

10 Gbps バーストモード CR と光パケットランシーバ — 50 ps で同期するクロック再生技術とその応用 —

10-Gbps Burst Mode CR and Optical Packet Transceiver —50-ps Lock-in Clock Recovery and Its Application—

菅原 寛^{*1} 井澤 敏泰^{*1}
SUGAWARA Hiroshi IZAWA Toshiyasu
岩渕 直希^{*1} 伊藤 直樹^{*1}
IWABUCHI Naoki ITO Naoki

同期引き込み時間50 ps(10 Gbpsデータの1/2 bit相当)で動作する高速バーストモードクロック再生IC(Burst mode clock recovery : Burst CR)を開発した。また、このBurst CRを組み込んだ光パケットの送受信機能を持つ光パケットランシーバを開発した。これらは、光パケットネットワークや10 G-PON(Passive Optical Network)などの次世代光通信において、正確な通信と安定した動作のための重要な技術であり、次世代光通信の早期実用化に大きく貢献することが期待される。

We have developed a high-speed burst mode clock recovery (Burst CR) IC operating on a lock-in time of 50 ps, i.e. a half bit of 10-Gbps data, and have developed an optical packet transceiver which incorporates the Burst CR. These are based on indispensable technologies for accurate communications and stable operations in next-generation optical networks such as optical packet networks and 10 G-PON (Passive Optical Network), and will greatly contribute to earlier implementation of such optical networks.

1. はじめに

近年のインターネットでは、ブロードバンドの急速な普及により、動画配信などの大容量のデータを含むコンテンツが増加している。そのため、インターネットトラフィックは急増し、ネットワークの高速化が課題となっている。

一方、データのデジタル化や大容量化に伴い、放送局などでも高速なネットワークの導入が検討されている。また、HPC(High Performance Computing)では、ノードの高性能化により、ノード間通信を担う高速なネットワークの必要性が増している。このようなネットワークでの適用を目的とし、中継ノードルーターで光-電気変換(O/E変換)を行わず、光を光のままスイッチする“光パケットネットワーク”が、スケーラビリティやレイテンシなどで有利とされ、研究が行われている。

これらの通信はデータを小さな単位に分割して送受信するパケット通信であり、一つ一つのパケットは不連続

で非同期なバーストデータとなっている。安定した通信を行うには、バーストデータからのクロック再生が重要である。また、バーストデータを受信してからクロックがデータと同期するまでに要する時間(同期引き込み時間)は、有効な通信ができない無駄時間であり、次世代光通信においては、より短い同期引き込み時間が要求される。

本稿で示す当社が開発したバーストモードクロック再生IC(Burst mode clock recovery IC : 以下Burst CRと略称)は、10 Gbpsの高速通信に対応し、同期引き込み時間はデータの1/2 bitに相当する50 psとなっており、高速通信において高い伝送効率を得ることができる。また、このBurst CRを組み込み、バーストデータの送受信や300pin MSA(Multi-Source Agreement)規格に準拠した低速側電気インタフェースによる上位システムとの接続など、次世代光通信の開発に必要な機能を持つ光パケットランシーバも開発したので、併せて報告する。

2. 光パケット通信の必要性

パケット通信は、LAN(Local Area Network)やインターネットなどで広く利用されている通信方式である。1本の回線を複数のノードで共有でき、2点間の通信で回線が

^{*1} フォトニクス事業部 第2技術部

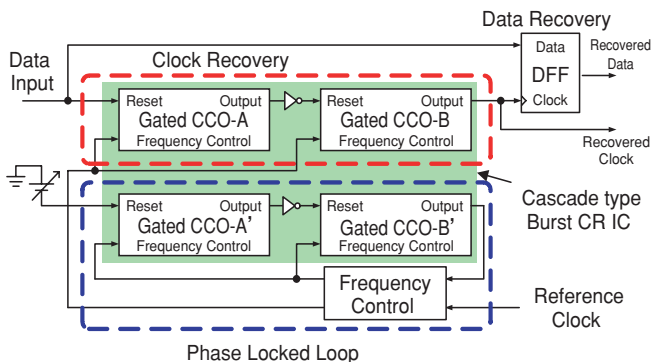


図1 カスケードタイプ Burst CR の構成

占有されることが無く、回線の運用効率が高い経済的な通信である。またノードの拡張などにも柔軟に対応できる方式である。

現在は、コスト面からメタルケーブルを使った電気での通信が主流となっているが、10 Gbps以上の高速通信では、通信距離などの問題から光での伝送が望まれている。しかしながら、ノードやルータでO/E変換を行うと、レイテンシや消費電力を増加させてしまう。

