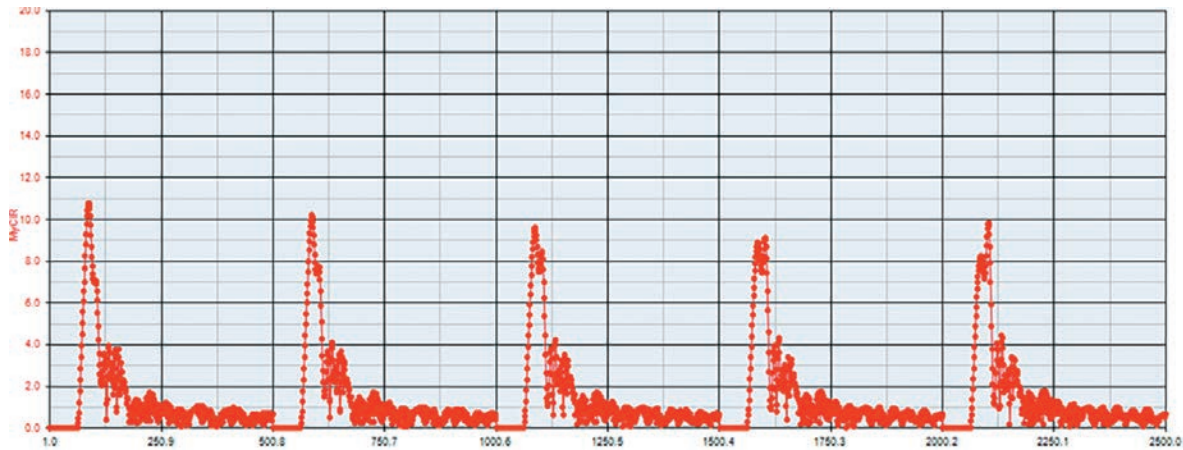


Keysight Technologies

定義通道探量系統，
以便分析 5G 無線介面的特性

應用說明



簡介

新興的 5G 標準必然會將毫米波 (mmWave) 頻率、超寬頻和大規模多路輸入多路輸出 (massive MIMO) 方法整合在一起，以實現其積極前瞻的效能目標。前述每一點都大幅提高了發射器和接收器設計的困難度，但是其中最大變數是用戶端裝置 (UE) 與基地台 (eNB) 之間的空中無線電通道。欲全面分析此通道，則須建立通道效能的數學模型，並透過這些模型來定義新的 5G 空中介面標準。

此外，您必須深入了解各個通道條件，以便成功部署毫米波系統。目前，業界正密切關注在 6 GHz 以下非常密集的頻譜內，各種可行載波頻率上的無線電波傳播。對通道傳播進行完整分析，對於開發出可靠的 5G 無線系統設計至關重要。通道探量技術 (channel sounding) 是深入了解通道的關鍵步驟，有助於實現 5G 預期的資料速率、頻譜靈活性和超寬頻寬。

目前有許多不同的量測方法可供使用，每種方法各有其優缺點。是德科技以過往的研究為基礎，研發出充分利用最佳特性，並同時添加新特性的量測系統。我們建議使用的量測解決方案基於市售的硬體和軟體產品，外加其他在機板上 FPGA 中執行即時資料處理而加快 5G 量測速度的軟體。是德科技還提供可確保系統同步和校驗的工具，是獲得準確、可重複結果的必要條件。

特別是，量測系統分析通道效能的能力，有助於研發新的通道模型。定義了新模型之後，可使用 Keysight SystemVue 電子系統級 (ESL) 軟體進行模擬。如此一來，經驗豐富的研發人員可快速部署客製系統並獲得準確的結果。

5G 概述：期望和機會

市場專家提出的積極預測，描繪出 5G 市場願景：行動資料需求激增、無線應用的爆炸式多樣化，以及連網裝置數量的大幅成長。此外，如果上述趨勢持續演進，使用者對整體網路效能和服務品質（QoS）的期望將出現巨大變化。

這種未來情境將為行動用戶帶來許多好處：高速連接、極度可靠的連接性，以及可信賴的 QoS，即便在擁擠環境中也不受影響。到最後，使用者無論在任何時間、任何地點都能獲得最佳的使用者體驗。

然而，相較於 4G 系統，5G 的相關技術要求相當多：

- 資料速率增加 100 倍
- 網路容量增加 1000 倍
- 網路密度增加 100 倍
- 能量效率提高 100 倍
- 1 ms 延遲
- 五個 9 的可靠度 (99.999%)

