

實驗四

天線與微波傳播

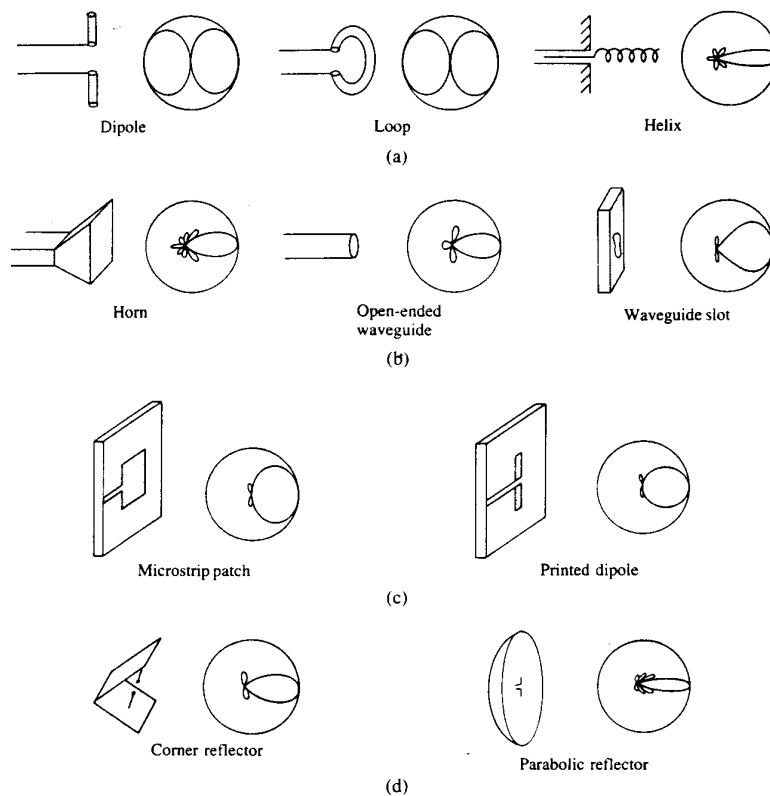
4

4-1 號角天線

實驗原理：

天線為一經過特殊設計，且可使電磁能量沿特定方向傳遞之微波裝置。其主要功能為將發射機之信號有效的輻射到自由空間中，或將遠方傳來之電波信號有效的耦合到接收機，故天線可視一種能量轉換器(transducer)。

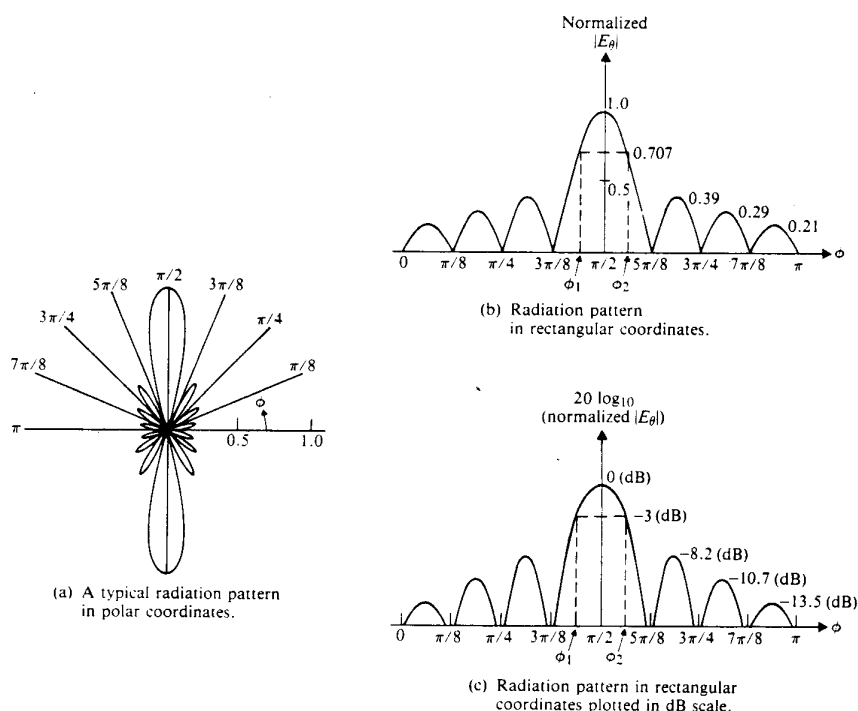
天線的形式千變萬化，大致上可分為四大類，即：線狀天線(wire antennas)、孔狀天線(aperture antennas)、印刷電路板天線(printed antennas)與反射面天線(reflector antenna)，如圖一所示。常見之線狀天線有：單極(monopole)天線、偶極(dipole)天線、環狀(loop)天線、螺旋狀(helix)天線、八木(Yagi-Uda)天線等；常見之孔狀天線有：號角(horn)天線、開槽(slot)天線等；常見之印刷電路板天線有：微帶(microstrip)天線、印刷偶極(printed dipole)天線等；常見之反射面天線則有：反射面(reflector)天線、碟形(dish)天線等。



