

揭開空中 (OTA) 測試的神秘面紗： 重要之天線參數，測試系統設置和校準

2020/2 LARRY CHENG

3.系統校準/校正



圖 17：VNA 上的端口校準

無論何時測量 DUT，測量結果都不應取決於測試設置。因此，每個測量設置都需要校準。為了校準傳導設置，網路分析儀 (VNA) 可以直接測量所用電纜的散射參數。測試儀器使用電纜的頻率響應信息和反射係數來補償這些影響。對 DUT 的連續測量將在 DUT 輸入端提供清晰的信號，並且接收到的信號參數將反映 DUT 輸出端的實際參數。換句話說，所有測量都相對於位於 DUT 連接器上的新定義的“校準平面” (圖 17)。現代化的訊號產生器和訊號頻譜分析儀可以使用測試設置的散射參數來移動其測量的校準平面，這類似於網路分析儀的端口校準。取決於測試設備的功能，儀器能夠補償振幅和相位的頻率響應，同時可以補償反射特性。

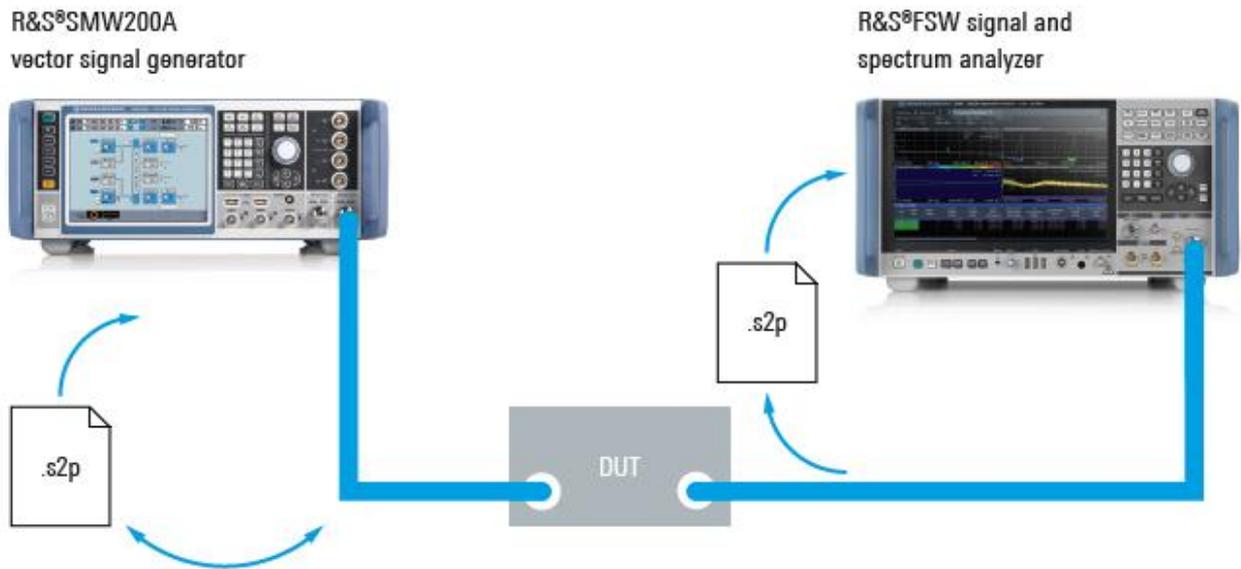


圖 18：在訊號產生器和訊號分析儀上的分散參數文件

OTA 設置也必須進行校準。像所有其他組件一樣，OTA 鏈路具有一定的頻率響應，與傳導設置相比通常具有更高的衰減。另外，儘管一定長度的電纜具有固定的衰減，但 OTA 測量距離可能會輕易且無意地發生變化，從而導致衰減差異，尤其是相位差異。甚至在旋轉 DUT 時，即使是很小的定位誤差或測試夾具的機械缺陷，也會出現偏差。因此，穩定的測量距離和高定位精度至關重要。由於 DUT 或 AUT 的至少一個接口將處於空中，因此無法進行典型的端口校準或散射參數測量。雖然可以通過這種方式來特性描述系統的各個部分，並且可以計算出自由空間路徑損耗，但是對系統頻率響應的直接測量必須使用不同的方法。確定任何 AUT 增益的最簡單過程是將未知天線與已知參考天線進行比較，這稱為增益傳輸方法。通過用兩個天線測量一次完整設置並比較結果，可以確定未知天線的實現增益：

$$L_{sys} = P_{TX,ref} + G_{ref} - P_{RX,ref}$$

$$G_{AUT} = P_{RX,AUT} + L_{sys} - P_{TX,AUT}$$

With $P_{TX} = P_{TX,ref} = P_{TX,AUT}$ and inserting the system loss L_{sys} :

$$G_{AUT} = G_{R,ref} + P_{RX,AUT} - P_{RX,ref}$$

所有值均以 dB 和 dBm 為單位。 L_{sys} 是整體系統損耗， P_{TX} 是 AUT 和參考天線的發射機功率。 $P_{RX,ref}$ 和 $P_{RX,AUT}$ 分別是系統參考天線和 AUT 天線接收的功率。 G_{ref} 是已知的參