光パケットネットワークはこの問題を解決する。光パケットネットワークは、光を光のままパケット毎にスイッチングを行う方式でO/E変換を介さないため、レイテンシは小さく、消費電力を削減することができる。

光パケットネットワークは、次世代のHPCノード間通信や放送局内通信などで需要が見込まれる。家庭と電話局を光ファイバで結びインターネット接続を提供するネットワーク“PON(Passive Optical Network)”でも、光パケットを利用した通信が行われている。PONは1本のファイバを光カプラで分岐し、複数の家庭に接続する方式である。上り通信では、データはパケットに分割され、個別に電話局へ送信される。各家庭と電話局の間の伝送は非同期となっており、電話局では非同期なバーストデータを受信する必要がある。

トラフィックの増加に対応するべく、10 Gbpsの帯域のPON(10 G-PON)の研究が行われているが、バーストデータの受信技術が課題となっている。これには、低消費電力であることや安定した動作、伝送効率を高くするために、再生クロックの高速な同期引き込みが求められており、当社が開発したBurst CRとパケットランシーバはその実用化に貢献できる。

3. Burst CR

3.1 Burst CR の特長

我々は、2つの発振器を直列に接続して再生クロックを得る“カスケード”タイプのBurst CRを開発した。本設計では全回路を差動形式で構成し、温度や電源依存性を

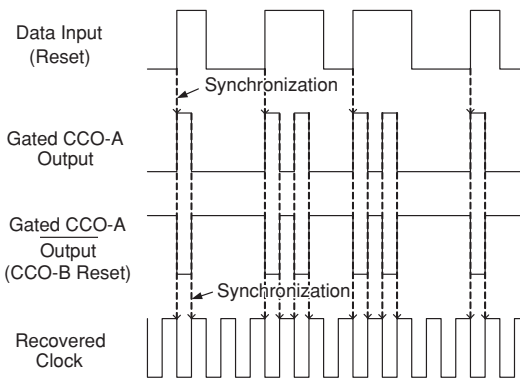


図2 カスケードタイプ Burst CR のタイミングチャート

低くすることができた。また、入力データの立ち上がり・立ち下りで各発振器をリセットすることにより、高速な同期引き込みを実現した。従来技術と比較して回路規模は小さく、低消費電力となっている。

3.2 Burst CR の構成

図1に、カスケードタイプ Burst CRのブロックダイヤグラムを示す。Gated CCO(Current-Controlled Oscillator)と示した発振器は、差動インバータで構成されたリングオシレータである。リセット機能はリング中に構成されたAND回路から与えられ、“Low”が入力された時に発振が停止する。前段の発振器(CCO-A)の反転出力を、後段の発振器(CCO-B)のリセット入力に接続する。CCO-Bの出力は再生クロックとなる。一方、再生クロックでDFF(Delay Flip-Flop)を動作させることによって再生データを得る。

各発振器はカレントミラー回路で電流が一定に保たれており、これを調整することにより発振周波数を制御する。発振器CCO-A/CCO-Bの近傍にはPLL(Phase Locked Loop)を構成するための同じ特性を持つ発振器CCO-A' / CCO-B'を配置し、電源や温度などの条件が変化しても、発振周波数を一定に保つ構成とした。

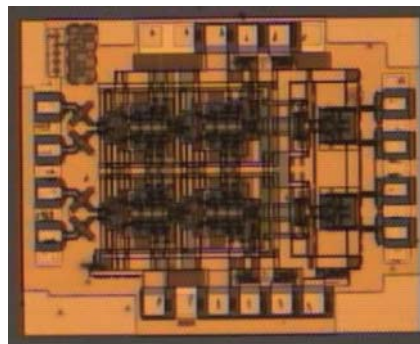


図3 カスケードタイプ Burst CR のチップ写真

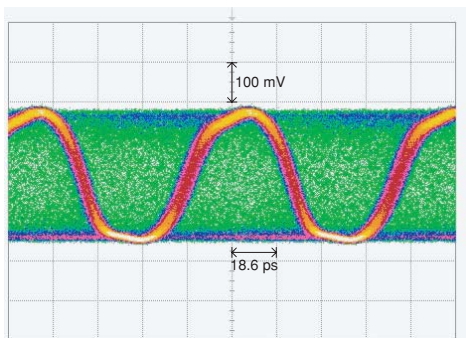


図4 バーストデータ受信時の再生クロック波形

3.3 動作原理

図2に、本装置のタイミングチャートを示す。

入力データが“High”になるとCCO-Aのリセット入力も“High”になり、発振するためCCO-Aの出力は“High”になる。一方、CCO-Bのリセット入力には、CCO-Aの反転出力が接続されているため、リセット入力は“Low”となり発振が停止する。