其中，將資料速率提高 100 倍的訴求格外引人矚目，因為在現今擁擠的射頻頻譜中，這根本不可能做到。此規格驅動了毫米波頻率的研究；業界對無線電波在該頻譜範圍內的傳播特性認識有限，這個趨勢激勵了研究人員對該通道進行徹底的研究、建模和了解。

結果，支援開發過程的硬體和軟體工具至少有三個創新機會：設計、模擬及校驗和驗證。

總體解決方案概述

在任何無線通訊架構中，無線通道對系統效能影響甚鉅。在毫米波頻率運作的 5G 更是如此。由於毫米波的波長極短，因此在大氣中傳播時會被快速吸收。在氧氣、水和二氧化碳分子的共振頻率下，其衰減特別高。

為了充份理解無線通道，您必須量測通道、收集重要特性，並且開發可用於模擬的可靠模型。通道探量法可模擬任何無線通訊系統的運作。發射信號經由大氣傳播，會受到通道條件的影響，然後到達接收器，如圖 1 所示。藉由在接收器執行信號處理演算法，量測系統可萃取在指定頻率上無線通道的特性。

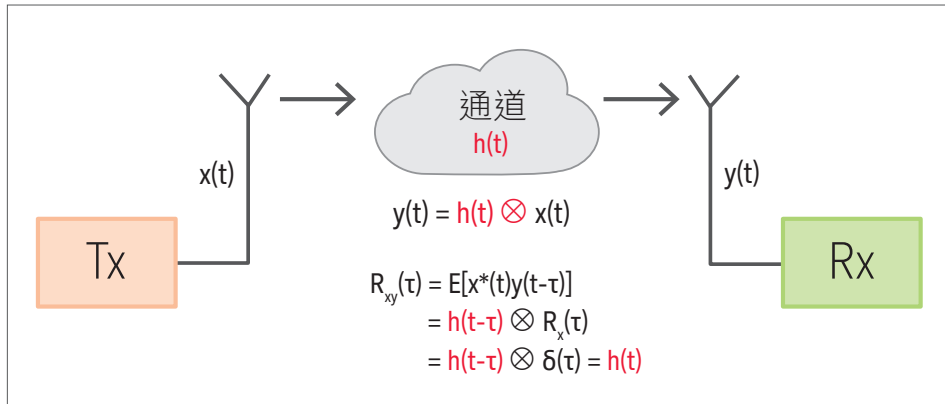


圖 1：使用矩陣數學運算求解 $h(t)$ ，可得到射頻無線通道的近似數學模型。

想要建立所需的數學模型，就需估算各種通道參數。首先是包括通道所有特性的通道脈衝響應 (CIR)，重要參數包括接收角 (AoA)、出射角 (AoD)、都卜勒頻移，以及功率延遲分佈 (PDP)，其中包含可估算的絕對路徑延遲和路徑損耗。還有一些必要的統計參數和建模元素：AoA 和 AoD 的角度擴充 (AS)、功率角度頻譜 (PAS)、都卜勒頻譜、關聯矩陣，以及 Rician K 因數，它跟衰減有關。MIMO 通道導入了空間資訊和關聯性資訊，為 AoA、AoD、AS 和 PAS 等通道參數估算帶來更多的挑戰。

5G 通道探量

為因應全新 5G 毫米波空中介面設計的技術要求，量測系統至少需滿足以下條件：

- 可處理 10 至 90 GHz 範圍，甚或更高的載頻
- 可支援 500 MHz、1 GHz、2 GHz，甚或更高的頻寬
- 可處理 massive MIMO 天線配置