圖一、各種天線及其輻射場型。

上述之天線皆為單一(single-element)天線，若將數個相同之天線依特定距離置於一條線或一個平面上，即可形成線性天線陣列(linear antenna array)或平面天線陣列(planar antenna array)。藉由控制各單元天線激發信號之振幅與相位，即可調整天線陣列輻射場型之主波束(main beam)方向與旁波瓣(sidelobe)之位準大小。

天線輻射特性可以藉由其輻射場型(radiation pattern)描述。輻射場型是在離天線固定距離時，輻射電場強度隨角度 ϕ 和 θ 變化的情形。以雙極天線為例，在球座標上，若天線至於 z 軸上，且其訊號饋入點位於座標原點，則欲量測電場平面之輻射場型時，須令 ϕ 不變，改變 θ ；欲量測磁場平面之輻射場型時，須令 θ 不變，改變 ϕ 。圖二為天線之輻射場型各種表示法，可以視情況而選擇不同的表示法。



圖二、各種輻射場型的表示法。

天線的輻射場可以分為近場(near-field)和遠場(far-field)，近場與遠場之邊界很難明確定義，一般以 r_{min} 作為天線之遠場條件，即

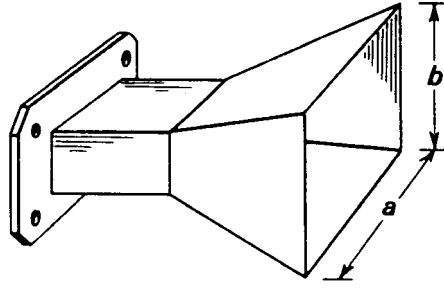
$$r_{min} = \frac{2d^2}{\lambda_0}$$

其中 d 為天線開口之最大尺寸， λ_0 為輻射之電磁波於真空中傳播之波長。

在近場時，天線之輻射場型與天線間之距離有關，在不同距離所量得之輻射場型並不相同；而在遠場時，天線之輻射場型與天線間之距離無關，故只要量測在固定距離電場或磁場強度隨 ϕ 和 θ 變化之情形，即可量得天線之特性。天線主要是用來當作無線傳輸之工具，故通常不會使用天線之近場特性，本實驗只考慮天線之遠場特性。若位於天線之遠場，則可將天線視為一個點位於座標原點，並使用球座標(spherical coordinate)定義所有天線之特性公式。

本實驗所使用之天線為金字塔形號角天線，如圖三所示。該天線為一簡單之孔狀天線，外觀上，它從導波管向外逐漸延伸，此延伸目的在於使波導管與空氣之阻抗相匹配，並可適當改變主

波束寬度(main beam width)。



圖三、金字塔形號角天線。

天線的主束寬度係用以描述主波束之角度，定義為其兩半功率點之角度差 $\phi_2 - \phi_1$ （如圖二所示）。本實驗所使用之金字塔形號角天線，由於磁場平面與電場平面大小不同，故輻射場型在兩平面上將有不同的主波束寬度，兩寬度分別為

$$\theta_H \approx \frac{80\lambda_0}{a} \quad \phi_E \approx \frac{53\lambda_0}{b}$$

天線增益(gain)定義為在相同輸入功率下，該天線最強之輻射功率與一等向性無損耗天線輻射功率密度之比值。可以表示為

$$g = \frac{P_{av,max}}{\frac{P_{in}}{4\pi r^2}}$$

其中 P_{in} 為輸入功率， $P_{av,max}$ 為離天線 r 處最大之 Poynting 向量大小，分母部分表示球面上之平均功率。若天線將其輻射能量更集中在一特定方向上， $P_{av,max}$ 將會變大，而天線增益亦隨之增大。

