

PAM4 編碼調變技術 為高速而生

■文：徐俊毅

全球各地正加速進入數位元化轉型期，5G 行動通信提升了大容量視頻和資料檔案的發送和接收的速度，但面對洶湧的資料浪潮，數位世界的通路仍顯擁擠，2020 年爆發的 COVID-19 疫情讓基礎設施能力的弱點更進一步暴露出來。為支援更大資料量、更快的傳輸，作為包括 5G 行動網路、有線網路以及雲端資料交互的關鍵基礎設施——資料中心，也在盡全力提升資料傳輸能力，實現更高資料傳輸由 100 GbE * 3 升級到 400 GbE 以及 800 GbE / 1.6 TbE 傳輸時代已經為時不遠了。

新一代信號傳輸技術

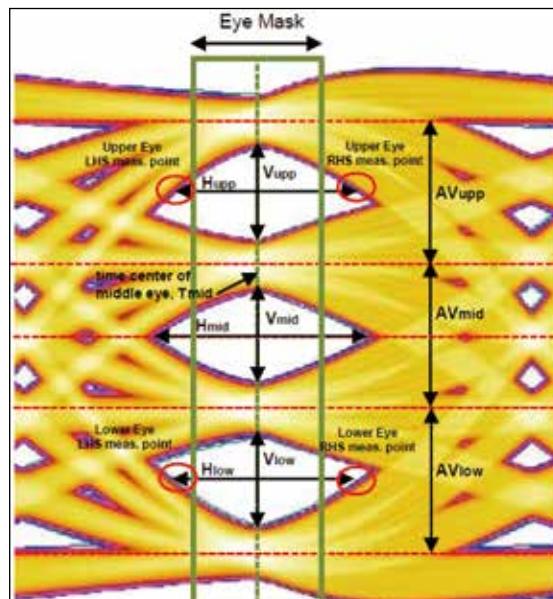
PAM4 被認為是下一代高速信

號傳輸的主力編碼調變技術。

PAM4 是 PAM (Pulse Amplitude Modulation 脈波振幅調變) 技術中的一種，也有人稱為第四級 PAM 技術，是 NRZ(Non-Return-to-Zero 不歸零碼) 信號傳輸技術的繼任者。而 NRZ 則是自上世紀 80 年代以來，乙太網等其它傳輸技術使用了幾十年的信號調變技術。

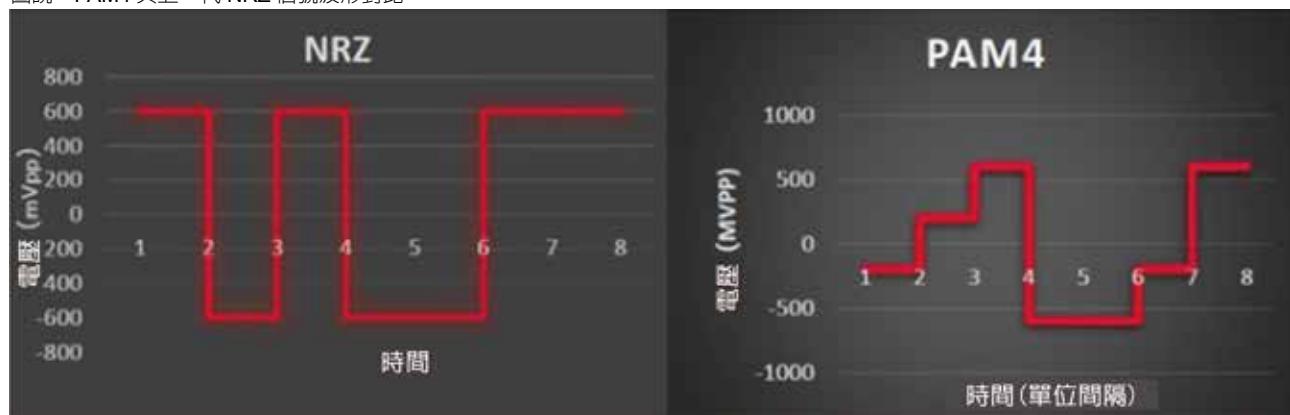
互聯世界對即時數據傳輸不斷增長的需求，導致超大規模資料中心服務提供者必須將當前的每秒 100 十億位元 (Gig (G)) 乙太網遷移到基於 56G PAM4 信令的 400G 乙太網鏈路，實現更快的介面。使用 PAM4 信令變得至關重要，因為對於插入損耗僅超過幾分貝 (dB)