這些要求形成了一個傘形結構的挑戰和五大關鍵技術挑戰，如圖 2 所示。

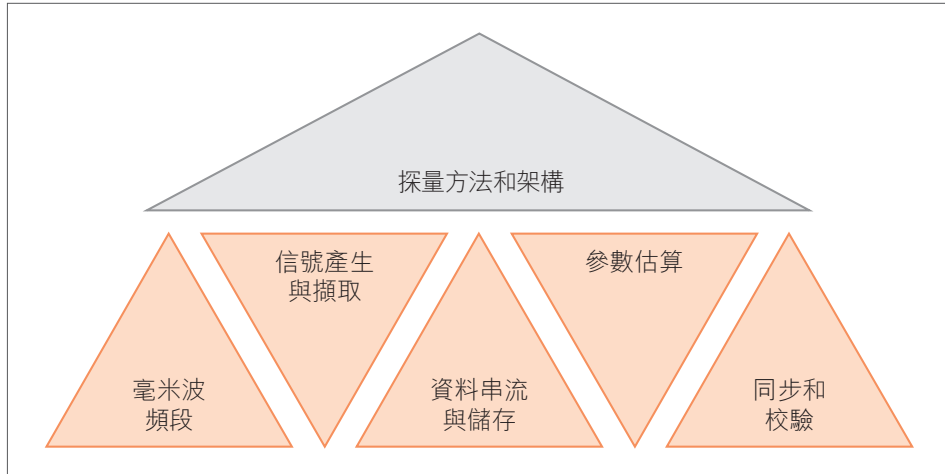


圖 2：在五大技術挑戰驅策下，業界亟需定義通道探量系統的最有效部署方法和架構。

從上圖的頂部開始，最首要的挑戰是為通道探量系統選擇一個最有效的部署方法和架構。由左至右排列的三角形，突顯了必須解決的關鍵技術問題：

- 找到與毫米波升頻（信號產生）或降頻（信號分析）協同運作時，可提供充足效能的射頻和微波（ μW ）測試設備。
- 提供信號產生、擷取和分析所需的頻寬。這會影響類比數位轉換器（ADC）或數位類比轉換器（DAC）技術所要求的時脈速率和位元深度（例如，動態範圍和解析度）。¹
- 透過記憶體來收集和管理大量資料，以便在高取樣率和多通道條件下，進行長時間的探量。²
- 以充足的準確度執行參數估算演算法，以便處理 MIMO 估算所要求的路徑延遲解析度和角度解析度。
- 可對所有量測硬體進行準確的同步和校驗，以確保精確和可重複的結果。

1. 系統效能也必須能夠處理預期的 5G 都卜勒頻率，遠高於類似的 3G 和 4G 情境中的頻率。

2. 要求的總容量是總量測時間、取樣率和通道數的乘積。

不同探量技術的比較

至少有三種不同的基頻處理方法常用來執行通道探量：滑動關聯器、掃描頻率和寬頻關聯性比對。其中最容易部署的方法是滑動關聯器和掃描頻率。這兩種方法都可以有效地量測傳播損耗，但在量測時變（time-varying）通道時，都不太有效，而且量測速度變慢。此外，滑動關聯器僅提供振幅資訊。

相較之下，寬頻關聯性比對更加複雜，但卻是最快速的方法，因為它可量測整個寬頻，並可更快速地存取 CIR 資料。寬頻關聯性比對也包括向量量測和分析所不可或缺的相位資訊。結果，在這三種方法中，寬頻關聯性比對成為最受歡迎的方法。

評估 MIMO 探量方法

許多探量系統整合了單路輸入單路輸出（SISO）量測。而 MIMO 是 5G 關鍵技術，因此進行通道特性分析時須加入 MIMO 量測。進行 MIMO 量測時，有三種常見的方法可用來發射和接收重要信號：在發射器和接收器端使用切換器進行切換、使用並聯發射和接收，或是在發射器端使用切換器切換並且執行並聯接收（參見圖 3）。¹

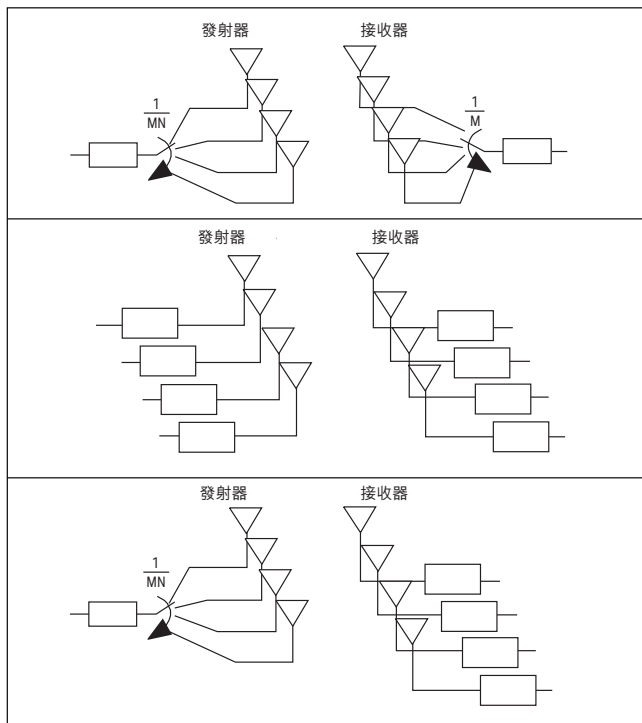


圖 3：這三種方法可實現 MIMO 量測：切換式發射和接收（上方）、並聯發射和接收（中間），以及切換式發射和並聯接收（下方）。

雖然全並聯方法提供最快速的量測，卻也導致各發射通道之間產生交互干擾，這可能會降低探量量測的效能。這個問題不會影響切換式發射 / 並聯接收或全切換式方法。

相較之下，切換式發射和並聯接收比全切換式技術更快速。切換式發射和並聯接收方法不但速度快，而且不會產生交互干擾，是更理想的選擇。

1. 第四個選擇，並聯發射和切換式接收，會在接收端遺失太多有效的資訊。

建議採用的解決方案

從先前的比較來判斷，是德科技選擇使用寬頻關聯性比對作為基頻探量技術，並使用切換式發射 / 並聯接收方法，來評估 MIMO 資料擷取。這可提供三個重要的技術優勢：更快的量測速度、MIMO 探量功能，以及卓越的測試效能（交互通道干擾最低）。