天線的增益亦可視為球面之表面積與天線輻射範圍之實際面積的比例，金字塔形號角天線之增益可表示為

$$g \approx \frac{2\pi ab}{\lambda_0^2}$$

由上式可知，天線增益與輸入功率大小無關，在天線耐受範圍內，不論輸入功率大小如何，天線增益都相同。

當兩個號角天線一起使用時，其中一個作為發射天線，另一個作為接收天線，則接收天線所接收之功率可表示為

$$P_r = \frac{g_r g_t \lambda_0^2}{4\pi r^2} P_t$$

其中， P_t 為發射天線之發射功率， P_r 為接收天線之接收功率， r 為兩天線間之距離， g_r 與 g_t 分別為接收天線與發射天線之天線增益。假設兩號角天線完全相同，則可將上式簡化如下

$$P_r = \frac{g^2 \lambda_0^2}{4\pi r^2} P_t \quad \text{或} \quad g = \frac{4\pi r}{\lambda_0} \sqrt{\frac{P_r}{P_t}}$$

進行本實驗需注意下列兩點：

- (一) 兩天線間之距離距不可小於 r_{min} 。
- (二) 部分由天線輻射之功率可能由其它散射體（如：牆壁、實驗桌、儀器）表面反射至接收天線。

為避免該項誤差，接收天線至其它散射體表面之最小距離不可小於 D_{min} ，其與 r_{min} 之關係表示如下

$$D_{min} = \frac{\lambda_0 r_{min}}{2d}$$

其中 r_{min} 為兩天線間之距離， d 為天線開口之最大尺寸。為了減少桌面反射影響，可將收、發天線架高。

實驗器材：

1. 微波信號源(Agilent N5183A)
2. 功率感測器(Agilent U2000A)，含連接電腦之 USB 連線
3. 功率計(Agilent 4418B)
4. 功率感測器(Agilent E4412A)
5. 轉接器(HP adapter X281A N-WR90)
6. 轉接頭(N-SMA)
7. 天線支座二只
8. 號角天線 #531
9. 同軸纜線(coaxial cable)
10. 尺

注意：如使用 Agilent U2000A 功率感測器，則不須使用 Agilent E4412A 功率感測器及 Agilent 4418B 功率計。

實驗目的：

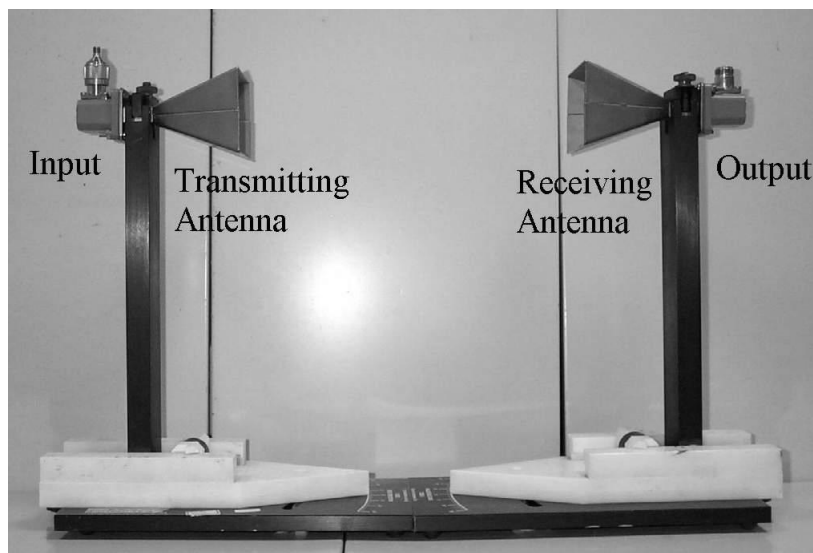
測量號角天線之基本特性。

實驗步驟：

1. 如使用 Agilent U2000A 功率感測器，參照附錄 A-3 之操作程序，安裝 Agilent N1918 功率分析管理軟體於個人電腦。如使用 Agilent E4412A 功率感測器及 4418B 功率計，參照附錄 A-5 之操作程序，進行功率計校準。
2. 調整微波信號源之輸出頻率為 CW 10GHz、功率為 10dBm。
3. 將輸入端與輸出端之轉接器對接以量測發射天線之輸入功率 P_t ，並將該值記錄於表 4-1 中。
4. 裝置實驗儀器如圖四，天線寬邊平行桌面，且將發射天線之 N-SMA 轉接頭連接至微波射頻源

