

# 遠場無反射室之規劃與評估

無反射室為評估天線輻射性能的必要設備。隨著通訊產業日益蓬勃，工業界與學界對建造無反射室之需求也與日俱增。文中筆者將以個人經驗，說明無反射室規劃時應考慮的因素，包括無反射室尺寸之考慮、發射天線之選用，及吸波體的配置等，文章中將詳細描述設計原則及建議作法。無反射室完工之後，其性能之評估與缺失之改善，亦是確保量測準確度之重要工作。其作法與原理，文章中亦將一併討論。

陳宏圖

## 一、引言

隨著個人通訊時代的來臨，消費者對行動式通訊系統的依賴程度逐漸加重，各式通訊產品也如雨後春筍般出現。為使產品更具有市場競爭力，設計者無不儘可能達到產品重量輕、體積小、外形美觀、功能多樣，且成本低廉等目標。重量輕、體積小，得以增加機動性；功能多樣化才能贏得消費者的青睞；進而由整個通訊系統模組化的設計著手，可簡化製作與維修的過程，以降低成本。由此觀之，為滿足上述各項嚴苛條件，行動通訊設備中，天線設計之優良與否，直接關係著產品品質與市場競爭力。因此，近年來天線設計公司與製造廠商之設立，便因應市場需求而有逐漸增加的趨勢。更有不少製造傳統零組件或被動元件的公司，紛紛轉型投入行動通訊相關產業的行列之中，其中也包括了天線設計與製造的產業。再加上目前熱門的通訊頻段有往高頻發展的趨勢，傳統的外露式鞭型 (whip)

陳宏圖先生為國立中山大學電機工程博士，現任陸軍軍官學校電機系副教授。

天線或螺旋 (helix) 天線，已不再能滿足時下各頻段通訊設備對天線的需求。因此，無論是系統廠商或製造天線的公司，皆已意識到一支設計優良的天線對於提升產品市場競爭力之重要性，進而考慮到必須建立評估天線性能的能力，以確保產品品質。

天線在通訊系統中的角色，乃是引導電磁能量從電路中輻射至空間裡，或反過來，接收空間中的電磁能量，將之引導至電路裡作處理。因此如圖 1 所示，天線的規格中，除了外觀尺寸外，還必須說

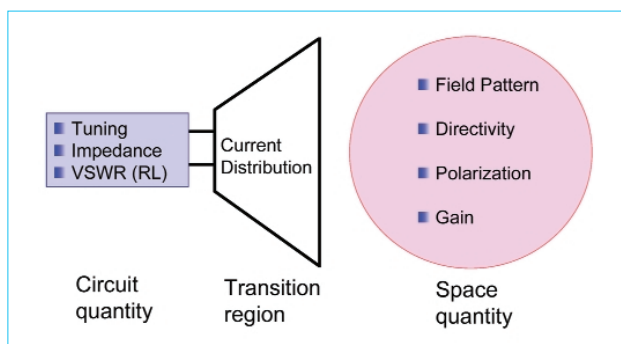


圖 1. 天線在通訊系統中的角色，乃是介於振盪電路於輻射能量間之轉換區域。

明其電路特性以及空間的輻射特性。電路特性包含操作頻率、輸入阻抗及電壓駐波比(或回損)；而輻射特性的部份則包括了輻射場型、極化特性、指向性及增益。一般以純量網路分析儀可測得天線的操作頻率及電壓駐波比，而向量網路分析儀則可進一步測量輸入阻抗值，以作為設計阻抗匹配電路之參考。在測量天線之輻射特性時，除在戶外適當地點進行外，在室內則必須仰賴無反射室(anechoic chamber)之建置方能完成。戶外量測場(outdoor range)的建置，受到地形地物、天候、環境等因素之影響，並不適合作為長期且經常性的測量場地。因此，無反射室便成為評估天線性能的必要設備之一。有鑑於此，筆者將提供個人參與無反射室規劃與評估的經驗，以為參考。

筆者目前任教於陸軍軍官學校電機系。考量國防人才需求及本校所肩負的教育使命，本系教學與研究重點因而著重在「電磁波」與「通訊」兩大領域。為達成此一教育目標，本系自民國八十三年起著手規劃「天線實驗室」之建立。至八十六年八月，已陸續完成幾項重大儀器設備之採購工作，其中包括建造一間 6 m(長)× 3 m(寬)× 3 m(高)無反射室。並在後來興建之「致理樓」規劃中預留空間，將房間高度挑高至 6 m。新建大樓於民國八十九年落成後，目前無反射室之外觀尺寸為 10 m(長)× 6 m(寬)× 6 m(高)。規劃原則與評估過程分別說明如下。