圖 4 展示其基本架構。在左邊，發射器端包括單通道寬頻信號產生器和毫米波切換器。在右邊，接收器端使用寬頻多通道接收器來執行並聯信號擷取。您可用高效能數位轉換器或寬頻向量信號分析儀來部署寬頻多通道接收器。

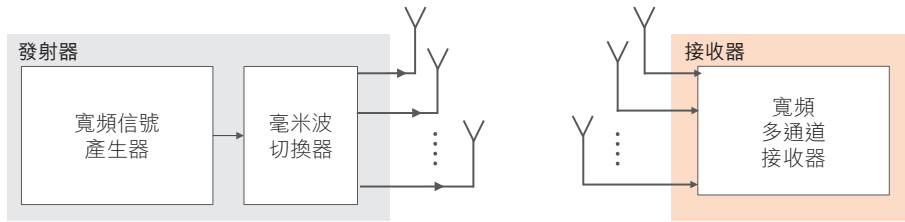


圖 4：此方塊圖描繪出切換式發射 / 並聯接收架構的基本部署。

圖 5 顯示通道探量系統更詳細的結構。寬頻信號產生器包括寬頻任意波形產生器（AWG）和毫米波向量信號產生器（VSG）。AWG 提供用於調變 VSG 輸出的同相和正交（I/Q）信號，毫米波切換器可依序將 VSG 輸出路由至發射天線。在接收器端，多通道降頻器將接收到的信號轉換為多通道數位轉換器的中頻頻寬。

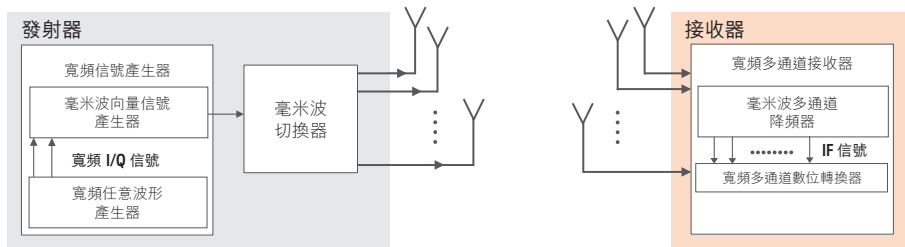


圖 5：為了有效管理成本、大幅提高可用性並確保可支援性，推薦的解決方案使用 COTS 儀器來部署建議的架構。

硬體元件概述

圖 6 展示建議使用的量測硬體元件。為了確保一致的時基，各個子系統均連接 10 MHz 鉤頻率標準（例如 TaiFuTe HJ5418B 鉤鐘）。

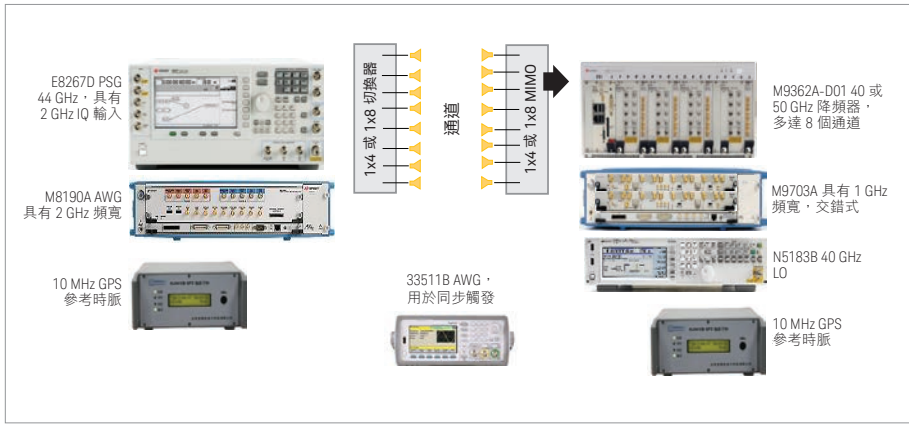


圖 6：左邊為發射器子系統，右邊為接收器子系統。

表 1 提供發射器和接收器子系統中主要硬體元件的功能敘述。以這些必要元件為起點，您可修改測試平台以符合特定要求：通道數、載頻、分析頻寬等等。¹ 如需關於資料儲存和資料流傳輸的更多資訊，請參見側欄說明。

