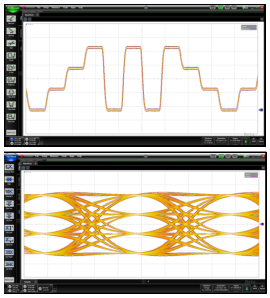
白皮書

讓資料中心從 100GE 加速到 400GE

進階調變與編碼挑戰

互連世界對即時資料存取的需求與日俱增，並持續推動資料中心收發器的創新技術。100 gigabit 乙太網路（GE）資料傳輸的發展目前已進入生產階段，並會持續進化。從 100GE 到 400GE 並非逐步演進，而是一種劃時代革命。不歸零（NRZ）和四位準脈衝振幅調變（PAM4）是兩種可實現 400GE 的調變技術。兩者各有其獨特挑戰。



基本原理

從 100GE 到 400GE 並非逐步演進，而是一種劃時代革命。光學收發器必須運用進階信號調變和編碼來實現 400GE 速度。這些技術為收發器製造商帶來了新的測試挑戰。

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

最常見的 100GE 調變機制為 NRZ 調變。NRZ 是一種雙狀態傳輸系統（又稱為兩階脈衝振幅調變或 PAM2），其中邏輯「1」由正電壓表示，「0」則以等效（通常）負電壓表示。100GE 係透過 4 個每秒 25 gigabit（Gb/s）的 NRZ 調變信號通道來達成。NRZ 在過去 50 年中逐漸發展，速度從每秒 110 位元提升到 100 Gb/s，多年來已探討並解決多種新概念與挑戰。理論上運用相同的概念，只要使用 8 通道 56 Gb/s 信號即可讓 NRZ 達到 400GE 速度。然而當 NRZ 設計速度提升至 28 Gb/s 以上時，傳輸介質的通道損耗便成為限制因素。

根據 Shannon Hartley 定理，在存在雜訊的情況下，指定通道頻寬中具有一最大零錯誤資料量理論值。因此必須增加通道頻寬或信號位準，才能提升資料速率或通道容量。新型多信號調變技術也因而催生。

PAM4 信號採用 4 振幅位準，並以邏輯位元 00、01、10 和 11 代表符碼。每秒傳輸的符碼數（傳輸速率）為每秒傳輸位元數的一半。例如資料速率 28 gigabaud（GBaud）代表每秒傳輸 56 gigabit 的資料。此速率為相同頻寬下 28 GBaud NRZ 資料速率（傳輸速率）的兩倍（由於一個位元代表一個符碼，因此 28 GBaud NRZ 基本上代表 28 Gb/s）。

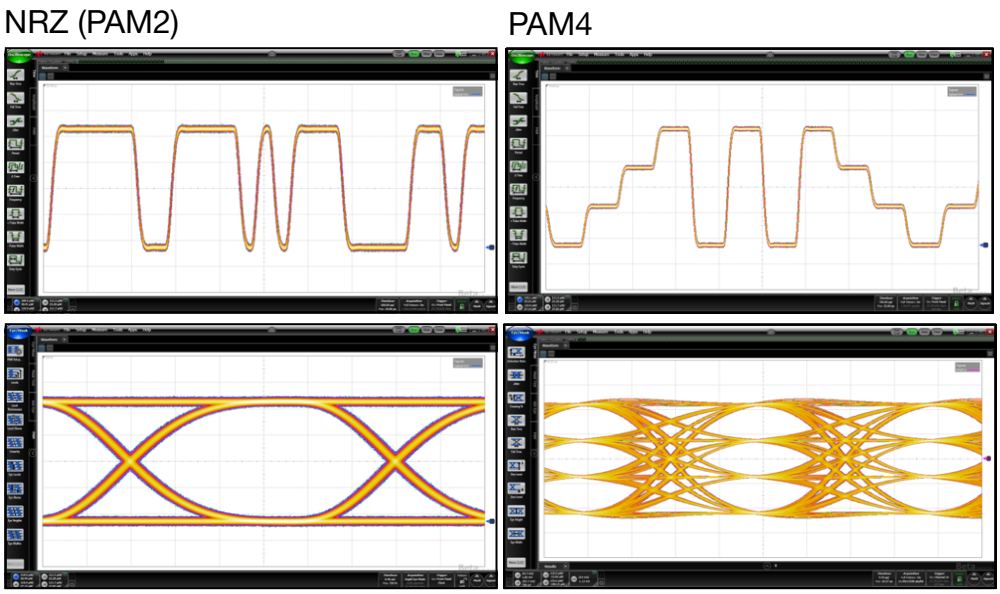


圖 1：NRZ 與 PAM4 調變信號

但由於四個信號位準被匯整成兩個振幅擺幅（如圖 1 所示），PAM4 的設計遠比 NRZ 設計容易受到雜訊影響。因此其信噪比（SNR）較低，對收發器設計雜訊進行分析時必須考慮通道回返損耗及來自測試儀器的雜訊。PAM4 則利用前向錯誤修正（FEC）來解決這個問題。FEC 是一種進階編碼技術，透過鏈路與酬載資料傳送所需資訊以修正錯誤。FEC 也帶來了一些必須在 PAM4 信號實體層測試中納入考量的新測試挑戰。為了提升錯誤修正功能，也可利用格雷碼型來執行 PAM4 編碼。