考天線實現的增益，而 G_{AUT} 是未知的 AUT 天線實現的增益。按照相同的原理，可以通過在適當位置安裝參考天線來測量系統的傳輸係數，然後從傳輸中減去已知的參考天線增益，來確定測量系統的頻率響應。只要最大增益的方向指向探測天線的方向，就只需知道並測量參考天線的峰值增益。對於參考和 AUT 測量，OTA 鏈路的距離必須相同。要測量天線方向圖，需要使用定位系統來移動，旋轉，平移或傾斜 DUT，並且參考天線相位中心必須與定位器的旋轉中心對齊（請參閱第 3.1.2 節）。建立整個系統的絕對衰減稱為路徑損耗校準。此校準類型可用於所有 FF 和 IFF 測量。對於使用任意 DUT（或 AUT）進行的所有連續測量，取決於天線和測量類型，可以從測量值中消除已知的系統損耗以獲得 DUT 增益或 EIRP。校準數據可以由控制設置的外部自動化軟體處理，也可以直接應用到測試設備（如果支持）。是否僅針對振幅（包括相位信息）進行校準取決於所需的測量以及所使用的系統和設備。為了特性描述 FF 中的天線參數，不需要校準相位。進行 NF 測量時，測量數據的轉換需要相位信息。對於所有其他 DUT 測量，由用戶決定感興趣的信息並對應地選擇校準方法。

3.1 OTA 系統的組成部分和挑戰

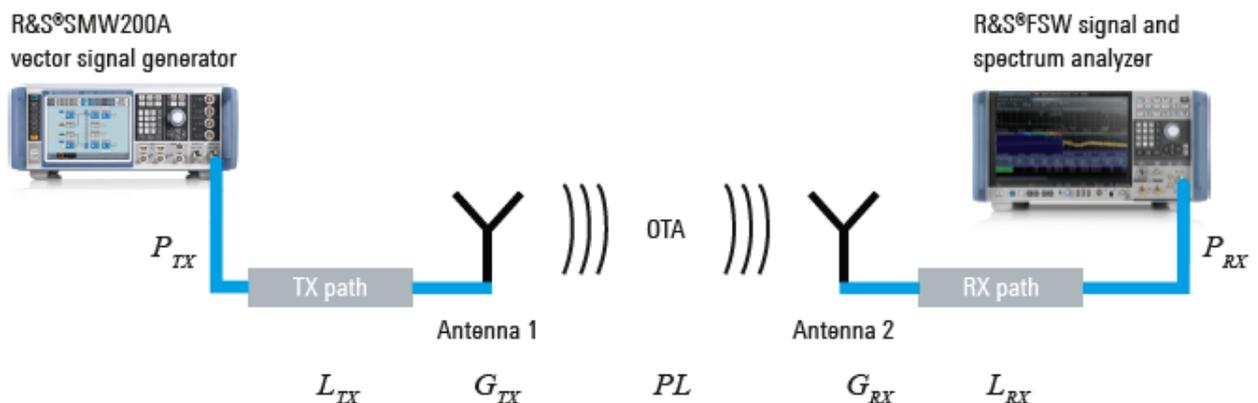


圖 19：通用 OTA 設置圖

與每種測量設置一樣，OTA 測試系統可以整體描述，也可以分為幾個部分。圖 19 顯示了通用的 OTA 設置。關於 OTA 測試，DUT（AUT）將替代“天線 1”或“天線 2”。根據 DUT 的位置，它可以分別在發射或接收模式下運行。無論操作模式如何，校準整個系統

的最簡單方法是先測量到 DUT 的電纜，然後再測量剩餘電纜的 OTA 路徑。為了簡化描述，假定 DUT 代替“天線 1”，所有測量也適用於接收模式。如果 DUT 具有基頻處理功能，則操作不需要直接連接 DUT 的電纜，但校準仍需要。首先，確定 L_{TX} 在參考天線（天線 1）處達到某個已知的功率準位。然後，在另一個步驟中對其餘系統進行校準，並且在 DUT 測量期間僅使用此數據。為了簡化框圖，單個黑框表示從測量設備到相應天線的連接的組合頻率響應。它可能由多個被動或主動元件組成，還可以包含根據設置而可切換的路徑。

3.1.1 自由空間路徑損耗

在沒有反射的自由空間中執行 DFF 測量時，可以使用自由空間路徑損耗 (FSPL) 計算通過空中傳輸的信號的頻率相關衰減，

$$FSPL = \left(\frac{4\pi df}{c} \right)^2, \quad FSPL(dB) = 20 \cdot \log_{10}(d) + 20 \cdot \log_{10}(f) - 147.55,$$

其中 d 是天線之間的距離， f 是頻率， c 是光速，並且 $d \gg c/f$ ，至少使兩個天線彼此處於 FF 中。通常，將 OTA 路徑視為系統中的任何其他組件。類似於兩條帶有不同連接器的同軸電纜需要使用適配器進行連接的方式，必須使用天線“匹配”從同軸電纜到空氣的連接。OTA 路徑和天線都會引入頻率相關的衰減和增益。

與電纜衰減相比，FSPL 在典型的測量距離處具有更高的路徑損耗。例如，一條 5 米電纜在 1 GHz 下的衰減通常低於 2 dB，而相同距離和頻率下的自由空間路徑損耗約為 46.4 dB。在 40 GHz 時，電纜和自由空間的衰減分別約為 13 dB 和 78.5 dB。因此，即使在很小的距離和所有頻率範圍內，系統中也會出現明顯的衰減。如前所述，OTA 損失將構成系統中的大部分損失。但是，在大型暗室中用毫米波進行測量需要較長的電纜，即使在設置的傳導部分，也需要大量額外的損耗，從而進一步降低了接收信號的準位。因此，一般的 OTA 應用，特別是毫米波應用，要求測試設備具有較高的動態範圍。

3.1.2 定位系統

如果測試範圍帶有某種定位設備，則必須將 DUT 的相位中心放置在定位設置的旋轉中心。這樣，DUT 和探針天線之間的距離就保持恆定，與測量角度無關。因此，路徑損耗

校準僅需針對單個方向進行，因為所有方向均顯示相同的路徑損耗和相移。隨著頻率增加，波長越短，正確定位在相位中心就變得越重要。機械設置會增加測量不確定度，具體取決於定位的精度和所使用的頻率範圍。