輸出端，功率感測器連接至接收天線之 WR90-N 型接頭轉接器。

5. 將微波信號源之輸出頻率代入公式計算 λ_0 ，並參考圖三量出天線之 a 、 b 值，並計算 r_{min} 與 D_{min} 值，並記錄下來。
6. 將兩天線的距離 r 設定為 $1.5r_{min}$ 左右，並使兩天線位於同一平面與同一直線上，將發射天線與接收天線予以對準，(注意：思考如何知道發射天線與接收天線是否對準)，清除天線之間可能影響之散射體，並記錄此時的接收功率 P_r 於表中。
7. 以接收端天線金屬壁延伸之交點為中心，固定的距離 r 緩慢地轉動接收端天線，每隔一度記錄一個接收功率值，並記錄下來 (實驗報告須附上天線場型圖)。
8. 當功率接收功率值降至一半，(若功率計單位設為 dBm 時，則半功率為 P_r (dBm) 下降 3dB)，記錄此時接收端天線所旋轉之 $\theta/2$ 角度，須分別量測左邊及右邊之 $\theta/2$ 角度，再由兩角度差計算主波束寬度 θ (beam width)。
9. 依據實驗二 2-1 步驟 4，將天線之 SMA-N 轉接頭及功率感測器之 N 型接頭對接，量測發射功率 P_t (dBm)，利用所得之資料，計算天線增益 G 。



圖四、天線特性量測裝置。

※各組思考問題 4-1：

1. 計算理論上天線之主波束寬度 θ ，並與實驗所得之 θ 比較，試分析可能造成誤差之原因。

2. 證明天線遠場的條件為： $r_{\min} = \frac{2d^2}{\lambda_0}$ 。

3. 利用實驗原理中 θ_H 與 ϕ_E 之近似關係及天線增益之定義，證明金字塔形號角天線之增益為：

$$g \approx \frac{2\pi ab}{\lambda_0^2}。$$

4. 何謂天線的增益與指向性？兩者有何關係？若我們在天線產品的資料上看到某一天線的增益為 8.15 dBi 或是 6 dBd，試解釋 dBi 和 dBd 這兩個單位的相異之處。

5. 何謂天線的有效面積(antenna effective area, A_e)？它和天線開口之截面積有何關係？

4-2 微波傳播

實驗原理：

根據 4-1 節之實驗原理可得知，在自由空間（**free space**，即無反射之量測環境）中，若兩號角天線一起使用，且其中一個作為發射天線，另一個作為接收天線時，天線的接收功率 P_r 為

$$P_r = \frac{g_r g_t \lambda_0^2}{4\pi r^2} P_t$$

上式描述輻射功率之基本特性，即當發射功率 P_t 、接收與發射天線增益 g_r 與 g_t 及波長 λ_0 為已知時，接收功率 P_r 將正比於距離平方之倒數，此即為平方反比定律(**inverse square law**)。

實驗器材：

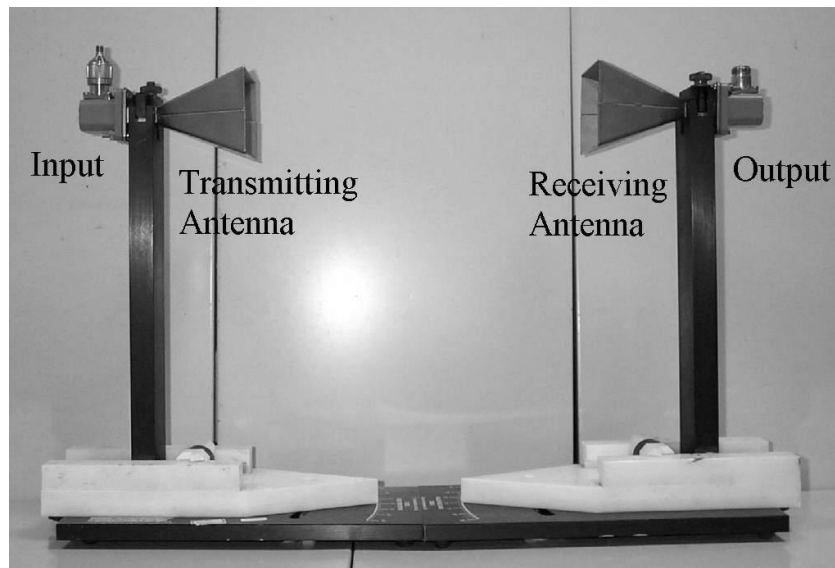
同 4-1 節。

實驗目的：

驗證距離與天線接收功率大小之關係。

實驗步驟：

1. 如 4-1 節之實驗步驟 1-4 裝置實驗儀器。
2. 將兩天線的距離 r 調整為 r_{min} 左右，並使兩天線位於同一平面與同一直線對準（圖五），記錄此時之接收功率於表中。
3. 將接收天線遠離發射天線，使接收功率為原先值的二分之一（若功率計之單位設為 **dBm**，即為下降 **3dB**），此距離稱為 **3dB** 距離，因在此距離之接收功率較原先衰減 **3dB**，記錄此距離於表中。
4. 將接收天線遠離發射天線，使接收功率為原先值的四分之一（即為下降 **6dB**），此距離稱為 **6dB** 距離，記錄此距離於表中。
5. 將接收天線遠離發射天線，使接收功率為原先值的八分之一（即為下降 **9dB**），此距離為 **9dB** 距離，記錄此距離於表中。