表 1：發射器和接收器子系統使用 COTS 硬體來部署通道採量系統。

	說明	功能
發射器子系統	向量信號產生器	使用差動 I/Q 輸入產生頻率高達 44 GHz 的寬頻信號。在 20 GHz 時，輸出功率為 +23 dBm；在 40 GHz 時，輸出功率為 +13 dBm。差動外部 I/Q 輸入支援的調變頻寬高達 2 GHz。可用的升頻器可轉換超過 44 GHz 的頻率。
	任意波形產生器	雙通道任意波形產生器在高達 2 GHz 的頻寬上，使用基頻 I/Q 調變信號驅動向量信號產生器的調變輸入。
	固態切換器	透過各個發射天線提供排序的串列輸出。
接收器子系統	PXIe 四輸出降頻器	連接到接收器天線，並對高達 50 GHz 的毫米波信號執行相位同調轉換，使其降頻為基頻信號，以進行數位處理。
	PXI 混合放大器 / 衰減器	提供 4 個中頻信號調節通道。
	AXIe 12 位元高速數位轉換器 / 寬頻數位接收器	對每個模組的 8 個通道進行高速、高解析度、相位同調量測。模組上的 FPGA 可執行即時 CIR 計算。
	AXIe 2、5 或 14 插槽機箱	可在發射器和接收器機箱中安裝高速數位轉換器和 AWG 模組；為具備多達 16、40 或 104 個接收器通道的系統提供基礎。
	PXIe 18 插槽機箱	可安裝降頻器和信號調節模組以及嵌入式控制器。具備充足功率，可支援 4 個四路降頻器和 4 個放大器模組。
	PXIe 高效能嵌入式控制器	內建於 PXIe 機箱，可控制接收器子系統中的 PXIe 和 AXIe 機箱。
	MXG X 系列微波類比信號產生器	為降頻器提供低相位雜訊 LO 信號，以確保相位同調性。高輸出功率確保 MXG 可使用分路器，為多個降頻器提供輸入。
	可產生任意波形的波形產生器	提供同步觸發器。

估算資料儲存和資料流傳輸需求

因為採量量測的持續時間可能非常長，所以可能需要對原始 I/Q 或 CIR 資料進行精簡、儲存或資料流傳輸。您可使用以下公式來計算所需的資料容量：

$$N_{cap} = T_s \times F_s \times N_{Rx}$$

- T_s 是採量量測的總時間
- F_s 是取樣率
- N_{Rx} 是並聯接收信號的通道數
- N_{cap} 是總擷取資料量，單位為樣本

在 5G 通道採量中， F_s 必須夠大，以便擷取超寬頻寬，而 N_{Rx} 很大，是因為使用了 massive MIMO 配置。舉一個簡單的例子，比如 1 GHz 取樣率和 8 個接收器通道：每秒量測所需的容量是 8 Gsa (1 s x 1 GHz x 8 通道)。如果每個樣本包括四個位元組 - 兩個用於 I 資料，兩個用於 Q 資料 - 則需要 32 GB 的儲存容量。

