注入同期による 40Gbit/s 光 RZ 信号のクロック抽出の検討

正員 青海 恵之* 正員 山下 育男*

A Study on Clock-Signal Extraction of a 40-Gbit/s Optical RZ Signal
Using an Injection Locking Circuit

Shigeyuki Seikai*, Member, Ikuo Yamashita*, Member

Clock signal extraction from 40-Gbit/s signals based on injection locking is demonstrated. The loop frequency is 20 GHz, which enables efficient frequency down conversion and system cost down. Basic characteristics of locking range, phase noise, and frequency response of the system are clarified. The system is applied to the 40-Gbit/s 400-km transmission experiment where error free operation is confirmed for 76 hours.

キーワード：クロック再生，注入同期，40Gbit/s，分周

Keywords: Clock recovery, Injection locking, 40Gbit/s, Down conversion

1. まえがき

高速大容量光伝送は 40Gbit/s の波長多重伝送が技術的には実用の段階に達し，伝送に必要な機器も入手可能な状況になってきた。高速光伝送では，クロック信号抽出は光受信装置の重要な構成要素であり，その出力にはビットレートの周波数の分周された周波数も必要となる。しかし，伝送装置はクロック抽出装置を含めて極めて高価であり，容易に入手可能とはいえない。40Gbit/s のクロック再生は，主として位相同期ループ (PLL) 方式が用いられているようである。筆者らも市販のデバイスを用いた PLL 方式によるクロック抽出を報告した⁽¹⁾⁽²⁾が，動作開始時に周波数引き込みが起こらない場合があることや，40GHz 帯のデバイスが必要となるため高価であるなどの難点があった。そこで注入同期方式を用いて周波数引き込みの問題を避け，また，20GHz 帯で動作可能なデバイスを用いて製作の低コスト化を図った 40Gbit/s 用のクロック信号抽出装置を試作し，実用上十分な特性を有することを確認した。

2. 回路構成

40Gbit/s から 10Gbit/s のクロック信号を得るための装置ブロック図を図 1 に示す。基本構成は，20GHz の注入同期発振ループである。入力 40Gbit/s 光リターンゼロ (RZ) 信号には 40GHz の周波数成分が含まれているので，20GHz 光信号への変換は光変調器の線形な動作で得られる。入力光信号を周波数が $2f (=40\text{GHz})$ で変調度 100% の正弦波とし，光変調器が周波数 f で駆動されているとすると，その出力の基本成分は式 (1) の R に比例する。 α, β は時間変動する信号の位相で，注入同期時には $\alpha = \beta$ となる。また β_0 は回路長によって決まる定数である。

図 1 クロック抽出装置の構成

Fig. 1. Schematic configuration of the system.

$$R = 1 + \cos\{2\pi 2f(t - \alpha)\} \cdot [1 + \cos\{2\pi 2f(t - \beta - \beta_0)\}] \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式の余弦関数の積の項から周波数 f の成分が現れるので，20GHz にダウンコンバートされた信号が得られる。

注入同期方式は古くから知られた方式であり，40Gbit/s の光 RZ 信号から 10Gbit/s を抽出する方法にも適用した報告がなされている⁽³⁾。しかし，文献 (3) では，光変調器を 10GHz で駆動しているために，式 (1) 右辺の第 2 の [] の中に高調波が要請される。すなわち，変調器の動作が正弦波とは大きくずれたものでなければならぬので，混合の効率が低くなってしまふ。これに対して，図 1 の構成では，光変調器を 20GHz で駆動しているため，40Gbit/s の光信号との混合は線形な動作であり，最大の効率が得られる。光変調器には，実用上は偏波無依存である必要があるので電界吸収型光変調器 (EA 変調器) を用いた。

ループの発振周波数が 20GHz であるので，10GHz の信号を得るために比較的安価に入手可能なロジック回路 (TFF) を用いている。TFF は入力電気信号振幅が 0.5V ~ 1V に対して 1V を出力し，位相雑音の発生も十分小さい。

図 1 の増幅器には，50mV ~ 2V の入力に対して 2.2V の出力が得られるリミッタアンプを用いた。リミッタアンプは発振器の出力を安定させる上で極めて効果的である。また，

* 関西電力 (株) 電力技術研究所 〒 661-0974 尼崎市若王寺 3-11-20
Kansai Electric Power, Power Engineering R&D Center
3-11-20 Nakoji Amgasaki-shi Hyogo, 661-0974