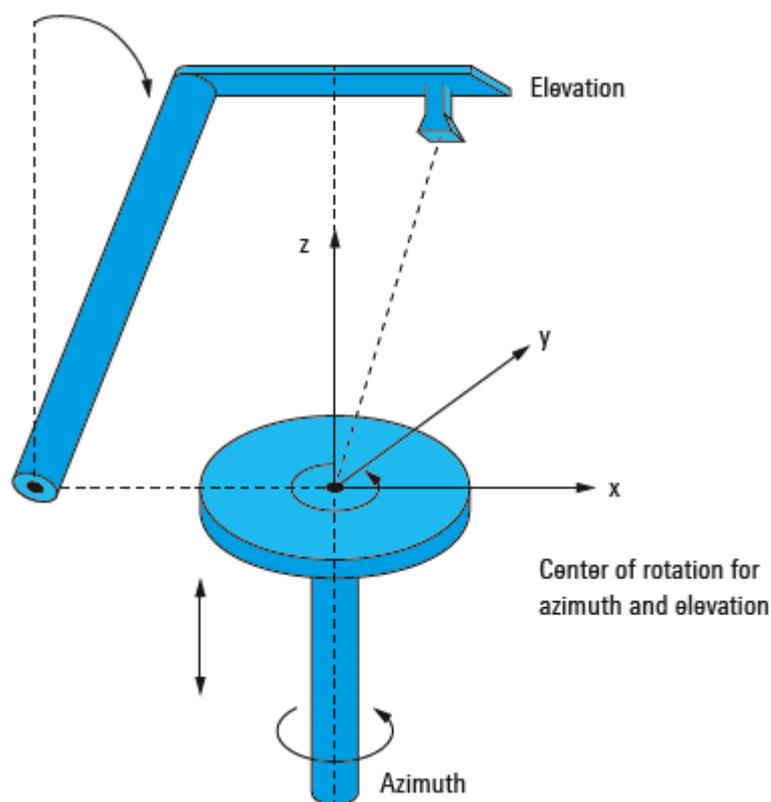


圖 20：定位器系統中的旋轉中心

3.1.3 不同類型測試範圍的細節

不同類型的測試範圍，例如 FAC，CATR，PWC 或 NF 中的 DFF 需要採取其他預防措施以正確使用這些暗室。對於 FAC 中的測量，吸收器質量是創建精確測量值的關鍵因素之一。吸收體的材料和形狀以及暗室尺寸限制了各個暗室的可用頻率範圍。對於 CATR 系統，反射器或透鏡與饋電天線的對準尤為重要。為了獲得最佳性能，饋電天線必須在焦距上。此外，對於反射型 CATR，必須在饋電天線周圍使用附加的吸收器來減輕由饋入淨空區所引起的干擾。

利用平面波轉換設置，測量陣列中所有天線元件的振幅和相位的校準和精度定義了淨空區的質量。因此，除了在所有 FF 系統上執行的典型路徑損耗校準之外，測量陣列本身的

校準也是關鍵。通常，專用校準天線陣列用於此任務。對於 NF，高定位精度是必需的，包括對機械對準的嚴格要求，尤其是在高頻測量的情況下。通常，在確定特定類型測試範圍的相關預防措施時，務必諮詢當地專家。

3.2 路徑損耗校準

為了補償 OTA 損耗，簡單的路徑損耗校準是校準 OTA 設置的最直接方法。由於在校準後 DUT 會替換這些天線中的至少一個，因此路徑損耗校準需要使用已知增益的參考天線來代替 DUT。注意增益和已實現增益之間的差異，如第 2.2.5 節所述。如第 3.1.2 章所述，僅對定位系統的單個角度進行校準測量。但是，在交叉極化的探測天線的情況下，由於兩個極化天線具有不同的特性並連接到不同的信號路徑，因此需要對兩個極化進行校準。在路徑損耗校準期間，參考天線和測量天線的主波束方向（峰值增益方向）必須對齊，彼此直接面對並具有匹配的極化方向。此外，參考天線的相位中心位於定位系統的旋轉中心（請參見圖 20）。如果不使用定位系統，則將空間中的固定點確定為校準位置。對於後續測量，DUT 的相位中心位於完全相同的位置。

