

自耦振盪光脈衝載波建構無源 10 Gbit/s 歸零相移與開關鍵控雙向 傳輸

Self-Starting Optoelectronic Oscillator Pulsed Carrier for 10 Gbit/s Down-Stream RZ-BPSK and Up-Stream Reused RZ-OOK Transmission

紀裕傑、林恭如

Yu-Chieh Chi, Gong-Ru Lin

自耦光電振盪器由於能同時產生高重複率之歸零脈衝光與微波時鐘訊號，因此在高速光分時多工整合高密度分波多工傳輸網路中扮演極重要角色。首先，在局端利用積體化整合之分布反饋雷射二極體及電吸收調變器建構自耦光電振盪器，以產生 10 GHz 之歸零脈衝光及微波時鐘訊號，進行無須傳統微波訊號源之 10 Gbit/s 歸零二相移相鍵控下行傳輸。接著在光網路用戶單元端，再利用其下行歸零脈衝光載波，以進行強度調變產生歸零開關鍵控來進行上行傳輸，用以完成無須傳統微波訊號源之 10 Gbit/s 雙向歸零二相移相鍵控／開關鍵控傳輸。研究中得到最佳化歸零脈衝光之脈衝寬、有效品質因數及消光比，分別為 16 ps、 4×10^5 及 10.1 dB。此外，也探討了自耦光電振盪器內光纖長度對輸出歸零脈衝光之時基誤差及微波時鐘訊號之相位雜訊的最佳化。最後，在誤碼率需求為 10^{-9} 條件下，其 10 Gbit/s 下行歸零二相移相鍵控及再利用上行歸零開關鍵控在背靠背傳輸時，分別具有接收功率為 -20 及 -17.5 dBm 之特性，下行歸零二相移相鍵控具有較佳傳輸品質，主要是因為二相移相鍵控對強度雜訊有較強之免疫力。

The integrated DFBLD and EAM based self-starting optoelectronic oscillator (OEO) simultaneously generates synthesizer-free microwave clock and pulsed carrier with ultra low jitter at high-repetition-rate, which has emerged as a key component for the high-bit-rate optical time-division multiplexing communication (OTDM) network. In this work, the synthesizer-free 10 GHz return-to-zero (RZ) carriers self-started by the feedback OEO for bi-directional access network with 10 Gbit/s down-stream RZ binary phase-shift keying and reused up-stream RZ on-off-keying data is demonstrated. Optimizing the delay length provides the OEO triggered optical RZ carrier the shortened pulsewidth, improved effective Q -factor and enhanced pulse extinction ratio of 16 ps, 4×10^5 , and 10.1 dB, respectively. The bi-directional RZ-BPSK and RZ-OOK transmissions using original and reused RZ carrier require receiving sensitivities of -20 and -17.5 dBm, respectively, to achieve a BER of 10^{-9} .

一、簡介

隨著人們對速率與頻寬需求與日俱增，短脈衝寬且頻譜線寬有限之高重複率脈衝式歸零載波光源已成為目前光分時多工網路中不可或缺的角色⁽¹⁾，歷年來產生許多脈衝載波格式光源之開發⁽²⁻⁵⁾。此外在未來整合光分時多工與高密度分波多工傳輸網路時，由該載波所延伸之脈衝式歸零資料格式更將扮演極重要之角色。因此也有許多研究團隊投入開發脈衝式歸零資料格式之產生^(6, 7)，同時也有針對分時多工與分波多工網路介面之脈衝式歸零資料格式與非歸零資料格式的轉換⁽⁸⁻¹²⁾。但在以上研究中可發現，脈衝式光源及額外用以驅動偽隨機二進位序列產生器之微波載波不單為充分必要條件，也是使脈衝式歸零資料格式產生器架構變得複雜且成本昂貴的關鍵。針對此問題，可同時產生脈衝光源及微波載波之自回饋光電振盪器無疑是一個簡單且極有成效之解決方案⁽¹³⁾，其振盪器迴路結構及原理示意圖如圖 1 所示。首先利用直接調變或外部調變雷射的輸出光經過一段光纖傳輸後，將其導入高速光偵測器中用以將光訊號轉換為微弱之微波時鐘訊號，接著利用窄頻低雜訊放大器與高品質因數微波濾波器，分別放大及擷取所選定之微波頻段。最後將此微波訊號送回再調變雷射式調變器，以形成自回饋光電振盪迴路，當此迴路內之增益略高於損耗時，便可自行啟動且穩定持續操作以同時輸出高重複率之脈衝光源及微波載波。此一自回饋光電振盪器自從其原理在 1978 年首次被提出後⁽¹⁴⁾，至今