1. 如需產品型號和必備選項的完整資訊，請參見《5G 通道採量參考解決方案》手冊，文件編號 5992-0983EN。

必要軟體元件概述

圖 7 為評估新通道時執行之資料分析步驟的典型流程圖。圖中顯示關鍵元件之間的關係和資料流程，並且進行建模，以提供每個區塊執行的一些主要功能的摘要。

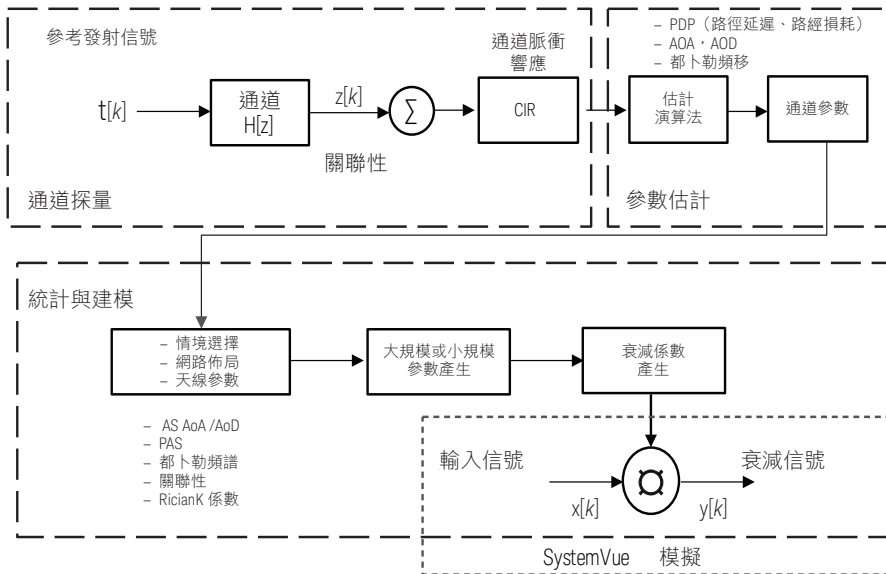


圖 7：這些軟體元件是提供必要功能和特性的關鍵，包括通道探量、參數估計、統計和建模以及模擬等。

針對通道探量（圖 7，右上），參考解決方案使用是德科技快速入門工具套件，其配置和校驗工具可簡化並加速複雜的通道探量分析過程。

在收集必要資料時，M9703A 數位轉換器內建的 FPGA 提供即時關聯性比對和計算 CIR 資料所需的即時資料處理功能（圖 7，左上）。這種系統內資料精簡功能使得資料流傳輸和儲存變得更容易管理。資料流傳輸的要求，取決於 MIMO 陣列大小、取樣率和 CIR 資料量。

產生的資料也可用於後期處理時估算其他通道參數。如需對所獲得信號進行完整的後期處理分析，可使用 SystemVue 平台中不同的模型來萃取通道參數（圖 7，右上）。Keysight 89600 VSA 軟體也可用來進行信號解調變和向量信號分析。這些工具讓您能全面地探索當今最複雜信號的各個層面，並利用所獲得的知識建立更好的通道模型。¹

經過配置後，SystemVue 可提供三大必要特性：信號產生、參數萃取和通道模擬。例如，通道探量信號就是該系統的重要特性。無論您是已經有了通道激發，還是想要利用新的變數進行試驗，SystemVue 都可為您提供必要的工具來產生 I/Q 信號，並將它們下載到 AWG。¹ SystemVue 也可使用空間交替廣義期望最大化（SAGE）演算法（選配），來執行客製通道參數萃取。最近的創新，使得 SAGE 演算法更適合用於 MIMO 系統。

完成通道建模後，您可使用 SystemVue 5G 基頻驗證程式庫（W1906EP）來對新通道模型進行鏈路級模擬，包括 MIMO 通道的擴充機制（圖 7，右下）。整合式模擬環境讓您能夠使用硬體迴路（hardware in the loop）演算法來研究、部署和驗證系統特性，以便透過 FPGA 的即時協同驗證，來驗證和加速演算法。

1. 您也可以使用 Keysight Signal Studio 客製調變軟體（N7608B）或波形產生器軟體（M9099）來產生並下載通道探量信號。

確保量測準確度

為了獲得準確的結果，您需進行系統同步與校驗。通道探量系統必須能夠量測和評估自己的相位和振幅缺損，並對以下誤差進行補償：

- 通道間相位誤差
- 天線的振幅和相位誤差
- I/Q 失配誤差
- 頻譜平坦度誤差

參考解決方案可對以下量測進行校驗：

- 系統脈衝響應
- I/Q 失衡
- 多通道振幅和相位偏差
- 功率位準
- 透過來自使用者或天線製造商的天線碼型資料資料進行天線校驗

發射器和接收器子系統的正确同步，可確保量測絕對延遲等關鍵參數時，可獲得準確結果。因此我們建議採用包括兩個 10 MHz 鉤鐘和一個觸發信號源（例如 33511B 波形產生器）的配置。這些元件共同運作，可在發射器端產生信號，並在接收器端協調信號擷取。隨附的 I/O 管理軟體簡化了儀器控制等級，進而實現所要求的時序和同步。

通道參數估算

通道參數估算演算法可分為 3 類：

- 基於波束成形的演算法
- 基於子空間的演算法
- 基於最大似然率（ML）的演算法

基於波束成形的演算法簡單但估算效能低。基於子空間的演算法具有較好的效能，但是可估算的最大路徑數量少於接收天線的數量，不適用於更複雜的通道情境。基於最大似然率的演算法（例如 SAGE）廣為工程師接受並採用，因為它有一流的估算準確度，可使用參數聯合估算器來估算多個通道參數，而且最大估算路徑數量不受天線陣列單元數量的限制。