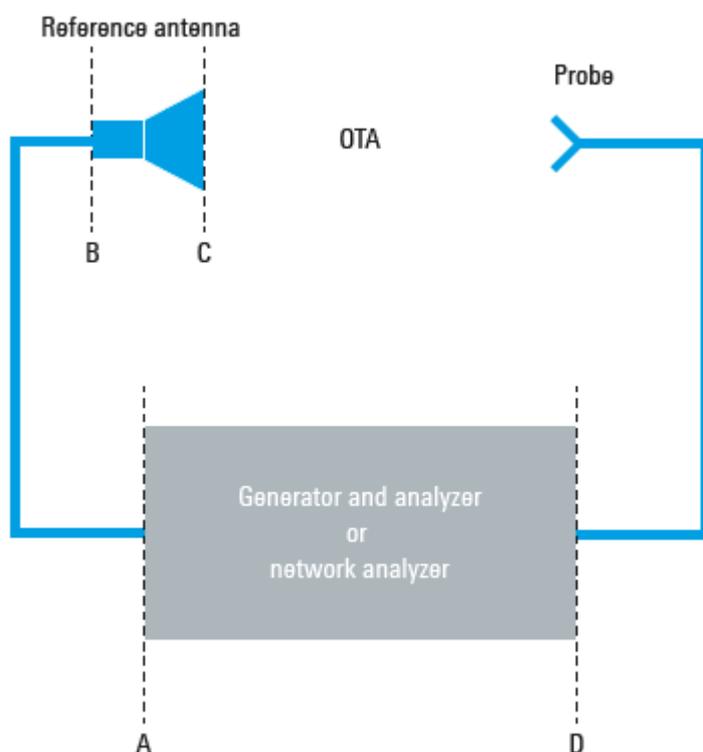


圖 21：系統中校準點的框圖

圖 21 顯示了典型 OTA 系統中感興趣的不同校準平面。通常，確定參考天線任一側的校正值。根據 DUT / AUT 的類型，需要了解兩個單獨的損耗 L_{AB} 和 L_{CD} ，同時也可以僅了解整個系統損耗 $L_{AB} + L_{CD}$ 來進行一些更簡單的測量。在測量天線方向圖和完全被動 AUT 的已實現增益時，信號損耗發生在 A-B 還是 C-D 並不重要。天線方向圖和實現的增益將保持不變，而與點 B 處的信號功率無關。但是，如果要評估天線的匹配性，則需要對 A-B 和 C-D 進行單獨校準。這對於具有非線性功率響應的所有 DUT 均有效。如果 DUT 在沒有任何 RF 連接的情況下主動生成或接收信號，則只關注 L_{CD} ，而在校準過程中則需要 L_A 。

3.2.1 所有 DUT 的兩校準步驟

對於圖 21， L_{AB} 是 A 和 B 之間的損耗， L_{CD} 是 OTA 和 C 和 D 之間的電纜損耗，還包括探針天線增益。為了確定 L_{AB} 和 L_{CD} ，需要執行兩步校準程序，其中使用信號產生器和分析儀或網路分析儀確定電纜損耗 L_{AB} 和總體系統損耗 L_{AD} 。 L_{CD} 可以確定為

$$L_{CD}(f) = L_{AD}(f) + G_{ref}(f) - L_{AB}(f),$$

G_{ref} 是已知的已實現參考天線增益，所有值均以分貝為單位。利用已知的兩個校準值，可以用任何未知的 AUT 替換參考天線。在頻率之上，可能需要更大的尺寸，因為取決於測試系統中使用的組件的類型，損耗也會受到所用功率準位甚至環境溫度的影響。始終根據所用組件的相關特性（例如，信號路徑中使用的功率放大器的線性）選擇校準尺寸的數量。

3.3 近場校準

將測得的 NF 數據轉換為 FF 時，並非總是需要進行路徑損耗校準。兩個正交極化都需要振幅和相位信息，才能在後處理中將數據轉換為 FF。可以通過將測量天線（探針）旋轉到正交極化或通過使用雙極化探針進行平行測量來測量兩種極化的數據。同時測量兩個極化可以有效地減少測量時間，但是需要校準數據來補償兩個信號路徑之間的差異。參照兩個信號路徑及其在振幅和相位上的相對差進行平衡，此校準稱為“通道平衡”校準。注意，不必知道在校準期間用於轉換為遠場方向性的參考天線的已實現增益。但是，當執行包括相位信息的絕

對“路徑損耗”校準時，該校準也可以用於 NF 測量和 NF 至 FF 轉換。利用有關參考天線增益的信息，也可以在變換後確定 AUT 增益和效率。因此，在操作 FAC 時，始終校準相位也是有益的-如果可能的話，使用所用的測量設備，因為同一暗室也可以用於 NF 測量。如果在 NF 和 FF 之間的邊界進行測量，則尤其如此。可以使用 NF-FF 變換評估 Fraunhofer 距離區域內的測量質量。將轉換應用於度量可用於識別轉換前和轉換後數據之間的差異。如果 NF 效應在 MU 的範圍內或僅出現在對 DUT 的當前評估不重要的區域中，則可能不需要進行後續測量的轉換。平面波越少，輻射圖越複雜，對 NF-FF 變換的需求就越大。

3.3.1 近場到遠場轉換的進一步要求

為了使 NF-FF 轉換產生有效的 FF 數據（與 DFF 室中的測量結果相當），還必須在後處理中校正測量探針的影響。更精確地，必須補償探針的空間響應。該變換基於以下假設：在空間的單個點中僅測量單個場分量。然而，實際上，探針將對多個場分量做出響應，並且在有限區域內具有空間範圍[8]。差異導致 DUT 輻射的電磁場與探針評估的電壓之間產生偏差。例如，[9]研究了開放式波導和角錐探針的幾何參數對探針接收電壓的影響。如果 NF 測量已經很好地代表了場，則補償的效果會更小[10]。

3.4 校準信號源

如何確定使用 CW 信號，調變信號還是雜訊源是校準的最佳選擇？應該使用哪種功率級別以及最適合哪種類型的接收器？通常，可以使用不同類型的 T & M 設備執行校準。例如，使用任何網路分析儀進行的散射參數測量都可以確定振幅和相位的頻率響應以及反射係數。使用信號產生器和頻譜分析儀，或任何測試源和功率計，可以進行振幅校準，而通常不能進行相位和匹配校準。使用 CW 信號進行校準需要掃頻多個測量點。網路分析儀通常可以在多個測量頻率上快速掃描 CW 信號，而使用產生器和分析儀進行手動掃描可能會更加耗時。因此，調變信號可用於確定給定頻寬上的頻率響應。在此，限制因素是產生器的基頻頻寬和分析儀的分析頻寬。同樣，必須知道調變信號的確切特性，並且信號應顯示平坦的信號頻寬。最後，它幾乎完全取決於哪些設備可用或計劃用於以後的測量。如果要將設備用於測量，則還應將其用於設置校正。否則，由於兩個儀器連接器之間的附加適配，除了兩個儀器的組合測量不確定度之外還需要附加開關或其他校準開銷，測量不確定度可能會增加。對於被動天線