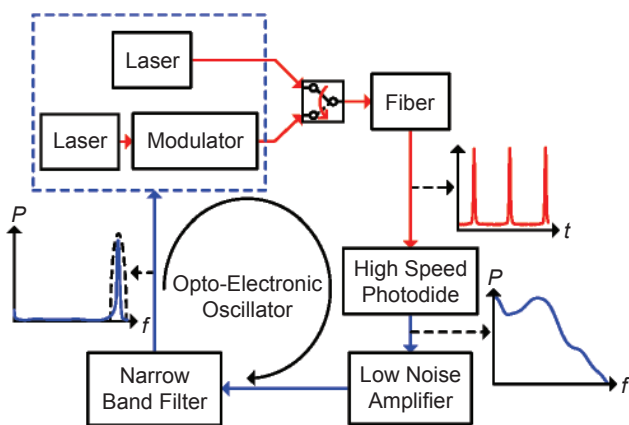


圖 1. 自回饋光電振盪器架構及脈衝載波產生示意圖。

仍不斷有許多專家學者投入對其之開發及深入探討。例如分別以直接調變各樣式雷射⁽¹⁵⁻¹⁷⁾ 或多種外部調變器方式^(18, 19) 來產生。此外，也有許多研究團隊專注於如何增加此自回饋光電振盪器之穩定度及所產生微波時鐘訊號之純度，例如搭配使用雙迴路模式^(20, 21) 或外部光源注入技術⁽²²⁾ 等方式。然而在其應用方面，除了典型用來進行時鐘訊號擷取及回覆外⁽²³⁾，幾乎沒有看到利用此自回饋光電振盪器來建構無須傳統微波訊號源之脈衝式歸零資料格式產生器的紀錄。因此，本實驗室將利用一個積體化整合之分布反饋雷射二極體及電吸收調變器來建構自回饋光電振盪器，以同時產生高重複率之 10 GHz 脈衝光源及微波載波，並同時進行無須傳統微波訊號源之 10 Gbit/s 下行脈衝式歸零二相移相鍵控及上行脈衝式歸零開關鍵控的雙向傳輸網路。

二、無須傳統微波訊號源之 10 Gbit/s 下行歸零二相移相鍵控與上行歸零開關鍵控雙向傳輸網路架構

以積體化整合之分布反饋雷射二極體及電吸收調變器建構自回饋光電振盪器，以進行無須微波訊號源之 10 Gbit/s 下行歸零二相移相鍵控與上行歸零開關鍵控雙向傳輸架構，如圖 2 所示。首先在局端，積體化整合之分布反饋雷射二極體波長為 1548.4 nm 且電吸收調變器之截止頻率為 11 GHz，同時該電吸收調變器之可調整操作偏壓為 -5 V 至 +1 V。接著電吸收調變器輸出光在經過一段單模光纖傳輸，以降低載波相位雜訊後被高速光偵測器接收，並轉換為一微弱之時鐘訊號。接著該時鐘訊號將經由低雜訊窄頻放大器及高品質因數濾波器分別進行放大及濾波，其中該濾波器之中心頻率為 9.95328 GHz，恰好對應於 OC-192 (9.95328 Gbit/s) 之規範。最後該時鐘訊號將被送回調變非線性操作下之電吸收調變器，以同時產生無須傳統微波訊號源之脈衝式歸零光源及微波載波。此外，在本系統中，由於電吸收調變器是藉由吸收光功率來進行調變，因此我們在迴路中接了一個摻鉍光纖放大器，以確保該自回饋光電振盪器有足夠之增益以自