## 二、遠場無反射室之規劃

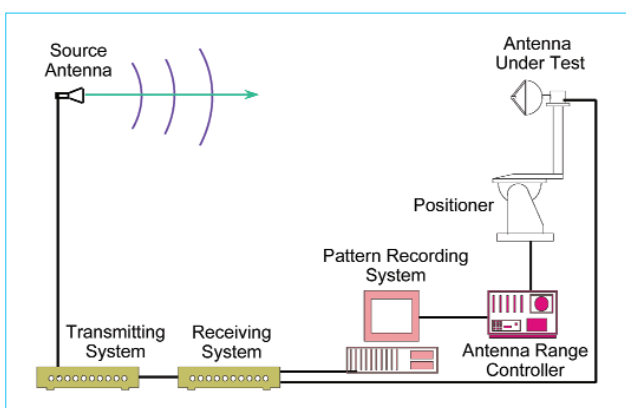


圖 2. 遠場量測之儀器配置方塊圖。

天線場型的量測場地大致可區分為三類：近場量測場(near-field range)、縮距量測場(compact range)，以及遠場量測場(far-field range)。本文將鎖定於探討遠場量測之技術，至於其他量測技術可在參考文獻<sup>(1,2)</sup>中獲得相關資訊。

### 1. 天線場型量測基本概念

一個完整的天線量測場地應包含儀器設備與適當的量測空間。所謂「適當的量測空間」即指無反射室；而所需的儀器設備可歸納為：場源傳送系統、發射天線、接收系統、轉台與控制系統、資料記錄與處理系統等五大項。圖 2 所示為遠場量測時之儀器配置方塊圖。場源傳送系統送出電磁能量，經由發射天線輻射至空間中；轉台控制器控制轉台旋轉，而待測天線則置於轉台上，對某一特定切面做掃描；待測天線接收到的電磁訊號送至接收系統進行分析比對；之後所得結果交由資料記錄與處理系統做儲存、列印等。在這過程中，由發射天線輻射至空間中的電磁波，在抵達待測天線時必須為均勻的平面波(uniform plane wave)。試想一個人站在哈哈鏡前，因為鏡面或凹或凸，反映出的影像為或胖或瘦扭曲變形。同理，照射到待測天線上的電磁波，其相位與強度均勻的程度勢必嚴重影響場型量測的準確性。然而，如圖 3 所示，在室內做場型測量時，四周牆壁、天花板與地板皆會反射電磁波，而使得照射在待測天線上的並非均勻平面波。無反

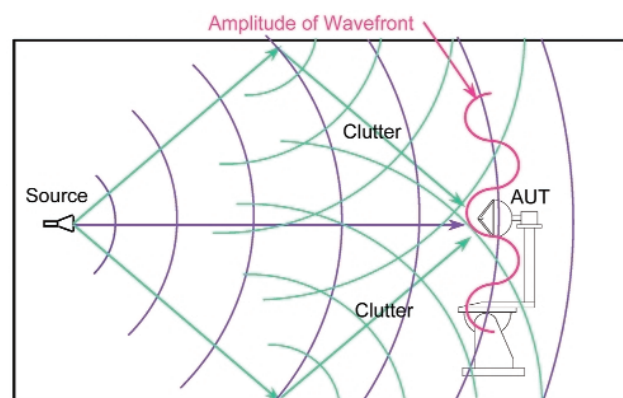


圖 3. 在室內做場型測量時，四周牆壁、天花板與地板皆會反射電磁波，而使得照射在待測天線上的並非均勻平面波。

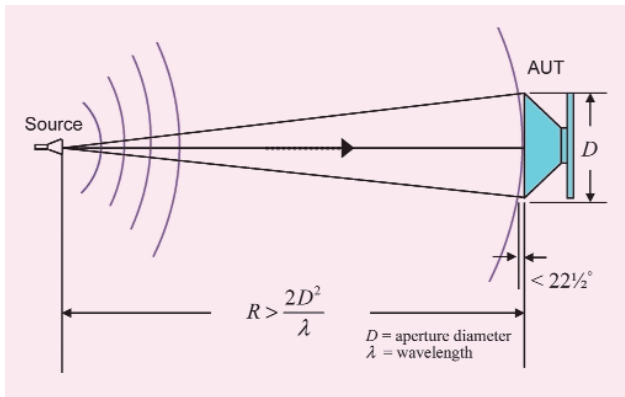


圖 4. 遠場條件示意圖。

射室的功能即在消除這些雜波 (clutters)，使發射天線輻射至空間中的電磁波，在抵達待測天線時儘可能為均勻平面波。

## 2. 無反射室要蓋多大？

根據上述準則，照射到待測天線上的電磁波除強度要求均勻外，其等相位面亦必須儘可能為一平面。如圖 4 所示，從發射天線輻射至空間中的電磁波，其波前 (wavefront) 為球面，若待測天線與發射天線之間距離不夠，將會使分佈於待測天線上的相位產生相位差。此一相位差值在 IEEE Standard Test Procedures for Antennas<sup>(3)</sup> 中指出，最大容忍值通常為 22.5°。依據此一相位差值計算出待測天線與發射天線之間距離為：