測量，網路分析儀是最明顯的選擇，因為它可以在大頻寬上以高精度快速掃描。它可以確定所有散射參數，並且在振幅和相位上都是準確的。端口校準可用於輕鬆移動校準平面，並且 OTA 校準可用於頂部。對於主動天線測量，由於單獨使用接收器和/或發射器以及對 DUT 參考校準平面執行功率校準的可能性，VNA 仍可能是有效的選擇。當引入調變信號和/或如果 DUT 具有基頻處理功能時，信號產生器和分析儀可能處於領先地位。

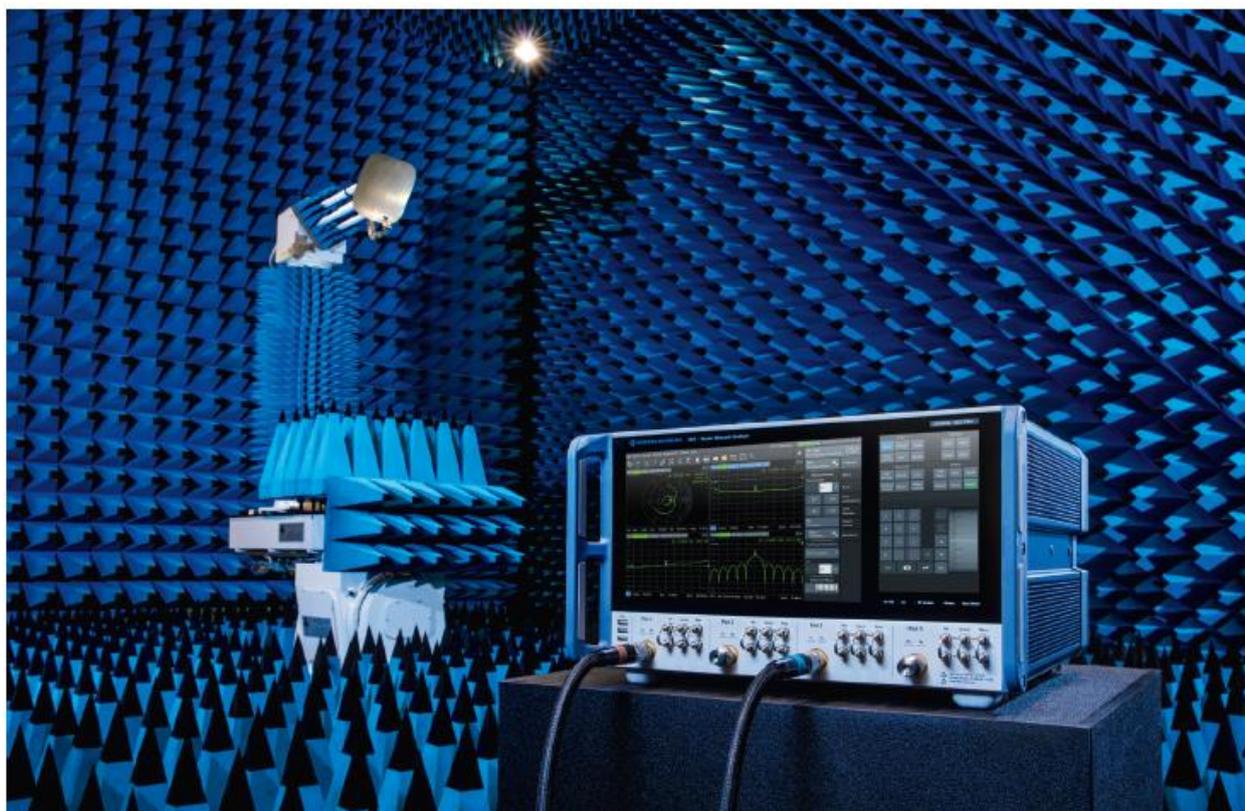


圖 22：用於天線測量的 R & S®ZNA

在確定用於校準的功率準位時，必須考慮暗室的類型和質量。對於具有足夠吸收能力的暗室，在所使用的 T & M 設備中以最小的測量不確定度的功率準位校準系統是有意義的。如果系統中使用了具有不同頻率響應或不同功率準位的非線性組件，則校準值必須對將要運行 DUT 的功率範圍有效。如果預期暗室內的反射可能會對校準值產生不必要的干擾，則功率應盡可能低，使接收器靠近雜訊基底運行。這樣，也可以確定儀器和暗室內的雜訊準位。

3.5 暗室驗證

對於給定的設置，除了鏈路校準之外，用過的暗室必須滿足某些條件，才能在有限的測量不確定度下進行正確的測量。通常，重要的是要驗證暗室的屏蔽和反射吸收質量。對於電磁兼容性 (EMC) 測試，定義並標準化了不同的校準和驗證方法。例如，由 CISPR, ANSI, IEC 和 EN 定義的位置的電壓駐波比 (sVSWR) 測量，歸一化位置衰減 (NSA) 測量或場均勻性測量。對於天線測試，QZ 的質量以及測量的準確性和可重複性非常重要。由於涉及移動或可互換的零件，因此裝置的機械質量也會影響最終的測量精度。

3.5.1 機械對準

當測量相位信息 (例如執行 NF-FF 轉換) 時，DUT 和定位器設置的機械對準特別重要。在短波長下，幾毫米的機械失準會對測量中的相位偏差產生重大影響。在現場驗收期間，必須驗證兩個旋轉軸在旋轉中心相交的對齊。為了使 DUT 相位中心對準此位置，請使用其他方式協助，例如可以使用雷射導引或自動定位。當相位中心和旋轉中心對齊時，可以通過執行翻轉測試以電子方式確認圓錐形定位器沿仰角軸的精度。在此測試期間，針對成對的方位角方向 (偏移 180°)，在正負方向上的高程上測量了多個高程切口。對於每一對，在具有第一方位角方位的正向高度處測量的振幅與在第二方位角負方位角處測量的振幅相同，反之亦然。例如，在 0° 方位角， 10° 仰角處的測量與 180° 方位角， -10° 仰角相同。相位將發生 180° 偏移。如果方位角和仰角旋轉中心未完全對準，則測量中會出現差異。