狭帯域フィルタは Q 値が 1500 の誘電体フィルタである。

3. 特性

試作したクロック抽出回路について、基本特性である、同期保持周波数幅、位相雑音、周波数応答を調べた。信号測定結果をそれぞれ、図 2、図 3 および図 4 に示す。光信号は半導体レーザからの連続光を LN 変調器で変調して得た正弦波状の波形である。正弦波の波形は、疑似ランダム信号 (PRBS) の光 RZ 信号とは異なるが、テスト波形の標準化には便利であるので用いた。同期保持周波数幅は、光入力強度が -6dBm 以下では急激に劣化し、O/E 変換器の入力上限である 6dBm まで概ね同程度の値であった。同期回路の理論によれば、同期保持周波数幅は入力される信号電力 P に対して、 $\sqrt{P}$ に比例することが示されており⁽⁴⁾、PLL 方式ではこの関係が成立していることがわかる⁽²⁾。今回の注入同期では異なる傾向であったが、発振ループの構成の

図 2 同期保持周波数幅

Fig. 2. Frequency locking range.

図 3 位相雑音

Fig. 3. Phase noise.

図 4 周波数応答

Fig. 4. Frequency response.

図 5 40Gbit/s 信号の 400km 伝搬後の誤り率

Fig. 5. Bit error rate of the 40-Gbit/s optical signal after 400-km transmission.

違いが影響していると考えられる。すなわち今回の構成では、発振ループの自励発振の立ち上がりは雑音が種となるため、光強度が一定以上になるまでは発振状態にならない。図 2 の同期保持周波数幅は、文献 (3) の 100kHz に比べ 10 倍以上大きい値であり、先述の変調の効率の良さによると思われる。図 3 の位相雑音については、大きさは 10GHz の発振器と同程度で、入力信号光強度への依存性は同期保持周波数幅と同様の傾向であった。図 2 や図 3 のような入力光強度に依存しない特性は、実用上有用である。

図 4 の周波数応答は、ロック状態における応答であり、入力する信号の変化への追従に関係する。図 4 の特性では、文献 (3) の約 10 倍の周波数帯域が得られている。

4. 光伝送実験

試作したクロック抽出装置の実用性を確認するために 40Gbit/s の RZ 光信号を 400km 伝搬させ、エラーレート (BER) を測定した。光パルス幅が約 4ps で 10GHz の光パルス列をモードロック半導体レーザから得て、LN 変調器で 15 段の PRBS 光信号に変調した。これを平面導波路の多重器で 40Gbit/s に多重化した。受信側では、製作したクロック抽出装置の 10GHz の信号により EA 変調器を駆動して、40Gbit/s から 10Gbit/s へ光信号で DEMUX した。光伝送路は非分散シフト光ファイバ 400km で、100km 毎に光増幅器で中継した。1 つの 10Gbit/s について得た BER を図 5 示す。BER 特性はクロック抽出装置を PLL 装置とした場合と差異のないものであった。さらに、長時間の安定性を見るために BER の連続測定を行った結果、実験室内で 76 時間の無エラー伝送を確認した。

5. まとめ

20GHz の注入同期発振器をベースとする 40Gbit/s の光 RZ 信号用のクロック信号抽出装置を試作し、基本特性を調べた。同期保持周波数幅、位相雑音、周波数応答については、10GHz をベースとする注入同期式よりも優れた特性が得られた。また、400km 伝搬した 40Gbit/s の符号誤り率測定を行い、76 時間の無エラー伝送を確認した。

(平成 15 年 7 月 3 日受付)

文 献

- (1) S.Seikai, I.Yamashita, H.Shishida, and K.Shimoura: "A clock recovery circuit for 80-Gbit/s optical signals and its application to 400-km single channel transmission", *T.IEE Japan*, Vol.122-C, No.4, pp.720-721 (2002-4)
- (2) S.Seikai, I.Yamashita, and K.Shimoura: "A study on 10-GHz clock extraction from 40-Gbit/s RZ optical signals", *Proc. Electron. Info. and Syst. Conf. IEE Japan*, GS2-4 (2002) (in Japanese)
青海恵之・山下育男・下浦一宏: "40Gbit/s RZ 光パルスからの 10GHz クロック信号抽出の一検討", 平 14 電気学会 C 部門大会, GS2-4 (2002)
- (3) F.Cisternino, R.Girardi, R.Calvani, E.Riccardi, and P.Garino: "A generative prescaled clock recovery for high-bit-rate OTDM systems", *Opt. Fiber Technol.*, 5, pp.260-274 (1999)
- (4) B.S.Glance: "Minimum required power for carrier recovery at optical frequencies", *J. Lightwave Technol.*, LT-4, 3, pp.249-255 (1986)