$$R = \frac{2D^2}{\lambda} \quad (1)$$

其中  $D$  為待測天線之孔徑 (aperture diameter) 大小， $\lambda$  為操作波長。量測距離對測得場型的效應為：當待測天線與發射天線之間距離愈來愈近時，將會使測量所得的場型中，主波束 (main beam) 與第一旁波瓣 (first side lobe) 之分野愈來愈不明確，而獲致錯誤的結果。因此，為量得正確之天線場型，待測天線與發射天線之間距離至少必須如 (1) 式所示。(1) 式所示為一般選用之遠場量測條件，事實上參考文獻<sup>(4,5)</sup> 指出，針對某些特殊輻射特性的天線，如超低旁波瓣或高指向性的天線，其遠場條件將更為嚴苛。

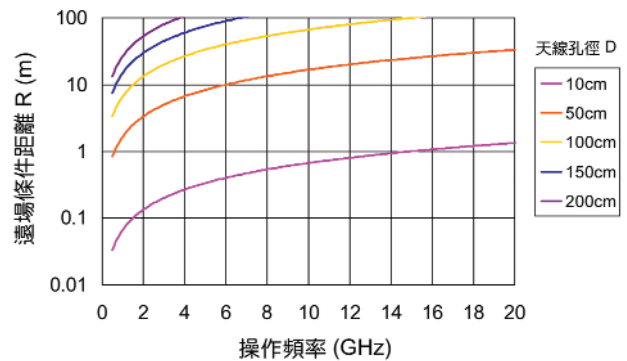


圖 5. 不同的天線孔徑大小之遠場條件與操作頻率關係圖。

根據 (1) 式，針對不同的天線孔徑大小，計算出遠場條件與操作頻率的關係圖，繪製於圖 5。該圖中顯示，在決定無反射室長度之前，應先了解將來待測天線可能的孔徑大小與操作頻率。例如以目前應用於 5.8 GHz ISM C-band 的天線而言，當其附於筆記型電腦上時，其整體天線孔徑約為 50 cm。要對此一系統進行遠場量測時，無反射室長度至少必須為 10 m，才能使待測天線與發射天線之間距離滿足遠場條件。換言之，一旦無反射室蓋受長度固定之後，適用的待測天線其孔徑大小與操作頻率將受到限制。以本校天線實驗室目前無反射室之長度 10 m 為例，扣除吸波體長度及測量迴轉半徑之後，計算出最大天線孔徑與操作頻率的關係，結果繪製於圖 6。如圖中所示，當測量應用於 DCS

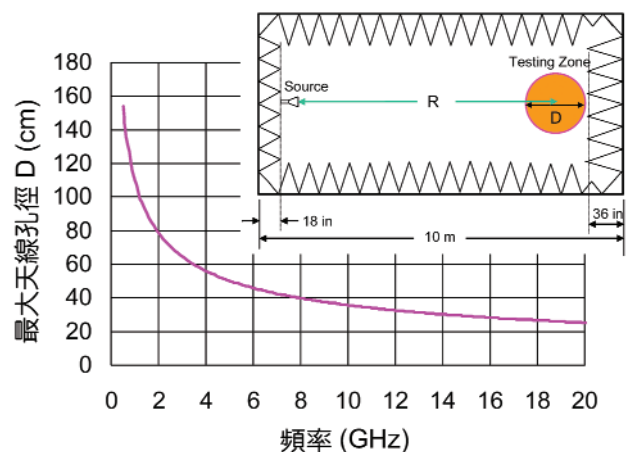


圖 6. 十米長無反射室可測量之最大天線孔徑與操作頻率關係圖。

1800 MHz 系統之基地台天線時，天線孔徑不應大於 80 cm。當天線孔徑超過此一尺寸時，則建議改以其他量測技術（如近場量測技術）為之。另外值得一提的是，圖 6 的計算方式與結果僅考慮遠場條件，事實上待測天線最佳擺設位置並非緊貼著吸波體頂端，其他的考慮因素討論如下。

### 3. 吸波體要用多長？

如前所述，無反射室的功能在於消除從四周牆壁、天花板與地板反射的電磁波，以避免這些雜波進到待測天線所在的區域內（如圖 7 所示）。亦即由遠場條件所決定的最大天線孔徑範圍內，儘可能地壓抑進到這個球形空間中的雜波。因此，此一區域一般又稱為「靜域 (quiet zone)」。在靜域中雜波「安靜」的程度，與吸波體 (absorber) 的選用、無反射室的寬 (高) 度，以及所選用之發射天線本身的場型都有密切的關係。

