどめる部品配置を行う必要がある。今回、熱流体解析ツールによってプリント基板上の発熱部品をモデル化し、プリント基板の熱解析を実施した。図3に筐体(きょうたい)温度70℃におけるプリント基板の部品面、はんだ面の温度分布を示す。発熱部品の実装が多い部品面の温度が高いため筐体への熱伝導経路を設け、部品配置を適切に行うことで、プリント基板の表面温度が最大で90℃以下となることを確認した。

3.2 消費電力特性

CFP MSAで規定されている消費電力の最大値は32Wであり、従来のOIF準拠版と比較して10W以上の削減が必要となる。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となる。ここでは、低消費電力化技術の1つとして、デジタルコヒーレントLSIでの適応型電圧制御技術について述べる。



(a) 部品面



(b) はんだ面

図3. プリント基板の温度分布

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。図4に適応型電圧制御技術の構成を示す。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と電源ICとは電源管理バス(PMBus)で接続されており、電圧制御部で算出した設定電圧結果を電源ICに通知し、電源ICは通知された電圧をデジタルコヒーレントLSIに供給する。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。

図5に適応型電圧制御技術によるデジタルコヒーレントLSIへの供給電圧に対するデジタルコヒーレントトランシーバの消費電力の測定結果を示す。筐体温度70℃の条件で測定した。適応型電圧制御技術によってLSIへの供給電圧を600mV以下とした場合、CFP MSAの規定値である32W以下となることを確認した。

3.3 光信号送信部

100Gbpsを超える超高速な光位相変調信号を扱うデジタルコヒーレントトランシーバで、プリント基板上の高速電気信号配線間の相互干渉や、マッハツェンダー型光変調器での光変調歪(ひず)みによって信号劣化が生じる。高速電気信号配線間の相互干渉による信号劣化を抑圧するため、4チャンネルの高速電気信号の配線幅、及び配線パターンの最適化を行った。図6にプリント基板の超高速電気信号配線の遠端クロストーク解析の結果(チャンネル1)を示す。