入力の状態が“High”に維持されている間は、CCO-Aは発振する。この間、CCO-Bのリセット入力にはCCO-Aの発振出力が反転入力されるため、リセット入力が“High”になるとCCO-Bは発振状態になり“High”を出力し、リセット入力が“Low”になると停止状態になるため“Low”を出力する。そのため、CCO-Bは、CCO-Aが発振状態の間は、CCO-Aに同期した出力を返すことになる。

入力データが“Low”に変化した場合は、CCO-Aはリセット入力が“Low”となるため停止状態となり、出力は“Low”となる。CCO-Bのリセット入力にはCCO-Aの出力が反転入力されるため、CCO-Bはリセット入力が“High”となり、発振するためクロックを出力する。

このようにして、本装置は入力データに同期した休止のないクロックを再生することができ、バーストデータが入力された場合でも、高速に入力データに同期したクロックを出力することが可能になる。

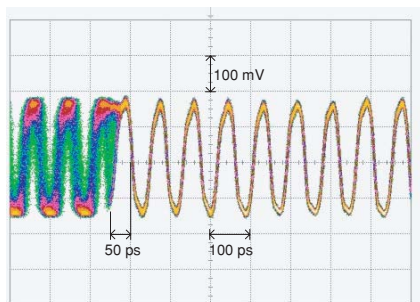


図5 バーストデータ受信時の再生クロック波形
(データ先頭部)

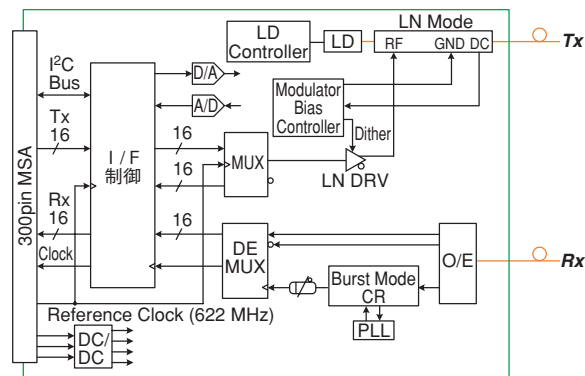


図6 光パケットランシーバの構成

3.4 開発した Burst CR の評価と仕様

図3に、カスケードタイプBurst CRのチップ写真を示す。チップサイズは2 mm × 1.6 mm、電源電圧は-3.3 V、消費電力は1.2 W程度である。プロセスは、化合物半導体材料がInP、プロセスルールは2 μmで、半導体デバイスとしてはヘテロバイポーラトランジスタを用いた⁽¹⁾。

図4に、入力データをビットレート 11.5 Gbps、PRBS (Pseudo-Random Bit Sequence)長 $2^{15}-1$ 、データ長2.5 μs、ギャップ長(バーストデータの無信号時間)348 nsとした時の再生クロックを示す。再生クロック波形の背後に見えている部分があるが、これはデータのないギャップ部で再生クロックがフリーランクロックとなり、オシロスコープのトリガと同期しないためである。また、図5に、パターン先頭部での再生クロックの状態を示す。再生クロックはパケットデータ先頭から、データの1/2 bitに相当する50 psで同期が引き込まれているのが分かる。本設計での50 psというのは、光スイッチの切り替え時間などを考慮しても十分短い時間であり、ネットワークの帯域を最大限に利用できる性能を有していると言える。

4. 光パケットランシーバ

4.1 光パケットランシーバの特長

カスケードタイプBurst CR ICを搭載した光パケットランシーバを開発した。パケットデータの先頭に付加する受信データをクロックに同期させるための信号(プリアンプル)を必要とせず、高速な同期引き込みが可能となることを特長とし、高い伝送効率を持つ。Burst CRとO/E変換部は一体化されたセラミックモジュールに収められており、システムの小型化に寄与している。一方、送信部は直流系で構成されており、長いギャップのバーストデータを出力することができる。上位システムとは300pin MSAコネクタで接続され、電気インタフェースはOIF(Optical Internetworking Forum)SFI-4規格を採用している。また、I²Cバスを利用し、DAC(Digital to Analog Converter)制御情報や内部情報を上位システム等と通