FEC 帶來了一些必須在 PAM4 信號實體層測試中納入考量的新測試挑戰。

格雷碼又稱為反射二進碼，是一種相連符碼間相差一個二進位位元的編碼碼型。在上述 PAM4 位元序列下，相同符碼在 0、1、2、3 位準下的格雷碼表示方式分別為 00、01、11 和 10。美國電子電機工程師學會（IEEE）與光學互連論壇（OIF）標準皆建議使用格雷編碼將位元編碼至 PAM4 信號。

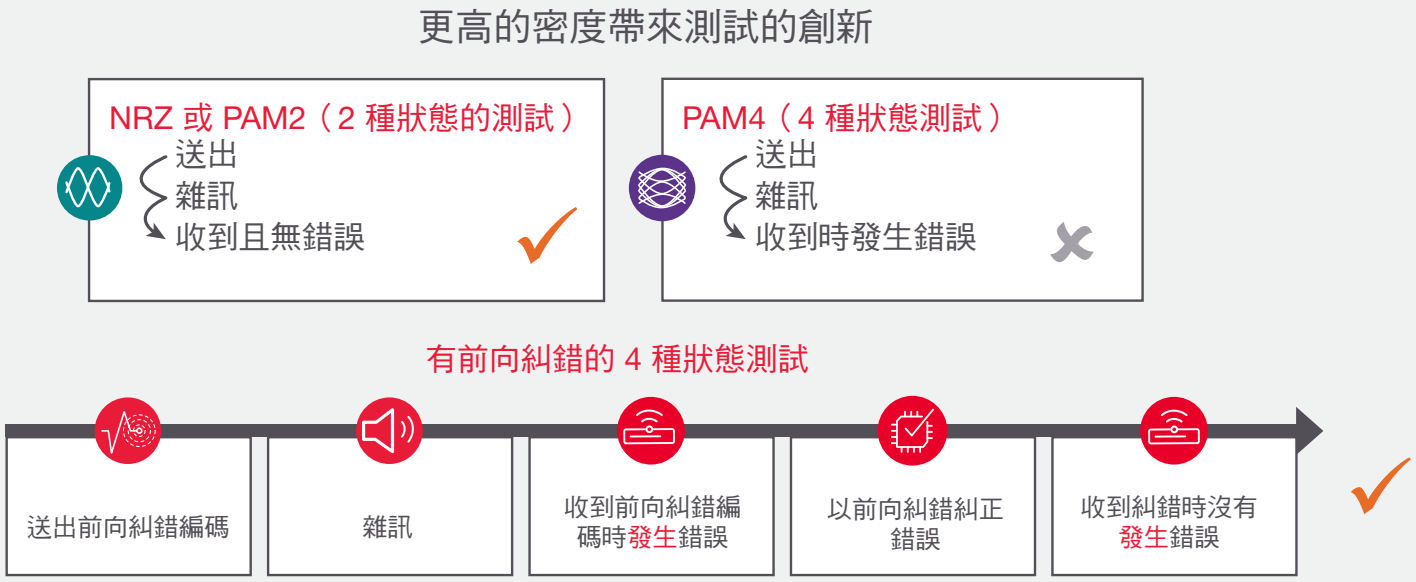


圖 2：測試中使用 EFC 與否之差異

如圖 2 所示，前向錯誤修正會透過鏈路與酬載資料傳送所需資訊以修正錯誤。解碼器無需要求發射器重新傳輸，即可利用此資訊恢復毀損資料。鏈路的發射與接收端都必須了解鏈路以哪種編碼機制運作。使用 FEC 的鏈路採用多種編碼系統。資料中心網路較常使用的編碼機制為里德所羅門（RS）系統，由 Irving Reed 和 Gustav Solomon 在 60 年代提出，主要應用於衛星資料鏈路。

RS 編碼以固定大小的資料區塊（又稱為符碼）運作。這些區塊集合在一起成為訊框。請務必注意對使用 PAM4 的資料中心網路標準而言，「符碼」與「符碼錯誤率」是指 RS 符碼，而非 PAM4 符碼。RS 編碼與解碼會在格雷編碼從二進位轉換為 PAM4 再轉換回來的過程前後處理二進位資料。