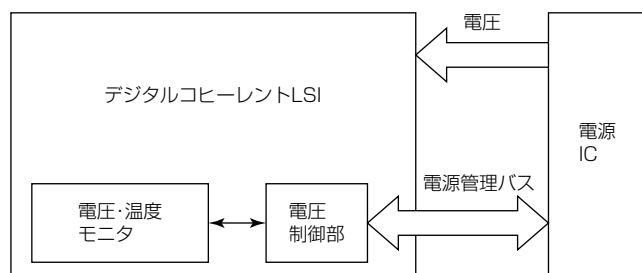


図4. 適応型電圧制御技術の構成

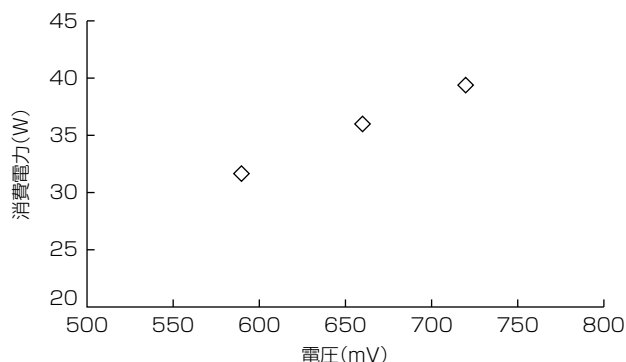


図5. デジタルコヒーレントLSIへの供給電圧と消費電力

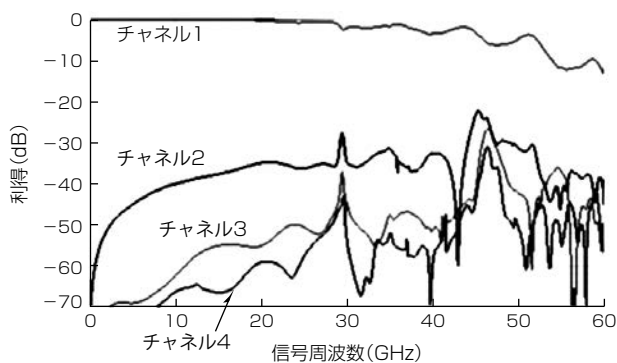


図6. 超高速電気信号配線クロストーク解析結果

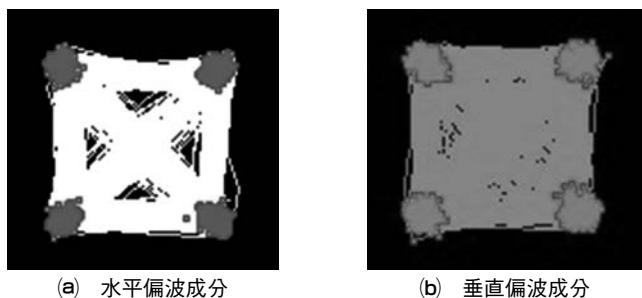


図7. コンステレーションマップ及びEVM

チャンネル1の信号成分に対するチャンネル2～4からのクロストークが、15GHzで-35dB以下となることを確認した。

また、光変調歪みについては、エラーベクトル振幅(EVM)の評価を行った。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ール量と基準ベクトルのスカラール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(Keysight N4391A)を用いて評価を行った。図7に光信号のコンステレーションマップ及びEVMを示す。EVMは水平偏波成分及び垂直偏波成分の平均値11.387% rmsが得られ、良好な光信号品質が得られた。

3.4 光信号受信部

光受信側では、符号誤り訂正限界における受信光平均強度が重要な性能指標となる。これを最小受光感度と定義する。今回開発したデジタルコヒーレントトランシーバでの符号誤り訂正限界の受信Q値は、6.2dB(誤り訂正後ビット誤り率： 10^{-15})であり、符号誤り率は 2×10^{-2} に相当する。図8に波長1,529nm、環境温度25℃での受信光平均強度に対する符号誤り率特性を示す。受信信号の符号誤り訂正

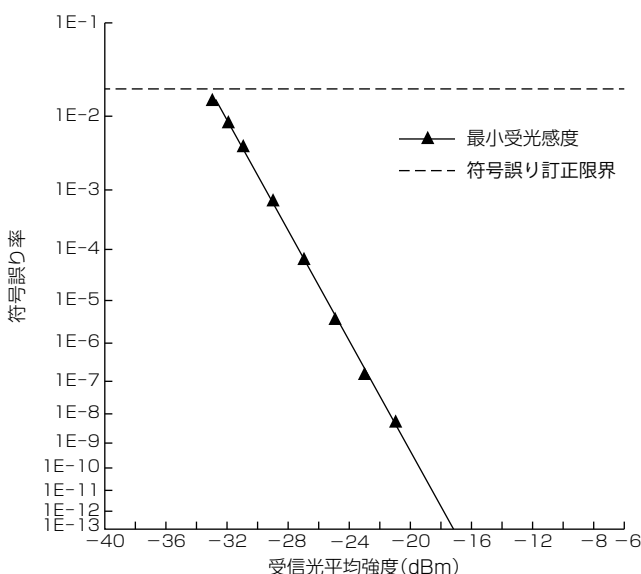


図8. 受光感度特性

限界での受信光平均強度が、-30dBm以下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、光ファイバ伝送路中に光ファイバ増幅器が不要となる無再生中継伝送が最大100kmまで可能であることを示す。

4. むすび

CFP MSA仕様に準拠した100Gbpsデジタルコヒーレントトランシーバを開発した。光信号送信部、光信号受信部ともに設計仕様を満足する良好な特性を示し、筐体温度70℃での環境下で32W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・高密度化に寄与することを期待する。

この開発の一部は、総務省委託研究“巨大データ流通を支える次世代光ネットワーク技術の研究開発”の成果である。

参考文献

- (1) OIF MSA : Implementation agreement for 100G long-haul DWDM transmission module-Electromechanical(MSA-100GLH) (2011)
- (2) CFP MSA : CFP hardware specification Rev.1.4 (2010)
- (3) CFP MSA : Management interface specification Ver.2.4(R06b) (2015)
- (4) Miyata, Y., et al. : Performance Improvement of a Triple-Concatenated FEC by a UEP-BCH Product Code for 100Gb/s Optical Transport Networks, Proc. OECC/PS2013, ThR2-2 (2013)
- (5) Chandrakasan, A. P., et al. : Low-power CMOS digital design, IEEE J. Solid-State Circ., 27, No.4, 473~483 (1992)