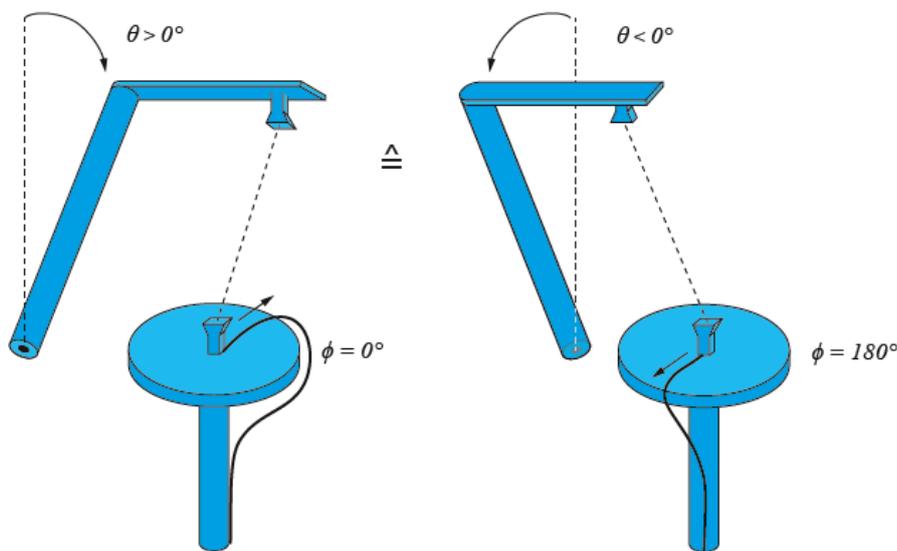


圖 23：翻轉測試方法

3.5.2 淨空區域驗證

對於所有類型的暗室，淨空區域 (QZ) 定義了振幅和相位與平面波標準的偏差受到限制的區域。對於 DFF 測量，主要是相位將連續偏向 QZ 的邊緣。由於測試範圍的佈局，這無法緩解，因為它是測試範圍佈局所固有的。暗室中有害的殘留反射會產生駐波，從而引起振幅和相位波動，應使用適當的吸收體材料將其降至最低。振幅可能會因探針天線的輻射方向圖而在淨空區域上逐漸變細。對於 CATR 系統，振幅斜度也是由饋源的天線圖案不均勻引起的，該天線圖案在反射的 QZ 中轉換為不均勻的場強。在振幅和相位上都可以觀察到波紋。它們主要是由反射鏡的缺陷引起的。無論如何，必須通過對 QZ 所涵蓋區域內的振幅和相位進行測量來確定 QZ 的質量。使用相同的天線，最好使用自動定位系統，在 QZ 中的不同位置進行測量，以比較相對振幅和相位偏移，並特性描述 QZ 中的斜度和波紋。

3.5.3 最佳化的設備測量

最佳化設備或最佳化樣本是具有已知特徵的 DUT。這是一種驗證測量或校準設置的簡單但可靠的方法。這種設備可用於比較設置中的測量結果與已知的理想值。因此，在路徑損耗校準期間使用參考天線也可以視為最佳化設備。校正實際測量值以適合已知的天線增益。如果重複多次，則對於穩定的設置，期望在測量不確定度範圍內具有相同的結果。除了在校準期間僅評估單個方向的用法之外，還可以關注振幅和相位的 3D 模式，以便評估給定設置中的測量質量。例如，圖案上的偏差可能是由測試範圍內的定位誤差或不必要的反射引起的。當處理比簡單天線之特性描述更高的產品集成度時，將最佳化設備用作參考，可以將所有其他相同類型的設備進行比較。在這種情況下，甚至可能不需要進行系統校準，因為與最佳化設備的比較具有可比較的目的，例如將未知天線的增益與校準中用於天線之特性描述的參考天線的增益進行比較。總之，最佳化設備可用於識別其他 (類似) 設備與“最佳化標準”的任何偏差，也可用於識別測試設置與預期結果的偏差，例如：用於校準，驗證或重複性測試。

3.6 測量不確定度

歐洲電信標準協會 (ETSI) 將測量不確定度本身定義為“與測量結果相關的參數，該參數特性描述了可以合理地歸因於被測量物的值的離散度” [11]。計算測量不確定度非常複雜，需要廣泛了解測試系統中使用的所有組件以及有關要進行測量的 DUT 性能的知識。測量設備的類型、測試範圍、校準、和驗證的方法、以及 DUT 本身都會並且將對總體測量不確定度產生影響。ETSI 已就無線電頻譜問題[11] [12]整理了有關測量不確定度的定義和計算的大量材料，但在本文中不會全部涵蓋。

1. 陣列天線和波束成形

隨著通信系統中毫米波信號使用的增加，更高的信號衰減和減小的天線尺寸導致需要使用組合在一起以形成陣列天線的多個天線。陣列天線允許使用波束成形和波束控制將能量聚焦在某些方向上。這導致更高的信號功率，抵消了由於路徑損耗引起的衰減，並實現了用戶的空間多路多工，因為在不同方向上對用戶的干擾都被定向波大大降低了。天線陣列可以通過一次在多個元件上傳輸信號並在這些元件之間施加相對振幅和相位差來利用波束成形。所有單個元素的波前重疊，從而在所需方向上形成建設性干涉。為了接收，以一定的相位差接收來自不同方向的信號，並且通過將具有各自相位偏移的所有信號相加，僅恢復來自期望方向的信號。