吸波體是無反射室的主角，其品質影響無反射室的功能甚巨。一般作法是以碳粉滲入泡綿之中，以達吸收電磁波的效果，因此吸波體是否容易掉粉、是否防火都是選用時應該考慮的問題。尤其掉落的粉塵有礙人體健康，應特別注意。通常無反射室選用的吸波體形狀有角錐狀 (pyramid) 與楔狀 (wedge) 兩種，各依特性不同而擺設於無反射室不同的部位。通常吸波體製造商除提供吸波體外觀尺寸的資訊外，還會提供不同頻率下反射率的值。筆者比較幾家廠商的型錄後，歸納如下。若以 -40 dB 的反射率為選用基準，12 吋的角錐狀吸波體在 2 GHz 以上有很好的吸波能力；18 吋的角錐狀吸波體可適用在 1 GHz 以上的情況；若工作頻率低至 500 MHz，則應考慮使用 36 吋或更長的吸波體。因此，一般可以需求中最低工作頻率其波長的兩倍，作為選用吸波體長度的參考。然而，吸波體製造商所提供的反射率值，皆是在正向入射 (normal incident) 的情況下測得。事實上，無反射室內只有靜域後方的背牆是直接正面受到發射天線所照射，其餘上下左右四面側牆皆是受到斜向照射，而且是越靠近背牆入射角度越大（參見圖 7）。根據參考文獻<sup>(6)</sup> 中的實驗結果得知，入射角度越大反射率也跟著提高。兩倍波長長度的吸波體在正向

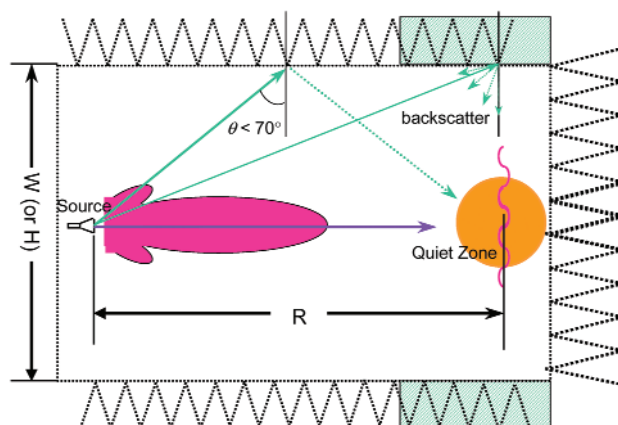


圖 7. 吸波體消除雜波以形成靜域示意圖。

入射時，反射率可低於 -40 dB；當角度增為 50° 時，反射率還可保持在 -30 dB 以下；角度持續增大到 70° 時，反射率將超過 -20 dB。因此，選用過長的吸波體除增加成本，還會減少無反射室內部的有效寬度與高度，而使四面側牆受到的斜向照射角度過大，影響吸波能力。尤其在舊有建築中加蓋無反射室時，由於房間格局固定、高度受限，必然要面對這種取捨。在參考文獻<sup>(3)</sup> 中，建議選用之發射天線的主波束不應涵蓋上下左右四面側牆，並且將斜向照射的角度限制在 70° 以內，亦即：

$$W \geq \frac{R}{\tan 70^\circ} \quad (2)$$

另外圖 7 中斜線的部份（即四面側牆環繞靜域的部份），因斜向照射角度過大，所以這部份所使用的吸波體並不在強調吸波能力，而是應避免電磁波回向散射 (backscatter) 進入靜域之中。參考文獻<sup>(7)</sup> 的結果顯示，楔狀吸波體回向散射強度比角錐狀吸波體來得低。因此建議可在這部份使用楔狀吸波體，並讓其脊線走向平行於波行進的方向，如此可以避免角錐狀吸波體因斜向照射角度過大，而產生回向散射現象。但是此並非唯一的作法，仍舊必須考慮另一因素：當待測天線進到靜域中進行測量時，待測天線本身的散射場對這部份的吸波體而言是正向入射，如此一來，角錐狀的吸波體反而是較佳的選擇。