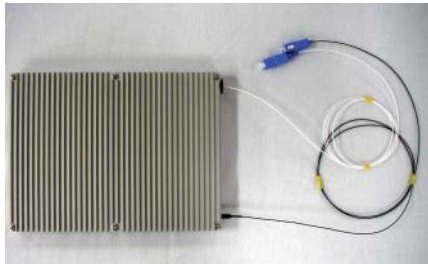


図7 光パケットトランシーバ外観

信する機能を持っている。

4.2 光パケットトランシーバの構成

図6に、光パケットトランシーバの構成図を示す。

受信部はO/E変換、Burst CR、DEMUX (Demultiplexer)で構成した。受信光信号はO/E変換で電気信号に変換され、Burst CRでクロック再生される。DEMUXは再生したクロックを用い、データ再生と多重化されたデータの分離を行う。

送信部は、MUX (Multiplexer)とLN (Lithium Niobate) 直流ドライバとLN変調器で構成される。MUXで多重化されたデータは、直流LNドライバとLN変調器から成る電気-光(E/O)変換部より出力される。

他に、300pin MSAコネクタとI/F制御回路、DACや内部情報を、I²Cバスを介して制御する回路等が実装されている。

4.3 開発した光パケットトランシーバの評価と仕様

図7に、光パケットトランシーバの外観を示す。本体サイズは200×150×19 mmである。

評価試験は、電気ループバックにより行った。光パケットトランシーバで受信した光信号を、電気を受信側から送信側に折り返し光出力し、この信号をO/E変換し、エラーレートや波形品位を測定した。

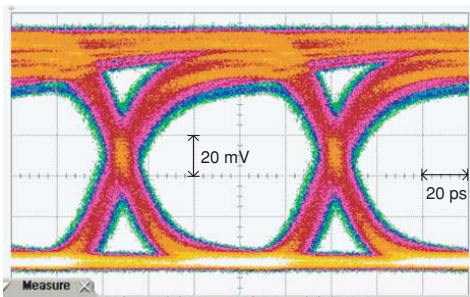


図8 光パケットトランシーバの出力波形 (電気ループバック)

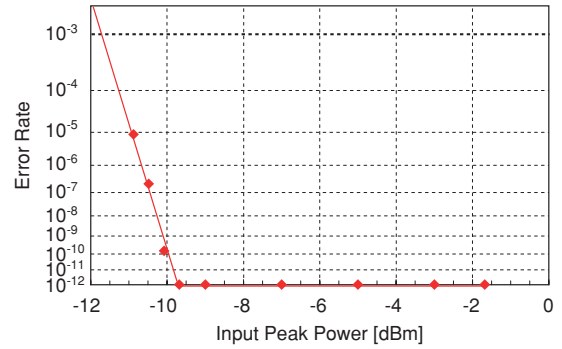


図9 光パケットトランシーバのBER特性

図8に、環境温度25℃、入力信号ビットレート10.72 Gbps、PRBS長 $2^{15}-1$ 、データ長3 μs、ギャップ長18.7 ns、入力パワー-4 dBmの条件での出力波形を示す。Jitter (Root Mean Square : RMS)は3.6 ps、消光比は11.3 dBとなった。BER (Bit Error Rate)特性は、図9に示すようになり、ダイナミックレンジは8.0 dBとなった。

光パケットネットワークなどの長いギャップのバーストデータの送受信を行うシステムでは、データのギャップ部が直流であるため、データの周波数成分は非常に低い帯域まで伸びている。そのため、信号ラインをDC結合で構成する必要がある。また、伝送効率を重視するため、プリアンプを付加してパケット毎にアンプのゲインやオフセットをコントロールすることは望ましくない。そのため、ダイナミックレンジの確保が難しく技術課題の一つとなっているが、本システムでは、高感度のPD (Photo Diode)と差動入力Burst CRにより、8.0 dBと広いダイナミックレンジを得ることができた。

5. おわりに

高ビットレートのバーストデータからのクロック再生と高速な同期引き込みを特長とするBurst CRと、それを利用した光パケットトランシーバを開発した。低消費電力で小型な本システムは、省エネや運用コスト削減にも有利であり、次世代PON、スーパーコンピュータのノード間通信、放送局の館内ネットワーク、エンタープライズなど、近中距離の次世代光通信の実用化に貢献することができる。

今後は、さらに高速な40 Gbpsのビットレートへの対応と、光パケットトランシーバの小型化を進めていく。

参考文献

(1) 三浦明, 松浦裕之, 和田守夫, 八木原剛, 小高洋寿, 池澤克哉, “「光を測る, 操る」技術”, 横河技報, Vol. 49, No. 3, 2005, p. 35-46