檢查範例系統的結果

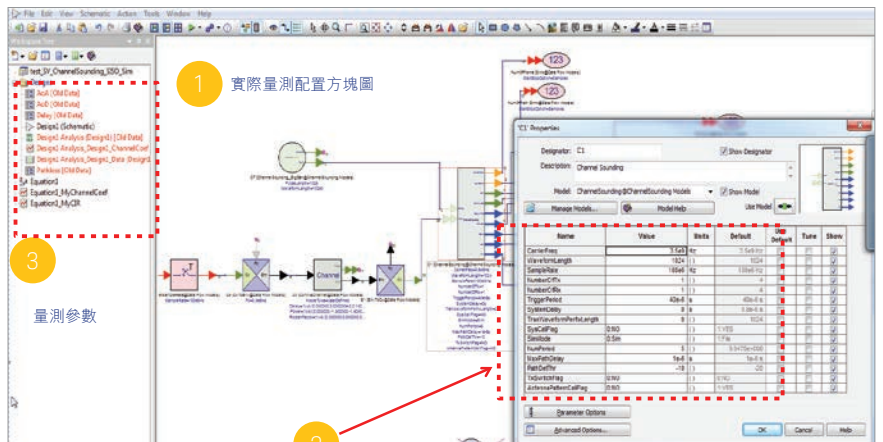
圖 8 顯示可進行 4x4 多路輸入多路輸出 (MIMO) 通道探量的範例系統部署。左邊推車上的是發射器子系統，右邊的是接收器子系統。

藉由部署數位轉換器 (M9703A) 中嵌入式 FPGA 的即時關聯性處理，您可將所產生的壓縮資料存入板載記憶體。而擷取到的 CIR 信號可透過 PCIe 匯流排進行即時傳輸。

圖 9 顯示來自 SystemVue 5G 驗證程式庫的範例螢幕，您可在螢幕上指定 CIR 資料擷取的儀器配置和通道參數估算的後期處理。接著可使用這些工具和圖中系統產生的通道參數來估計結果，如圖 10 所示。



圖 8：該範例部署顯示在 28 GHz 載頻和 1 GHz 分析頻寬下的 4x4 MIMO 量測。它可進一步擴充為 44 GHz 載頻和 1 GHz 頻寬下的 8x8 MIMO。



2 在對 CIR / AoA/AoD / 都卜勒頻率 / 路徑延遲 / 路徑損耗等量測參數進行後期處理之前的設定選項

圖 9：SystemVue 通道參數估算功能可萃取關鍵參數，例如路徑損耗、路徑延遲分佈、AoD 和 AoA。

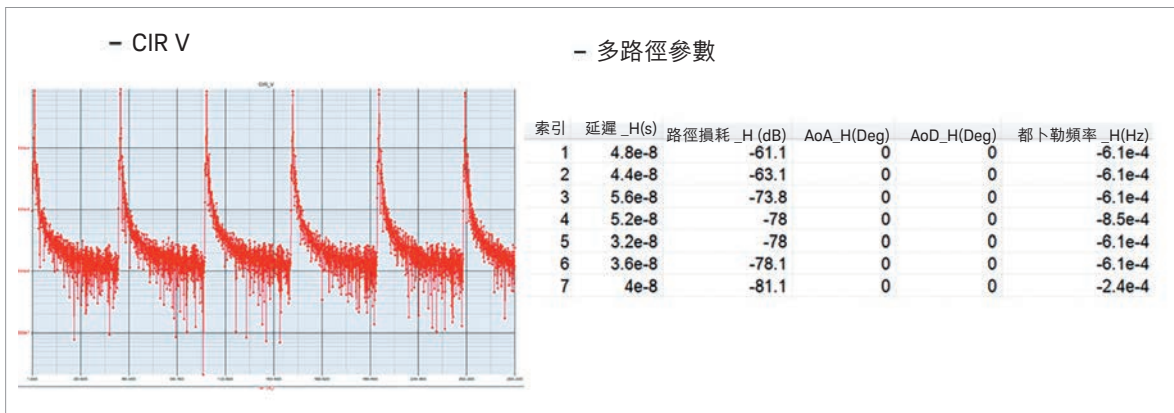


圖 10：該量測顯示多路徑通道的通道脈衝響應和通道萃取。

最後需注意的是，可使用毫米波升頻器和降頻器，例如 Virginia Diodes 公司的 N9029AV15 (涵蓋 50 至 75 GHz 的頻率)，將範例系統擴充至更高的頻率。¹

1. 還有其他頻段可供使用，視應用需求而定。

結語

新興 5G 標準整合多項卓越技術，以實現其積極衝刺的效能目標，使得發射器和接收器設計出現許多挑戰，其中最大的未知數是毫米波載波上的空中無線通道。為了全面分析並理解這些未知挑戰，您須建構數學模型，透過模型來定義新的空中介面標準。