陸軍官校天線實驗室目前無反射室之外觀尺寸

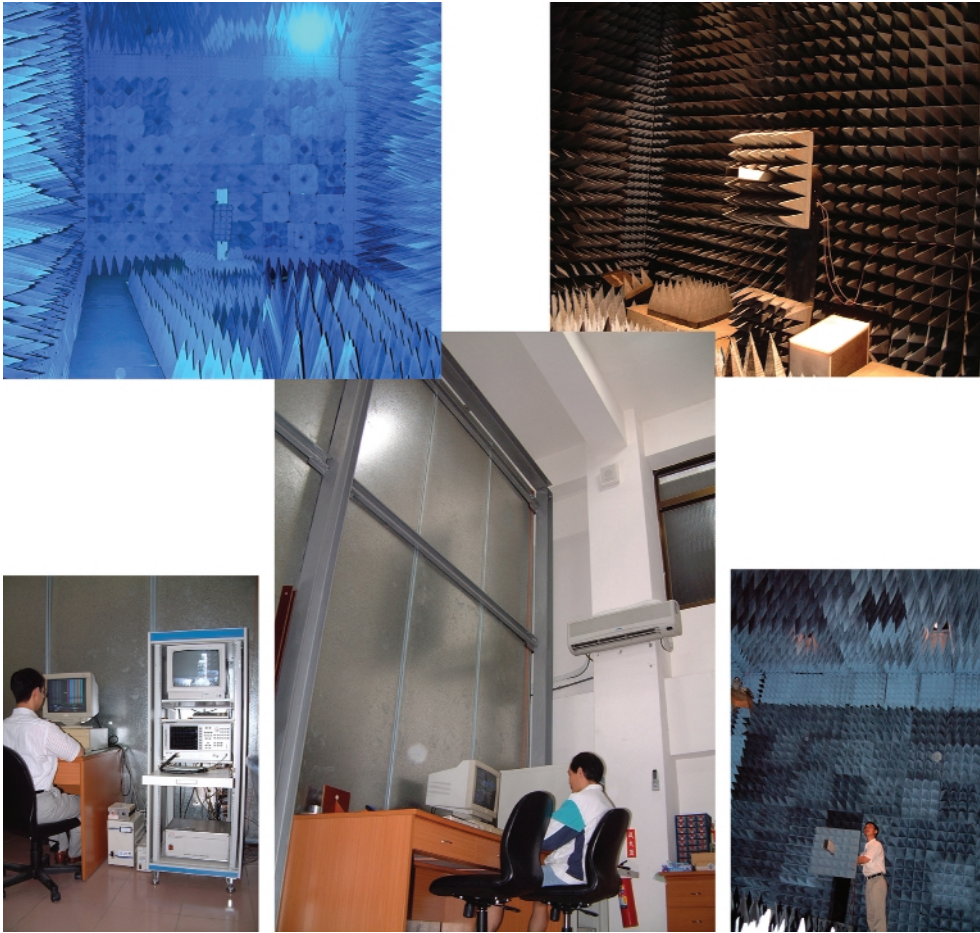


圖 8. 陸軍官校天線實驗室遠場量測配置圖。

為 10 m (長) × 6 m (寬) × 6 m (高)，建造地點位於「致理樓」之地下室。本校致理樓之興建，於八十七年十月動工，八十九年五月完工啟用，全棟大樓容納計有資訊系、電機系、物理系及化學系等學系。大樓規劃之初，即已考慮無反射室建造之需求，乃將房間由地下室地面至一樓天花板高度挑高至 6 m。無反射室規劃之最低工作頻率為 500 MHz，上下左右四面側牆大部份使用 24 吋角錐狀吸波體，靜域後方背牆則使用 36 吋角錐狀吸波體，其餘收邊及牆角部份則貼 12 或 18 吋角錐狀吸波體 (參見圖 8)。靜域特性，在 500 MHz - 2 GHz 頻率範圍內，訊號雜波比為 30 dBc 以上 (即漣波振幅低於 0.28 dB)；工作頻率在 2 GHz 以上時，訊號雜波比為 35 dBc 以上 (即漣波振幅低於 0.15 dB)。實驗室整體功能配備完整，除供教學與研究用外，並協助廠商進行產品量測。靜域特性之評估方式詳述於後。

### 三、無反射室之評估

無反射室完工之後，更重要的工作即是進行靜域特性評估。靜域中雜波「安靜」的程度，一般以訊號雜波比 (dBc) 或漣波振幅 (dB) 來量度。如圖 9 所示， $E_i$  代表由發射天線直接照射到靜域之入射場， $E_r$  則是來自無反射室側牆之反射波，兩股入射場在空間中形成駐波 (standing wave)。因此當在靜域中沿著橫向或縱向掃描時，將會檢測出駐波之漣波 (ripple)。令漣波振幅為  $\delta$ (dB)，則駐波比 SWR (standing wave ratio) 可表示為：

$$SWR = 20 \log \frac{|E_{\max}|}{|E_{\min}|} = 20 \log \frac{1 + |E_r/E_i|}{1 - |E_r/E_i|} = 2\delta(\text{dB}) \quad (3)$$

因此訊號雜波比  $|E_r/E_i|$  與漣波振幅之間的關係為：

$$\frac{E_r}{E_i} (\text{dBc}) = 20 \log \left[ \frac{-1 + 10^{\delta(\text{dB})/10}}{1 + 10^{\delta(\text{dB})/10}} \right] \quad (4)$$