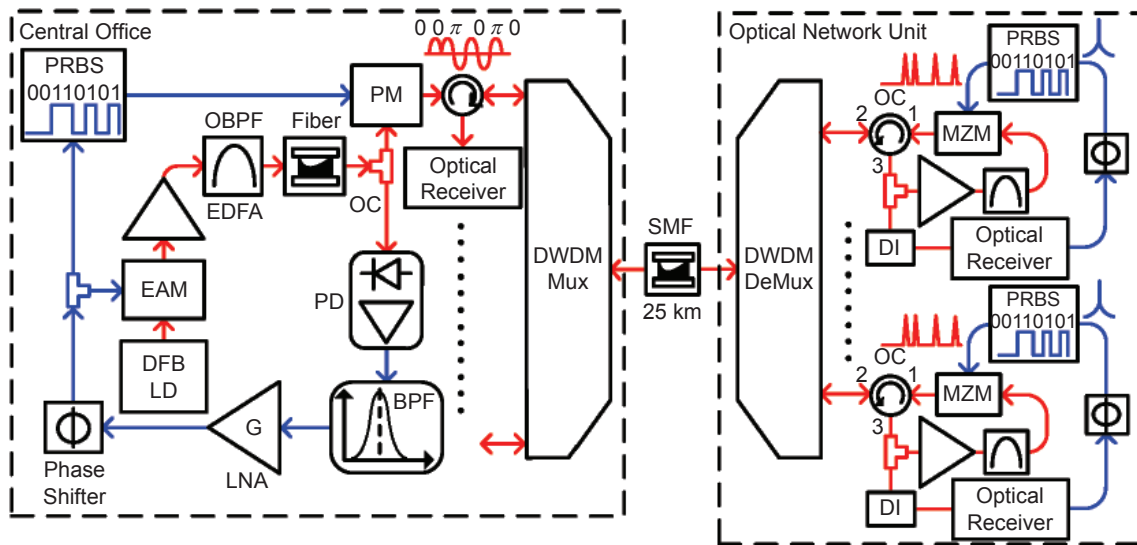


圖 2. 自回饋光電振盪器建構無傳統微波訊號源之 10 Gbit/s 下行歸零二相移相鍵控及上行歸零開關鍵控雙向傳輸網路。

行啟動，同時另外也用了一個光帶通濾波器，來濾除摻鋇光纖放大器所引入之強度雜訊。接著，利用自回饋光電振盪器產生之微波訊號來驅動偽隨機二進位序列產生器，以產生 10 Gbit/s 非歸零電開關鍵控，並對同樣是自回饋光電振盪器輸出之歸零脈衝光源進行同步相位調變，以得到歸零二相移相鍵控。接著經過 25 km 單模光纖進行下行傳輸，最後在光網路單元端將光分為兩路，一路經過二相移相鍵控解調變器後進行接收與訊號分析，一路再利用其下行之歸零脈衝光及微波訊號來產生歸零開關鍵控以進行上行傳輸。以此建構了一個無須傳統微波訊號源之雙向脈衝式歸零資料格式傳輸網路，其中二相移相鍵控解調變器之偏壓必須謹慎地微調，以使脈衝式載波之頻率間隔與解調變器能達到最好的匹配⁽²⁴⁾，並進一步改善歸零二相移相鍵控之傳輸品質。

三、結果與討論

如圖 3 所示為自回饋光電振盪器輸出歸零脈衝光譜圖，不同於自由震盪之分布反饋雷射二極體，在自回饋光電振盪驅動下具有拓寬的光譜，並可發現其模態間距 0.08 nm 恰好對應於載波調變訊號之 10 GHz。此外，也可觀察到即使光譜拓寬了，其輸出歸零脈衝仍然可以完整地通過高密度分波多工