FEC 的測試影響因素

在 400GE 下，系統「可接受」某種程度的自然發生錯誤，並利用 FEC 加以修正，以得到接近零錯誤的 FEC 環境結果。但收發器製造商在測試 FEC 編碼 PAM4 信號時，必須考慮三個重要因素：編碼增益、叢發錯誤及分割。

編碼增益

編碼過程會將酬載資料轉換成可解碼的格式，並建立修正錯誤所需的額外資料。產生的編碼資料稱為字碼。接收端必須進行解碼才能恢復資料。編碼增益是指錯誤更正碼的穩定程度。高編碼增益可修正更多錯誤。但也存在著一些優缺點。採用高編碼增益的 RS 系統必須於字碼區塊傳送更多負載，以便在接收端進行解碼。此外，編碼增益增加也造成編碼與解碼所需邏輯量上升，資料編碼和解碼所需的處理時間或延遲時間也隨之增加。使用 PAM4 之高速串列資料鏈路原生錯誤率比採用 NRZ 線編碼者來得高，因此需要具較高編碼增益的 FEC。

以 FEC 進行測試時的三個主要考量因素：

- 編碼增益
- 叢發錯誤
- 分割

叢發錯誤

RS 系統的編碼增益最多可在字碼中修正最大指定錯誤數。一旦超過此數值，整個字碼就無法進行解碼，並會遺失所有資料。這樣的事件稱為訊框遺失，並可計算得出訊框遺失率（FLR），與誤碼率 （BER）相似。誤碼率是將因雜訊或干擾而發生錯誤的接收位元數，除以傳輸位元總數所得之百分比。FLR 則是將未傳送的訊框除以傳送訊框數所得到的百分比。

選擇 FEC 編碼增益可避免在原生鏈路目標最壞狀況 BER 下發生訊框遺失。此情況在假設原生鏈路錯誤分佈接近隨機時才會成立。即使鏈路的平均錯誤率優於指定原生 BER，當訊框突然發生大量錯誤且超出可修正的錯誤數量，仍會導致訊框遺失。請注意本文中的「叢發」並不一定指連續位元。錯誤可能散佈在正確的資料位元中，若超出使用的 FEC 碼最大可修正位元數，仍會造成訊框遺失。

錯誤叢發可能源自鏈路的接收端，或者來自鏈路中任何不需 FEC 編碼和解碼即可進行資料重新計時的位置，例如光學模組的直通模式。因此應預期會發生錯誤叢發，並可透過分割來將影響降到最低。

分割

針對採用多通道並以總鏈路資料子速率運作的鏈路，為了減少訊框遺失事件，通常會使用資料分割。資料分割會透過鏈路中所有可用通道，以輪循方式輪流使用各資料串流。通過鏈路重新計時器而產生的叢發錯誤經過分割後，所得的長度等於錯誤叢發除以分割使用通道數。例如在使用 4 通道 25.78 Gb/s NRZ 資料的 100GE 鏈路中，單一通道光學模組產生的 100 位元錯誤叢發在鏈路末端進行分割解交錯後，只會剩下 25 個錯誤。因此分割不會增加求得的編碼增益（假設為隨機錯誤分佈），並可有效增加錯誤叢發發生時的增益。

結論

除了 RS 編碼和分割外，資料中心網路鏈路還會執行其他編碼。資料首先會通過加擾器，以去除任何直流條件並保持對稱性。在通過 FEC 編碼器前會先進行資料轉碼。完成分割後，二進位資料會通過 PAM4 格雷編碼器。另一端則由邏輯區塊以相反順序進行解碼。執行此作業所需的邏輯非常複雜。使用 8 通道 RS FEC 並進行分割的 400GE 鏈路解碼端需要數十萬個閘極。因此針對採用 RS FEC 的鏈路，必須考慮幾個測試影響因素。收發器製造商必須改變測試程序以將 FEC 納入考量，並需使用不同指標來測試效能特性及與標準的相符性。

若想了解是德科技解決方案如何透過進階調變與編碼技術，幫助您處理 400GE 資料中心的執行挑戰，請造訪以下連結：

- 有關 PAM4 模擬、傳輸、互連與接收器測試解決方案，請參閱脈衝振幅調變（PAM4）設計與測試解決方案
- 有關 400GE 設計與測試解決方案，請參閱 www.keysight.com/find/400G。

詳細的資訊，請上網查詢：www.keysight.com

有關是德科技電子量測產品、應用及服務的詳細資訊，可查詢我們的網站或來電洽詢。
以下為是德科技聯絡窗口：www.keysight.com/find/contactus

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

本文件資訊如有修改，恕不另行通知。© Keysight Technologies, 2018, Published in USA, September 21, 2018, 5992-3021ZHA