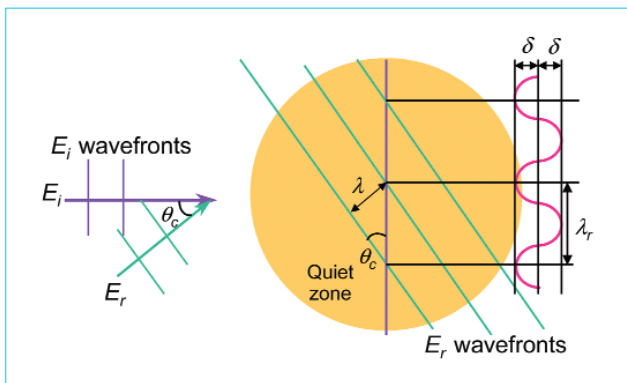


圖 9. 靜域中漣波形成示意圖。

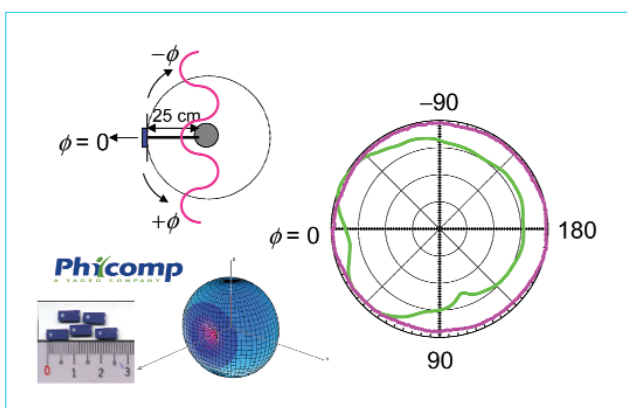


圖 10. 一全向性天線在「安靜」與「吵雜」的靜域中測得的場型。

此外，通常可由漣波之波長推測主要雜波的來源方向。如圖 9 所示，令橫向掃描時漣波波峰與波峰間距離為  $\lambda_r$ ， $E_i$  與  $E_r$  之波長為  $\lambda$  且夾角為  $\theta_c$ ，則  $\lambda$  與  $\lambda_r$  之間的關係式為

$$\sin \theta_c = \frac{\lambda}{\lambda_r} \quad (5)$$

圖 10 所示為一全向性 (omnidirectional) 天線在「安靜」與「吵雜」的靜域中測得的場型。待測天線為飛元科技公司 (Phycomp Taiwan Ltd.) 所生產之晶片型天線，該天線尺寸僅  $8 \times 3.5 \times 0.9 \times (\text{mm}^3)$ ，中心操作頻率為 2.45 GHz，頻寬 200 MHz，可應用在藍芽 (Bluetooth®) 計畫或無線網路 (wireless LAN) 等產品上。該天線之基本架構屬單極 (monopole) 天線，其 H-plane 之場型幾乎為一正

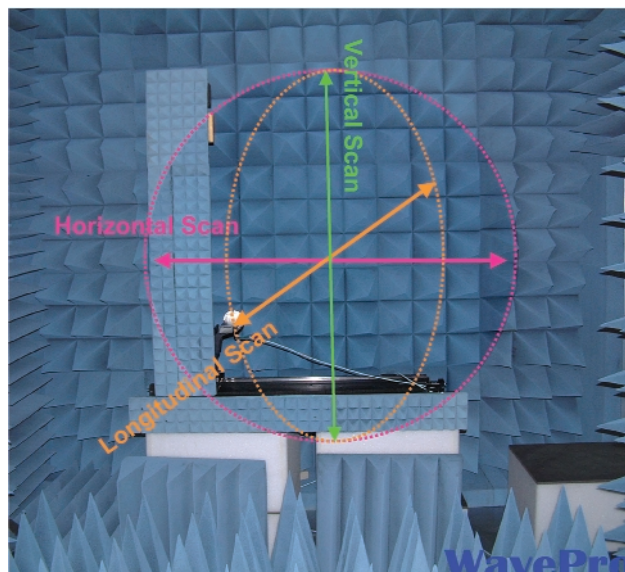


圖 11. 靜域漣波強度掃描配置圖 (資料由衛普科技提供)。

圓。量測時刻意將天線偏離轉台軸心 25 cm，使天線在靜域中掃描軌跡為一個圓圈。結果發現，「安靜」的靜域中量得之場型仍然保持正圓 (圖中紅線)，而在「吵雜」的靜域中量得之場型 (圖中綠線)，已然呈不規則狀，且明顯看出漣波分佈。可見靜域中雜波「安靜」的程度，代表著無反射室之功能完備與否。以下說明靜域特性之評估方式。