之通道，以達成光分時多工與高密度分波多工之整合。

此外，在以電吸收調變器為基底之自回饋光電振盪器中，其操作偏壓對所產生之歸零脈衝光特性的影響也是討論重點，如下式所示為輸入光在經過非線性操作之電吸收調變器後的輸出表示式⁽²⁵⁾：

$$P_{\text{out}}(\lambda, V, t) = P_{\text{in}} \exp \left\{ -\Gamma L \left[\alpha(\lambda, V_{\text{DC}}) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{\partial^n \alpha}{\partial V^n} \Big|_{V_{\text{DC}}} (V_m \sin \omega t)^n \right] \right\}$$

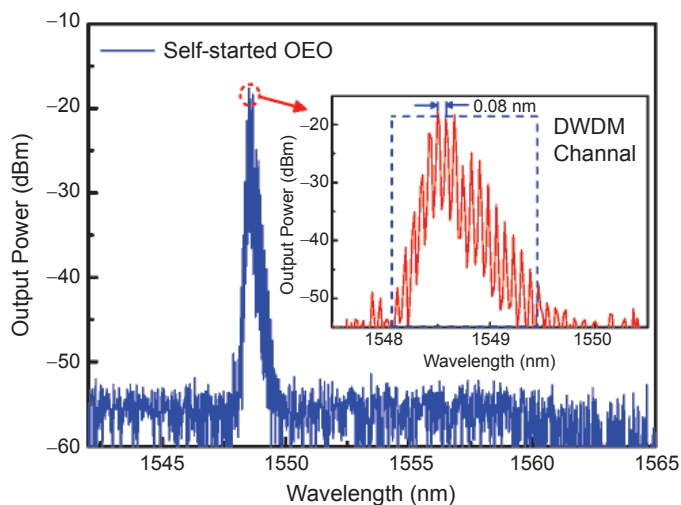


圖 3. 自回饋光電振盪器輸出光譜圖。

其中 $\alpha(\lambda, V)$ 為電吸收調變器在特定操作波長時之吸收係數，與操作偏壓 ($V = V_{DC} + V_m \sin \omega t$) 有關， V_{DC} 為直流偏壓點， V_m 為調變電壓值， P_{in} 為輸入電吸收調變器之光功率， Γ 為光侷限因子及 L 為電吸收調變器之長度。圖 4 之內插圖為在不同電吸收調變器操作偏壓下所模擬之自回饋光電振盪器輸出歸零脈衝光，可發現當改變電吸收調變器操作偏壓時，若利用摻鉕光纖放大器來維持自回饋光電振盪器輸出功率，其輸出歸零脈衝光之脈衝寬度將與電吸收調變器操作偏壓成正比。

另外，如圖 4 所示為模擬 (虛線) 及實驗 (實點) 之自回饋光電振盪器輸出歸零脈衝光脈衝寬度及消光比，可觀察到由於電吸收調變器之非線性轉換特性，使得當操作偏壓由 -2 V 下降至 -4 V 時，其所量測到歸零脈衝光之脈衝寬度由 23 ps 下降至 16 ps，其實驗與模擬結果相當吻合。接著是消光比，當電吸收調變器偏壓由 -4 V 增加至 -3 V 時，隨著自回饋光電振盪器迴路內增益的增加，使得能有更好之調變深度，進而使輸出歸零脈衝光消光比由 9.6 dB 上升至 10.1 dB，但若接著再增加操作偏壓由 -3 V 至 -1 V 時，卻發現消光比反而由 10.1 下降至 9.7 dB，這主要是因為過大之調變電壓使得電吸收調變器進入飽和操作以及自回饋光電振盪器迴路內摻鉕光纖放大器之強度雜訊所導致。因此在以電吸收調變器為基底之自回饋光電振盪器中，其操作偏壓將要謹慎選擇，以獲得最佳之輸出歸零脈衝光。