的有損通道，NRZ 信令無法繼續支持超過 32G 的資料速率。由於 NRZ 的 Nyquist 頻率較高，導致與圖說：PAM4 眼圖



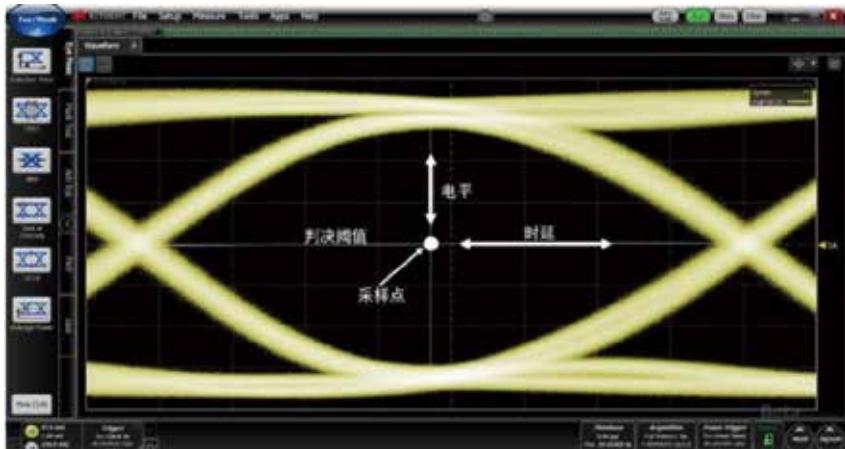
圖片來源 :intel.com

圖說：PAM4 與上一代 NRZ 信號波形對比



資料來源 :keysight

圖說：NRZ 眼圖



資料來源 :keysight.com

通道有關的損耗較高，因此 PAM4 已成為更可行的解決方案。

PAM-4 信令對比 NRZ 信令

PAM4 信號在資料傳輸時有 4 個電平狀態，分別對應邏輯 bit，**00, 01, 10, 11**，即一個電平可以傳輸 2bit 資料。而 NRZ 信號 1 個電平狀態只對應 1 個邏輯 bit，正電壓表示邏輯 1，等效負電壓表示邏輯 0。

在 NRZ 信號傳輸中，串列傳輸速率 (baud/s) 與位元元速率 (bit/s) 是 1 : 1 的關係，而 PAM4 由於每個 baud 攜帶 2 個 bit 資料，因此二者關係是 1 : 2 的比例。