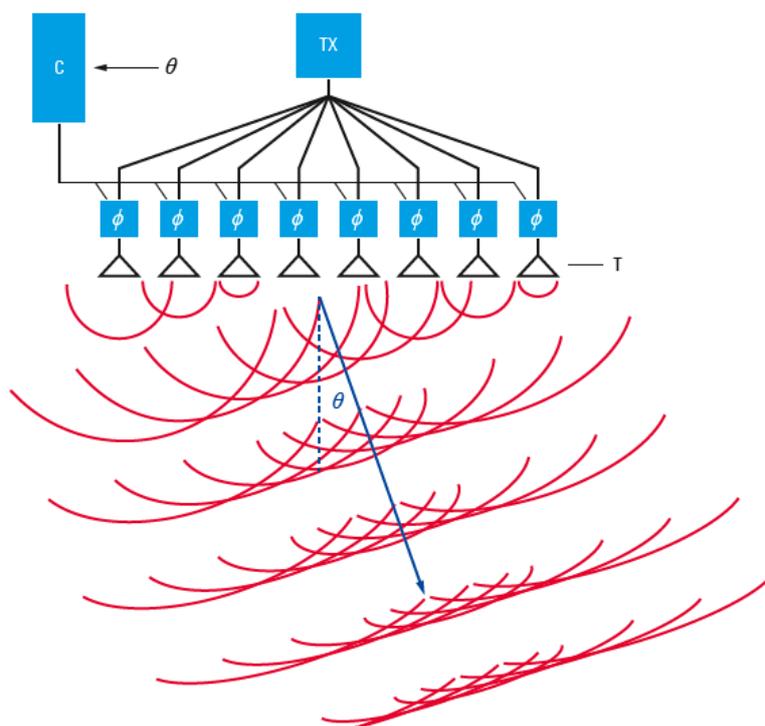


圖 24：如何使用模擬波束成形將波束轉向角度 θ

除了期望的方向之外，該陣列還將產生旁瓣，從而導致在不希望的方向上的建設性干涉。這可以通過各種減少旁瓣的方法來緩解，例如通過使用非均勻元素間距[13]，遺傳算法[14] [15]或通過在陣列上施加振幅斜度，並利用從設計有限脈衝響應（FIR）濾波器。圖 24 顯示了模擬波束成形的概念。對於 DAC 之後的單個信號，在 RF 模式下，對 RF 域中的每個天線元件進行相位調整。模擬波束成形只能將空間濾波器應用於單個信號。模擬波束成形的集成成本相對較低，並且可以更好地覆蓋系統。

相反，在 DAC 處於發射模式之前，數字波束成形在數字域中施加振幅和相位變化。每個元素都需要單獨的 DAC / ADC 和基頻處理。利用數字波束成形，可以沿不同方向輻射同一信號的一部分，或者可以同時接收並分別提取來自不同方向的信號，或者可以減輕來自某些方向的干擾。它還允許頻率選擇性波束成形。數字波束成形更加靈活，可以提高系統的容量。但是，與模擬波束成形相比，它更昂貴且功耗更大。除了模擬和數字波束成形之外，混合形式也是可行的。然後，將數字波束形成器的每個 ADC / DAC 連接到頂部具有模擬波束形成器的多個元件。混合波束成形可用於利用數字波束成形的功能，而無需每個天線元件都需要收發器鏈。

4.1 陣列天線的校準

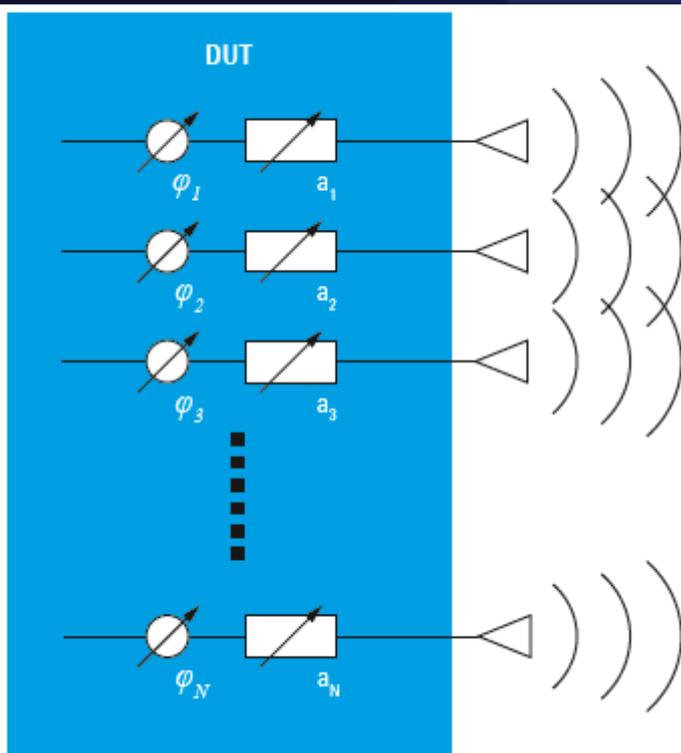


圖 25：陣列天線框圖

由於每個元件的振幅和相位都用於控制合成波束，因此需要對陣列天線的各个元件進行校準。雖然波束成形天線陣列的設計和驗證本身就構成了測試和測量難題[16]，但對這些陣列進行快速、準確的校準在生產中尤為重要。根據連接到天線層的能力，可以執行陣列校準或 OTA 校準。對於進行的測量，振幅和相位差的測量很簡單，可以針對每個元素分別進行。使用 OTA，適用的校準技術取決於 DUT 的類型和功能。通過至少一個 RF 輸入，可以使用外部信號產生器和分析儀或網路分析儀執行校準。如果陣列具有多個 RF 端口，則可以應用多端口網路分析儀解決方案。如果 DUT 具有內部信號處理，則校準類型取決於 DUT 中收發器的功能和數量。對於並行校準，如果可能，用不同頻率的信號激勵一些或所有元素，然後將組合的多音信號用於在單個測量中確定相對於一個定義的參考元素的振幅和相位。類似於分頻多工 (FDMA) 技術，將頻分應用於接收器中來自各個元素的信號分離。類似地，分碼多工 (CDMA) 可用於區分接收器中來自各個元件的信號，從而在單次測量中確定振幅和相位偏移。必須有足夠的基頻處理或信號產生器的 RF 連接器，才能同時在不同的元件上發送不同的信號。如果產生器和接收器共享一個公共參考時鐘並且隨時間相位一致，則完全連續校準或基於時分多址 (TDMA) 的振幅和相位確定非常簡單。如果無法實現相位相干性，則經常切換回參考元素可以建立可以在