關於自回饋光電振盪器輸出之微波訊號品質，其最大輸出功率、載波雜訊比及二階諧波抑制比分別為 21.5 dBm、 52 dB 及 55 dB，同時其相對之有效品質因數可達到 4.2×10^6 。此外，我們知道自回饋光電振盪器輸出微波訊號之品質因數正比於迴路內能量的累積，並反比於能量之損耗，且由於能量在光纖中進行傳輸時損耗極小，因此若在自回饋光電振盪器之迴路內增加光纖長度，便能有效降低其輸出微波訊號之相位雜訊，並提升有效品質因數。若由數學的觀點來討論，下式為典型自回饋光電振盪器輸出微波訊號之單旁波帶相位雜訊密度表示 (26, 27)：

$$L\{f\} = 10 \log \left[\frac{2FkTG}{P_{OSC}} \left(\frac{\rho_N V_g^2}{4\pi L_{OEO}^2 f P_{OSC}} \right)^2 \right]$$

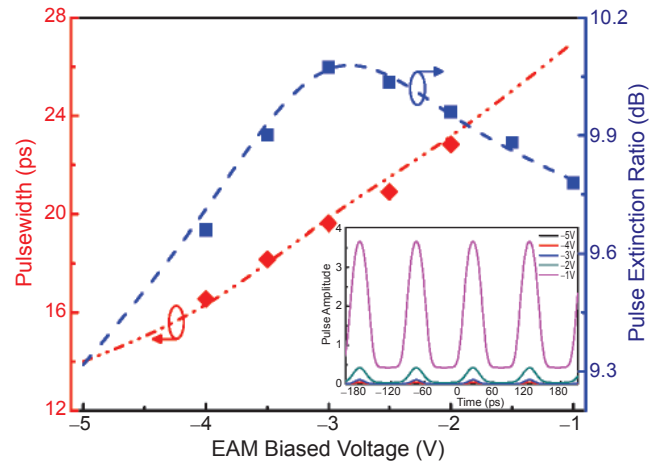


圖 4. 自回饋光電振盪器輸出歸零脈衝光之脈衝寬度及消光比。

其中 f 為位移頻率， k 為波茲曼常數， T 為溫度， G 為低雜訊窄頻放大器之功率增益， P_{OSC} 為振盪功率， ρ_N 為總雜訊密度， v_g 為群速度， L_{OEO} 為自回饋光電振盪器迴路內單模光纖長度。由上式同樣可發現，增加自回饋光電振盪器迴路內之單模光纖長度，確實對降低輸出微波訊號之單旁波帶相位雜訊有相當之助益。以實驗驗證之，圖 5 所示為當在自回饋光電振盪器內放置不同長度之單模光纖時，其輸出微波訊號之單旁波帶相位雜訊譜，如同理論探討般，實驗結果也驗證了增加自回饋光電振盪器內光纖長度，有助於降低輸出微波訊號之相位雜訊，並同時提升有效品質因數。然而自回饋光電振盪器內之光纖長度並不可無限制地增加，主要是因為此自回饋光電振盪器也同時具有共振腔的效應，因此在輸出微波訊號譜中會產生我們不需要的共振頻率成分 (c/nL_{OEO})，且其共振頻率間距反比為振盪迴路內之光纖長度，因此自回饋光電振盪器內光纖長度並非越長越好，而是應該在抑制的相位雜訊及增加的共振頻率中尋找一個平衡點。

在本研究中，當自回饋光電振盪器內之單模光纖長度為 800 m 時，其輸出微波訊號在位移頻率大於 1 kHz 時，能對側模共振載波有大於 100 dB 之抑制。此外，如圖 6 所示為將模擬之自回饋光電振盪器輸出微波訊號單旁波帶相位雜訊譜換算後所得之脈衝時基誤差 (timing jitter)，可看出當自回饋光電振盪器迴路內光纖長度逐漸增加時，其脈衝時基