是德科技參考解決方案使用寬頻關聯性比對作為基頻探量技術，並使用切換器來切換發射 / 並聯接收，讓您能順利擷取 MIMO 資料。此解決方案有三大優點：快速的量測速度、MIMO 探量功能和卓越的量測效能。

藉由使用 COTS 硬體和軟體單元，加上特定應用工具，參考解決方案可快速並準確地評估通道效能，如此有助於新通道模型的研發。建立新模型後，就可以在 SystemVue 中模擬這些模型，並使用硬體迴路驗證演算法進行驗證。如此一來，您可用更短時間進行更多探索、加深對通道的理解，最後建立可提供最佳使用者體驗的 5G 生態系統。

參考資訊

- 型錄：5G 通道探量參考解決方案，文件編號 5992-0983EN
- 型錄：SystemVue 電子系統級 (ESL) 設計軟體，文件編號 5992-0106EN
- 產品規格書：W1906BEL 5G Baseband Exploration Library 軟體，文件編號 5992-0218EN
- 型錄：89600 VSA 軟體，文件編號 5990-6553EN
- 型錄：使用 Signal Studio 軟體簡化信號產生程序，文件編號 5989-6448EN
- 技術總覽：M9099 波形產生軟體，文件編號 5991-3153EN
- 產品規格書：E8267D PSG 向量信號產生器，文件編號 5989-0697EN
- 產品規格書：MXG X 系列信號產生器，文件編號 5991-3131EN
- 產品規格書：33500B 系列波形產生器，文件編號 5991-0692EN
- 產品規格書：M8190A 任意波形產生器，文件編號 5990-7516EN
- 技術總覽：85331B/85332B 固態切換器，文件編號 5989-4960EN
- 產品規格書：M9362AD01 PXIe 四路降頻器，文件編號 5990-6624EN
- 產品規格書：M9352A PXI 混合放大器 / 衰減器，文件編號 5990-9964EN
- 產品規格書：M9703A AXIe 12 位元高速數位轉換器 / 寬頻數位接收器，文件編號 5990-8507EN
- 產品規格書：M9502A 和 M9505A AXIe 機箱，文件編號 5990-6584EN
- 產品規格書：M9514A 和 M9521A AXIe 14 插槽機箱和系統模組，文件編號 5991-3908EN
- 產品規格書：M9037A PXIe 嵌入式控制器，文件編號 5991-3661EN

薪火相傳 - 惠普將火炬傳給安捷倫， 再由安捷倫交棒給是德科技

75 年來，我們始終如一地為您提供精湛的量測洞察力。我們獨一無二的硬體、軟體及專家組合，可協助您拓展全新的局面。

我們自 1939 年開始致力於解開量測世界的所有難題。



1939

未來

myKeysight

myKeysight

www.keysight.com/find/mykeysight

透過個人化頁面查看與您息息相關的資訊。



三年保固

是德科技的卓越產品與長達 3 年保固服務的完美結合，助您一臂之力達成業務目標：增強操作便利性，降低持有成本，增強量測信心。



是德科技保固保證方案

www.keysight.com/find/AssurancePlans

是德科技提供長達十年保固，以避免任何意外的維修費用，確保儀器能夠在規格範圍內運作，讓您能永遠信賴儀器提供的量測準確度。

是德科技 Infoline 網站

Keysight Infoline

www.keysight.com/find/service

Keysight Infoline 網站可協助您更有效率地管理儀器資訊。您可隨時上網查看貴公司的儀器報表和電子資料庫。

是德科技銷售夥伴

www.keysight.com/find/channelpartners

兩全其美：是德科技專業的量測技術與齊備的產品，搭配是德科技銷售夥伴的服務與彈性價格。

www.keysight.com/find/5G

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

聯絡窗口查詢：

www.keysight.com.tw/find/contactus

台灣是德科技網站：

www.keysight.com.tw

台灣是德科技股份有限公司

免費客服專線：0800-047-866

104 台北市復興南路一段 2 號 7 樓

電話：(02) 8772-5888

324 桃園市平鎮區高雙路 20 號

電話：(03) 492-9666

802 高雄市四維三路 6 號 25 樓之 1

電話：(07) 535-5035



www.keysight.com/quality

是德科技 -

DEKRA Certified ISO 9001:2008

品質管理系統。

本文件中的產品規格及說明如有修改，恕不另行通知。

© Keysight Technologies, 2017

Published in USA, December 1, 2017

中文版：5992-1064ZHA

www.keysight.com.tw



Unlocking Measurement Insights