後處理中從測量中消除的公共相位誤差。此技術需要 N 次測量才能進行相位相干設置，而最多進行 $2 \cdot N + 1$ 次測量才能實現無相位相干的設置，其中 N 是元素數。在功率級校準期間，成對的元件一次處於活動狀態，並且接收天線位於陣列的視線範圍內。通過依次將一個元素的移相器設置為不同的值並測量兩個元素的組合功率，可以確定所有元素相對於定義的參考元素的相移。當來自兩個元件的信號進行相位對準時，在視軸上可獲得最大功率。與最大值相比，零位（元素之間的 180° 相移）更加明顯，從而更容易，更快地進行零位校準。在不使用邏輯來減小搜索空間的情況下，相位校準需要 $(N - 1) \cdot M$ 次測量，其中 M 是可能的相移設置的數量。對每個元素分別測量每個元素的振幅偏移，增加 N 個測量值。

4. 結論

現代高度集成的芯片組，前端和天線系統需要在許多開發步驟中進行空中測量的新技術。將天線或天線陣列集成到芯片組中對波束成形驗證以及芯片組或放大器測試提出了挑戰。通過在實驗室環境，屏蔽箱或大型電波暗室中使用最新的測試和測量設備，OTA 測試的挑戰很大程度上歸結為了解天線測量和暗室設置中的關鍵挑戰。本文對這兩個主題進行了介紹，從而使工程師們首次接觸 OTA 測試，可以快速掌握用於解決測量問題的關鍵術語和工具。為了總結這一相關工作領域中的關鍵挑戰，對陣列校準進行了介紹。隨著大規模 MU-MIMO 和動態波束成形會在不久的將來進行大規模的部署，這一領域必將有更多的發展。憑藉我們在蜂窩和無線技術，EMC 和 OTA 測試方面的專業知識，R&S 是您可信賴的合作夥伴，可以解決未來的測試和測量難題。

5. 參考資料

- [1] W. L. Stutzman and G. A. Thiele, Antenna theory and design, Wiley, 2013.
- [2] I. S. Committee, "IEEE Standard for Definitions of Terms for Antennas," IEEE Standards Board, 2013.
- [3] M. Reckeweg and C. Dr. Rohner, "Antenna Basics," 2015.
- [4] P. J. Bevelacqua, "Antenna-Theory.com," [Online]. Available: <http://www.antenna-theory.com/> [Accessed 17 12 2018].



- [5] GTRI Historical Archive, "Compact radar range tests antenna performance," [Online]. Available: <https://history.gtri.gatech.edu/history/innovations/compact-radar-range-tests-antenna-performance>.
- [6] T. Hirvonen, J. Tuovinen and A. Raisanen, "Lens-Type Compact Antenna Test Range at mm-Wave," Stuttgart, 1991.
- [7] M. Multari, J. Lanteri, J. L. Sonn, L. Brochier, C. Pichot, C. Migliaccio, J. L. Desvilles and P. Feil, "77 GHz stepped lens with sectorial radiation pattern as primary feed of a lens based CATR," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010.
- [8] C. Taybi, M. A. Moutaouekkil, R. Kwate Kwate, B. Elmagroud and A. Ziyat, "Probes correction for antennas near field measurement," in Lecture Notes in Electrical Engineering, 2016.
- [9] C. Taybi, R. K. Kwate, B. Elmagroud, A. Ziyat and M. A. Moutaouekkil, "Probes characterization for antennas near field measurements," in Mediterranean Microwave Symposium, 2015.
- [10] J. Shi, M. A. Cracraft, K. P. Slattery, M. Yamaguchi and R. E. DuBroff, "Calibration and compensation of near-field scan measurements," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2005.
- [11] "ETSI TR 100028," 2001.
- [12] "ETSI TR 102273," 2001.
- [13] R. F. Harrington, "Sidelobe Reduction by Nonuniform Element Spacing," IRE Transactions on Antennas and Propagation, 1961.
- [14] J. M. Johnson and Y. Rahmat-Samii, "Genetic Algorithms in Engineering Electromagnetics," 1997.
- [15] K. K. Yan and Y. Lu, "Sidelobe reduction in array-pattern synthesis using genetic algorithm," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1997.
- [16] M. Reil and G. Lloyd, Millimeter-Wave Beamforming: Antenna Array Design Choices & Characterization, Rohde & Schwarz, 2016.
- [17] Andrea D and Aquino, "Recommendation on Base Station Antenna Standards by NGMN Alliance," 2017.
- [18] P. Pelland and A. Newell, "Combining Pattern, Polarization and Channel Balance Correction Routines to Improve the Performance of Broad Band, Dual



Polarized Probes".

[19] "Over-The-Air Testing, Chamber Calibration Becoming Pivotal Processes For 5G Chipsets," [Online]. Available:

<https://www.ecnmag.com/blog/2018/06/over-air-testing-chamber-calibration-becoming-pivotal-processes-5g-chipsets>

[20] Rohde & Schwarz, "Be ahead in 5G - Be ready for the future," [Online].

Available: <https://www.rohde-schwarz.com/5G>. [Accessed 20 12 2018].