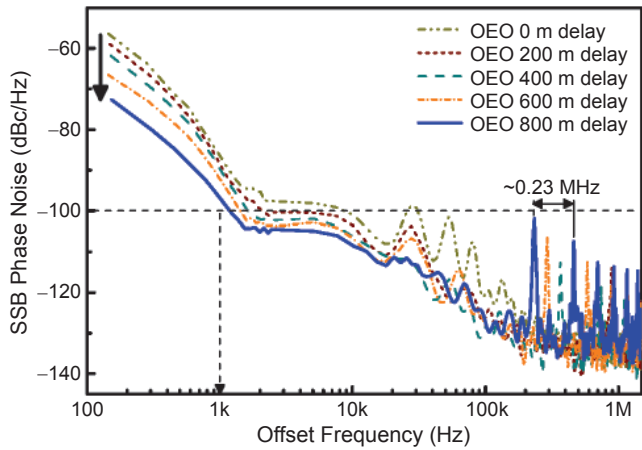


圖 5. 當位移頻率為 100 Hz 至 1 MHz 時，自回饋光電振盪器輸出微波電訊號之單旁帶相位雜訊譜。

誤差能得到一有效之抑制，且在迴路內光纖長度為 800 m 時有最低之時基誤差為 5 fs。接著，若再持續地增加迴路內之光纖長度，便會因為不需要的共振頻率成分不斷地增加，反而導致時基誤差劣化，此結果與實驗之相位雜訊相符合。

針對以此自回饋光電振盪器所建構無須傳統微波訊號源之下行脈衝式歸零二相移相鍵控及上行歸零開關鍵控傳輸品質，其清晰的輸出眼圖如圖 7(a) 所示，可觀察到下行脈衝式歸零二相移相鍵控及上行歸零開關鍵控均具有相當大之動態範圍及可接受之強度雜訊。此外，如圖 7(b) 所示為其傳輸誤碼率分析，在誤碼率需求為 10^{-9} 條件下，此自回饋光電振盪器所建構之 10 Gbit/s 下行歸零二相移相鍵控分別在背靠背與傳輸 25 公里時，具有接收功率為 -20 dBm 及 -19.2 dBm 之特性。此外，在同樣誤碼率需求下，其再利用之上行歸零開關鍵控在背靠背與傳輸 25 公里時之接收功率分別為 -17.5 dBm 及 -15.3 dBm，可發現下行歸零二相移相鍵控具有較上行歸零開關鍵控好之傳輸品質，這主要是因為相位調變之訊號對強度雜訊有較強之免疫力。另外，相較於背靠背傳輸時，上行歸零開關鍵控在傳輸 25 公里後之功率償付值比下行歸零二相移相鍵控要來得大，主要是因為受到上行及下行歸零脈衝光之交互失真及雷利背散射光影響所導致。

最後，我們也比較利用直接調變與外部調變雷射二極體所建構自啟動光電振盪器產生之 10 Gbit/

s 脈衝式歸零載波／資料格式的特性，在直接調變模式所建構之自啟動光電振盪器中，其雷射二極體需被操作於臨界條件附近，以進行增益切換來產生脈衝式歸零載波，而在外部調變模式時，其歸零載波的產生主要是利用調變器的非線性特性，因此可將雷射光源操作在遠離臨界條件。同時我們知道雷射的相對強度雜訊與其操作電流成反比，因此以較高操作電流驅動之外部調變自啟動光電振盪器會有較直接調變模式好之輸出脈衝式歸零載波特性的。此外，關於直接調變與外部調變雷射二極體所建構自啟動光電振盪器產生之 10 Gbit/s 脈衝式歸零資料格式傳輸誤碼率，如下式所示^(28, 29)：

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{m\eta_i h\nu\alpha_{\text{eff}}}{2q} \frac{ER-1}{ER+1} \sqrt{\frac{M}{\langle \delta P^2 \rangle} \left(\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} [I(t) - I_{\text{th}}] dt \right)^2} \right]$$