### 1. 靜域漣波強度掃描

圖 11 所示即為靜域漣波強度掃描時之配置圖，圖中使用一可往復及上下移動之平面掃描器。將掃描器設置於靜域之內，以一開口波導管 (open-ended waveguide) 為探針並升至靜域中線的高度，由掃描器帶動探針在靜域中作橫向往復掃描。同樣的方式，將掃描器之往復軸向轉為縱向，即可對靜域之縱向作掃描。此外，亦可利用掃描器之垂直軸向，使探針上下移動，對靜域之縱向作掃描。掃描所得之典型結果，繪於圖 12 與 13 中。圖 12 為橫向掃描之結果，在 90 cm 寬之掃描範圍內，最大值與最小值之間相差 0.3 dB，亦即漣波振幅為 0.15 dB，訊號雜波比約 35 dBc。圖 13 為縱向掃描結果，圖中場強遞減 (taper) 的現象，為探針作縱向掃描時，距離發射天線之遠近不同所造成。扣除此

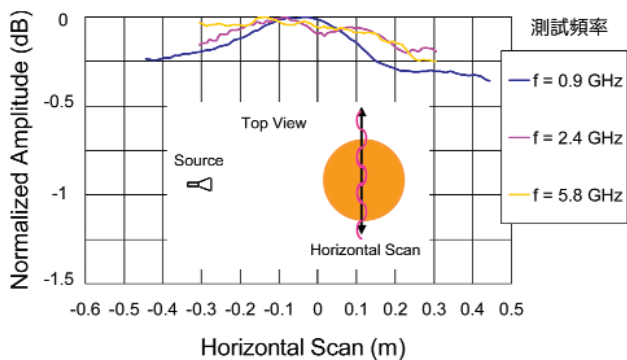


圖 12. 靜域漣波強度橫向掃描之典型結果 (資料由衛普科技提供)。

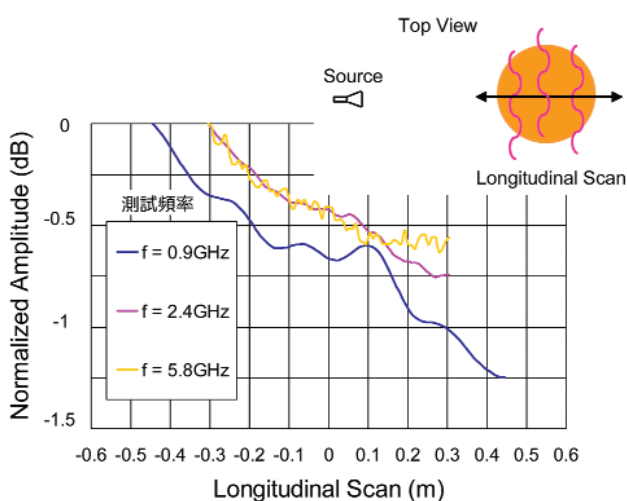


圖 13. 靜域漣波強度縱向掃描之典型結果 (資料由衛普科技提供)。

一因素後，漣波振幅約為 0.2 dB，即訊號雜波比為 32.8 dBc。

## 2. 無反射室之診斷

當進行靜域漣波強度掃描時，若測得過大之漣波振幅時，可由漣波之波長推測主要雜波的來源方向，如 (5) 式所示。但是此一作法解析度不高，若無反射室經初步修改仍無法改善靜域特性時，可利用雷達影像的作法，明確判斷出雜波的來源方向，以作為無反射室改善之依據。如參考文獻<sup>(8)</sup> 所示，其作法與配置繪於圖 14，以平面掃描器帶動探針在靜域中取得整個截面各點處之場強與相位資訊。

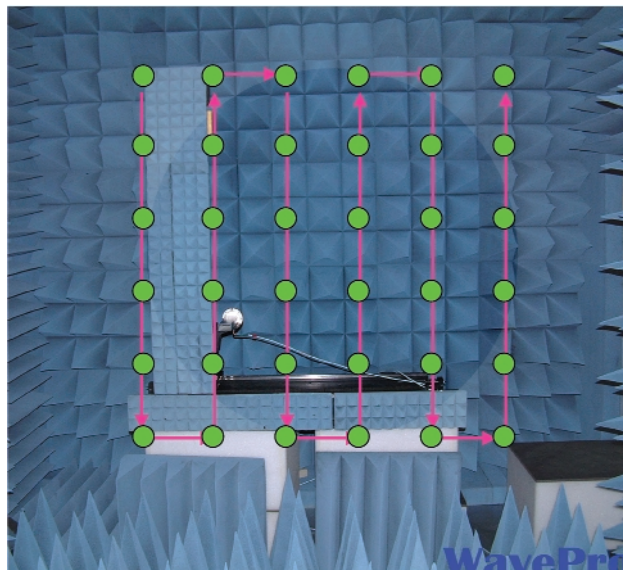


圖 14. 無反射室雷達影像掃描配置圖 (資料由衛普科技提供)。

而各點處之資訊可視為孔徑合成雷達 (synthetic aperture radar, SAR) 之每個單元，將這些資訊代入快速傅立葉轉換 (fast Fourier transform, FFT) 做遠場轉換，即可求出其雷達影像，進而判別雜波來源方向。典型的結果繪於圖 15 與 16：「安靜」的無反射室僅在中心軸上出現場強分佈 (圖 15)；而在「吵雜」的無反射室中測得的影像，其場強分佈較為凌亂，並可由其分佈的角度得知雜波來源方向，以作為改善之依據 (圖 16)。