同樣條件下 PAM4 可有效地將鏈路頻寬的資料速率加倍，且對現有網路基礎設施的變動較小，可顯著降低提升傳輸容量的成本。

因此 IEEE 乙太網標準組 802.3 已確定在 400GE/200GE/50GE 高速介面中的 PHY (實體層) 採用 50Gbps/

lane PAM4 編碼，在盡可能節約成本的條件下，提升行動通信和光通信技術的傳輸能力。

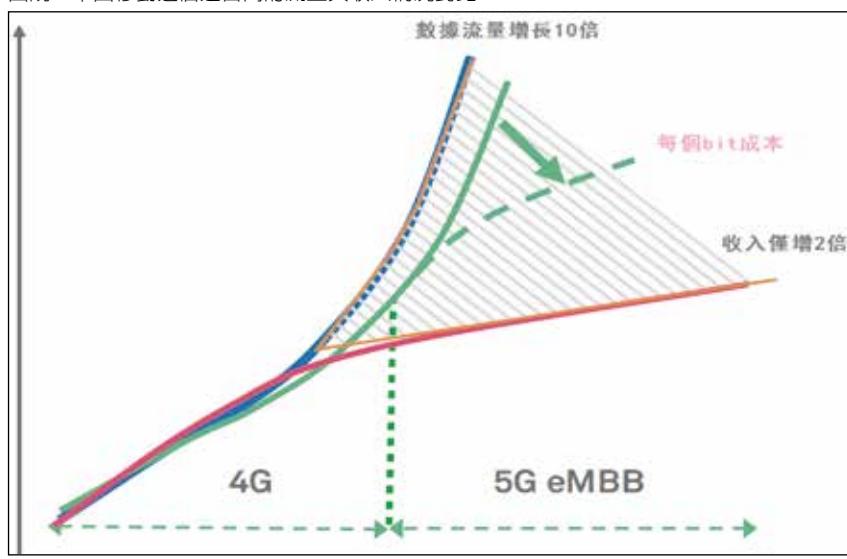
PAM4 幫助運營商解決 5G 商用的痛點

行動通信運營商方面，5G 發展緩慢的一個重要原因就是單位 bit 的傳輸成本在逐年上升。

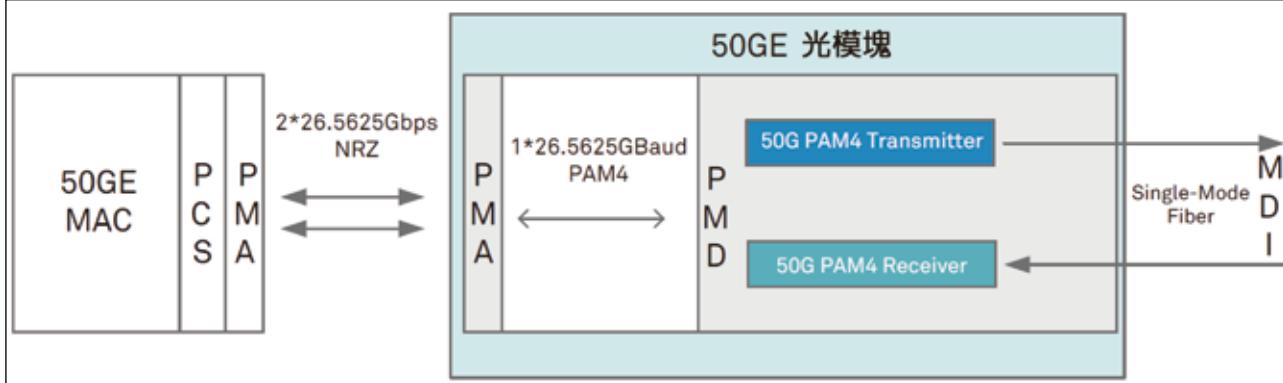
海量移動使用者的短時視頻、即時通信、遊戲等應用成就了行動

運營商的流量業務，以中國移動為例，在中國移動的收入結構中，流量收入已經成為其最主要的收入來源，遠超其通話、短資訊收入。然而從 4G 到 5G 這一過程中，移動網路承載的網路流量將會有 2~3 個數量級，也就是 100 被甚至 1000 倍的巨幅增長。用戶流量的增長遠遠超過了，銷售流量的收入增長，二者差距正越來越大。從上圖中某運營商的資料可以看出，網路流量增長了 10 倍，但實際收入只增長了 2 倍，這讓運營商在投入 5G 基礎設施方面變得猶豫。PAM4 技術這一應用領域正發揮重要作用，基於單通道 50G PAM4 技術的 400GE/200GE/ 50GE 可以很好適配 5G 對網路成本以及性能的訴求，構築從接入、彙聚到核心網的完整解決方案。如能大幅度降低移動運營商的資料傳輸成本，那麼 5G 網路距離真正意義上的普及就不遠了。

圖說：中國移動通信運營商的流量與收入情況對比



圖說：50GBASE-LR PMD 架構



資料來源 :huawei.com

圖說：資料中心的光纖介面



PAM4 降低了光元件的頻寬要求

在中長距離的資料傳輸中，NRZ 調變一直是非相干光通信的主要技術。但是隨著傳輸速率的提升，到了 200G/400G 這一速率，NRZ 調變在色散影響、光電轉換頻寬和成本方面都遇到了問題。25 G 以上的串列傳輸速率，在中長距傳輸時，色散的影響開始顯著；光電轉換頻寬在 60 Gbit/s 以上出現了技術瓶頸，要採用新的材料及技術才能不斷突破這個瓶頸。在通信領域，光電子技術需要 24~36 個

cmos 光技術以及 PAM4 這樣的高級調變技術，在相同的比特速率的條件下，PAM4 的串列傳輸速率只有 NRZ 的一半，大大降低了光元件的頻寬要求，降低光器件成本，可有效提升傳輸能力。

PAM4 也有明顯的短板，就是設計更容易受到雜訊的影響，因四個信號電平被打包成兩個幅度擺幅。與 NRZ 的兩個電壓級相比，PAM-4 具有四個電壓級，導致六次上升和六次下降不同的信號轉換，產生三個區域眼圖開度。每個眼高為 NRZ 眼高的 1/3，致使

月才能將傳輸能力翻倍，這不僅落後於摩爾定律 18 個月翻倍的速度，顯然無法跟上流量增長的數量流量。借助成熟的

PAM-4 信噪比 (SNR) 降低 9.5 dB 以上，這會影響高速信令的信號品質並帶來額外的約束。結果就是信噪比 (SNR) 較低，並且在測試中必須要分析收發信機設計中的雜訊。PAM4 使用前向糾錯 (FEC) 方法來解決這個問題。FEC 是一種高級編碼技術，它除了通過鏈路發送淨荷之外，還發送必要的資訊，以校正誤碼。FEC 帶來新的測試挑戰，設計人員必須在 PAM4 信號的實體層測試中加以考慮。

參考資料：

- 50G-PAM4 技術白皮書 來源：huawei.com
- PAM4 技術在光通信應用中的系統分析 來源：zte technology journal .2018.04
- 400GE 資料中心收發信機測試：克服三大挑戰 來源：keysight.com
- intel : PAM4 Signaling Fundamentals 來源：intel.com

CTA