其中 m 為調變係數， η_i 為內部量子效率， $h\nu$ 為光子能量， q 為電子電量， ER 為消光比， M 為光接收器增益， δP 為雜訊功率， α_{eff} 為有效損耗因子， I_{th} 為雷射臨界電流及 I 為雷射操作電流。由上式可清楚觀察到操作電流大的外部調變雷射二極體在產生無須傳統微波訊號源之 10 Gbit/s 脈衝式歸零資料格式時比操作電流小的增益切換雷射二極體有更好的傳輸特性，因而適合成為自啟動光電振盪器之光源。

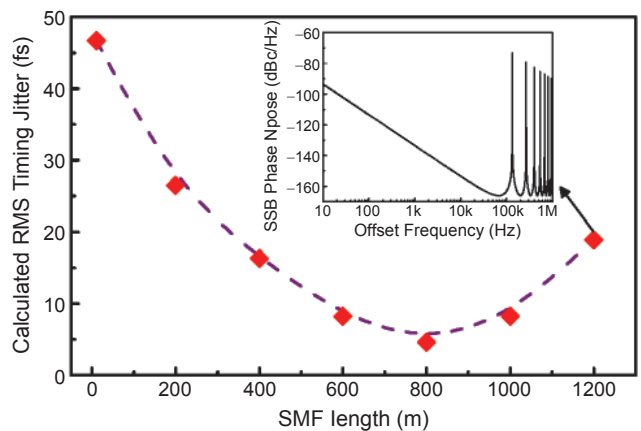


圖 6. 自回饋光電振盪迴路輸出歸零脈衝光之時基誤差。

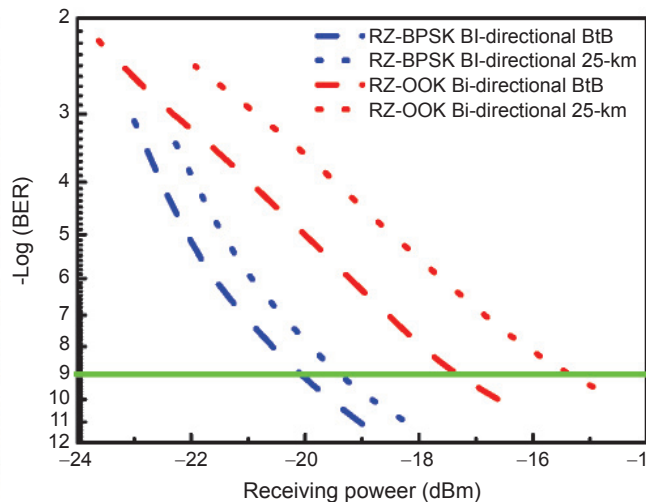
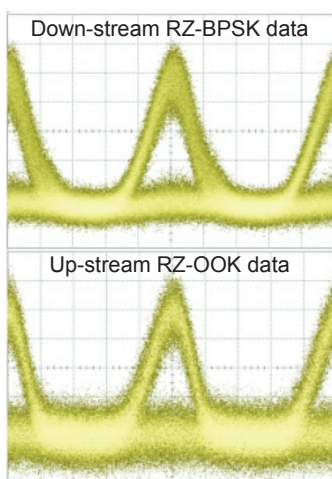