## 四、結語

無反射室為評估天線輻射性能的必要設備，而無反射室之靜域中雜波「安靜」的程度，影響著量測的準確性。無反射室規劃時應考慮其長度，使其滿足待測天線之遠場條件，以使靜域內得到均勻的相位分佈。此外寬度、高度、發射天線場型及吸波體的選用與佈置，在在影響著靜域的特性。筆者以個人經驗，在文章中詳細描述應考慮的因素及建議作法。另外，針對靜域特性之評估與診斷方式，文章中說明了包括「靜域漣波強度掃描」與「雷達影像」等作法與原理，供無反射室完工之後改善之參考。

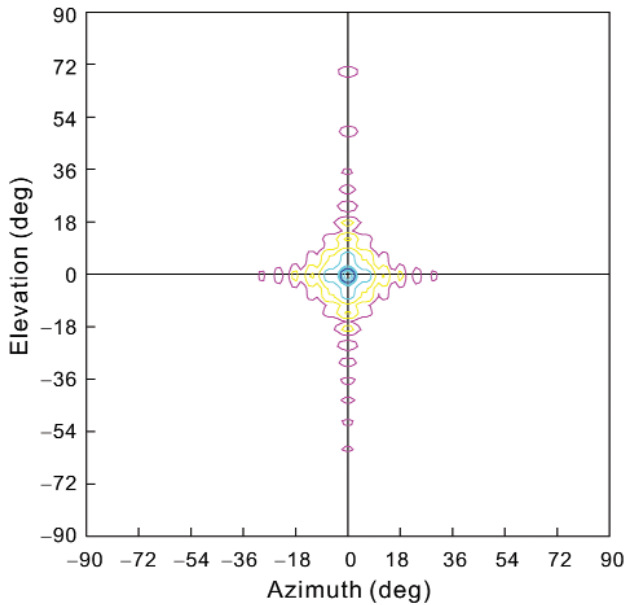


圖 15.「安靜」的無反射室之雷達影像圖 (資料由衛普科技提供)。

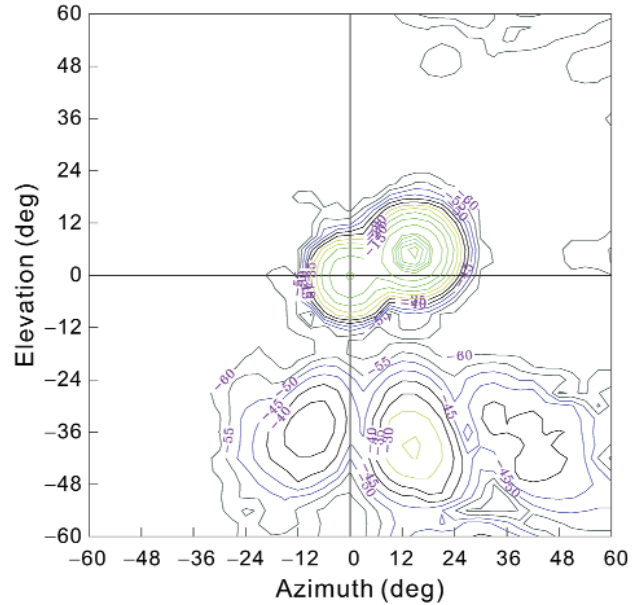


圖 16.「吵雜」的無反射室之雷達影像圖 (資料由衛普科技提供)。

## 誌謝

筆者撰文過程中，衛普科技 (WavePro, Inc.) 張朝融先生與劉榮宗先生提供技術資料與圖片，特此誌謝。

## 參考文獻

1. Y. T. Lo and S. W. Lee, *Antenna Handbook: Theory, Applications, and Design*, New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc. (1988).
2. D. Slater, *Near-Field Antenna Measurement*, Norwood: Artech House Inc. (1991).

3. ANSI/IEEE Std. 149-1979, IEEE Standard Test Procedures for Antennas.
4. R. C. Hansen, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 32, 591-594 (1984).
5. R. C. Hansen, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 40, 1211-1214 (1992).
6. B. T. Bewitt and W. D. Burnside, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 36, 971-984 (1988).
7. C. F. Yang, W. D. Burnside, and R. C. Rudduck, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 41, 600-609 (1993).
8. G. Hindman and D. Slater, "Anechoic Diagnostic Imaging", *1992 Antenna Measurement Techniques Association Symposium*, Columbus, OH (1992). (<http://www.nearfield.com/amta/amta92p1.htm>)