圖 7. 無須傳統微波訊號源之 10 Gbit/s 下行歸零二相移相鍵控與上行歸零開關鍵控雙向網路之輸出眼圖 (左) 及誤碼率 (右) 分析。

四、結論

我們利用非線性操作之電吸收調變器為基底，建構自啟動光電振盪器，同時產生 10 GHz 之脈衝光源及微波電訊號，並以此為基礎進行無須傳統微波訊號源之 10 Gbit/s 下行歸零二相移相鍵控與上行歸零開關鍵控分波多工雙向傳輸。關於自啟動光電振盪器輸出之脈衝光源，同時以理論及實驗進行探討，以得到最佳化後之脈衝寬、消光比及有效品質因數，分別為 16 ps、10.1 dB 及 4×10^5 ，此時其輸出微波訊號之最大輸出功率、載波雜訊比及二階諧波抑制比，分別為 21.5 dBm、52 dB 及 55 dB。此外，也探討了自啟動光電振盪器內光纖長度對輸出歸零脈衝光載波之時基誤差與微波訊號之相位雜訊的最佳化，當振盪器迴路內光纖長度為 800 m 時，其 10 GHz 微波訊號在位移頻率大於 1 kHz 時，能對側模共振載波有大於 100 dB 之抑制。最後，針對以此自回饋光電振盪器所建構之下行脈衝式歸零二相移相鍵控及上行歸零開關鍵控傳輸特性，在誤碼率需求為 10^{-9} 條件下，其 10 Gbit/s 下行歸零二相移相鍵控及再利用上行歸零開關鍵控在背靠背傳輸時分別具有接收功率為 -20 dBm 及 -17.5 dBm 之特性，且在傳輸 25 公里後分別有 0.8 及 2.2 之功率償付值，可發現下行歸零二相移相鍵控具有較上行歸零開關鍵控好之傳輸品質及小之功率償付值，主要是因為二相移相鍵控對強度雜訊有較強之免疫力。此研究成功地驗證了利用自啟動光電振盪器產生無須傳統微波訊號源之歸零脈衝

資料格式，並進行混合式光分時多工與高密度分波多工傳輸之可行性。

參考文獻

1. D. Breuer *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 398 (1997).
2. G.-R. Lin *et al.*, *Opt. Express*, **12**, 2017 (2004).
3. G.-R. Lin *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16**, 1810 (2004).
4. G.-R. Lin *et al.*, *Optics Express*, **12**, 4166 (2004).
5. G.-R. Lin *et al.*, *Opt. Express*, **13**, 1008 (2005).
6. R. S. Tucker *et al.*, *Electron. Lett.*, **22**, 1329 (1986).
7. J. Torregrosa *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **19**, 1837 (2007).
8. Y. C. Chang *et al.*, *Opt. Express*, **12**, 4449 (2004).
9. Y. C. Chang *et al.*, *Opt. Lett.*, **30**, 2704 (2005).
10. G.-R. Lin *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **17**, 1307 (2005).
11. G.-R. Lin *et al.*, *Opt. Lett.*, **31**, 1376 (2006).
12. C. C. Lin *et al.*, *IEEE J. Lightwave Technol.*, **29**, 830 (2011).
13. X. S. Yao *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 688 (1996).
14. R. Th. Kersten, *Arch. Elektrotech.*, **60**, 353 (1978).
15. C. L. Lin *et al.*, *Electron. Lett.*, **16**, 600 (1980).
16. K. Koizumi *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **22**, 293 (2010).
17. Y. C. Chi *et al.*, *IEEE T. Micro. Theory*, **58**, 2292 (2010).
18. J. Lasri *et al.*, *Opt. Express*, **11**, 1430 (2003).
19. T. Sakamoto *et al.*, *Opt. Lett.*, **31**, 811 (2006).
20. D. H. Chang *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **14**, 191 (2002).
21. J. Yang *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **19**, 807 (2007).
22. H. K. Sung *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **15**, 572 (2009).
23. L. Huo *et al.*, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **15**, 981 (2003).
24. Y. C. Chi *et al.*, *IEEE J. Lightwave Technol.*, **29**, 1702 (2011).
25. Y. C. Chi *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **18**, 567 (2012).
26. D. B. Leeson, *IEEE Proceedings*, **54**, 329 (1966).
27. J. Lasri *et al.*, *Opt. Express*, **11**, 1430 (2003).

28. Y. C. Chi *et al.*, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, **58**, 2292 (2010).

29. Y. C. Chi *et al.*, *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **17**, 1146 (2011).



紀裕傑先生為國立台灣大學光電工程學博士。

Yu-Chieh Chi received his Ph.D. in photonics and optoelectronics from National Taiwan University.



林恭如先生為國立交通大學光電工程學博士，現任國立台灣大學光電工程學研究所教授。

Gong-Ru Lin received his Ph.D. in electro-optical engineering from National Chiao Tung University. He is currently a professor in the Graduate Institute of Photonics and Optoelectronics at National Taiwan University.