圖五、微波傳播實驗裝置圖。

※各組思考問題 4-2：

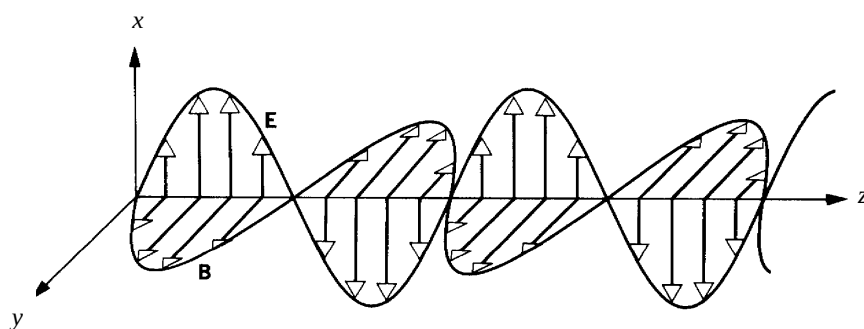
1. 根據實驗結果，距離與天線接收功率之大小關係是否符合平方反比定律？試加以說明討論。
2. 何謂天線之輸入阻抗(input impedance)？有何方法可使天線之輸入阻抗與傳輸線阻抗匹配？試說明之。
3. 何謂天線之頻寬(bandwidth)？
4. 證明天線發射功率 P_t 與天線接收功率 P_r 間的關係為 $P_r = \frac{g_r g_t \lambda_0^2}{4\pi r^2} P_t$ 。
5. 若地球上有一發射天線，其發射功率為 $P_t = 120 \text{ W}$ ，此天線所發射的電磁波為一 6 GHz 之單頻信號，然後將信號發射至地球外的衛星站，此發射天線的天線增益為 50 dB 。另一方面，衛星站的接收天線其增益已知為 40 dB ，位於離地面 35900 km 的地方，試問該衛星站所接收到的信號大小為多少 dBm ？

4-3 天線極化特性與柵欄

實驗原理：

當電磁波在空間中傳播時，**E** 場與 **H** 場分別都與進行方向垂直（圖六），即 **TEM** 模態。在與進行方向垂直的 **xy** 平面上，**E** 場與 **H** 場除了圖六的方向之外，也可以有另一方向的量。以 **E** 場來說，除了 **x** 方向以外，也可以有 **y** 方向的分量。我們通常以 **E** 場的方向定義電磁波的極化方向，故可稱圖六的電磁波為 **x** 方向極化或是垂直極化(**vertical polarization**)。若 **E** 場在水平方向，則稱為 **y** 方向極化或水平極化(**horizontal polarization**)。在天線的各项參數中，極化為相當重要之特性。水平極化的電磁波係由水平極化的天線輻射，並且也要由水平極化的天線接收，才最有效率。由水平極化的發射天線所發射的水平極化波，理論上來說，將完全無法被一個垂直極化的接收天線所接收。故接收天線所收到的訊號強度，除了前兩節所述的天線增益與兩天線間的距離以外，還和兩天線極化特性有關係。

柵欄是由一連串在同一平面上互相平行的金屬線所構成的元件，它可以只讓一定極化的電磁波通過，而反射另一個極化的電磁波，我們將在實驗中觀察此一現象。



圖六、垂直極化之電磁波。

實驗器材：

- 1~10. 同 4-1 節
11. 柵欄
12. 金屬板

實驗目的：

驗證接收訊號之強度與兩天線之極化方向有關，並觀察柵欄之特性。

實驗步驟：

1. 如 4-1 節之實驗步驟 1-4 裝置實驗儀器。
2. 將兩天線的距離 r 調整為 r_{min} 左右，並使兩天線位於同一平面與同一直線上。

3. 將接收天線以電磁波前進方向為軸，緩慢旋轉 180° ，同時觀察功率計之變化。
4. 分別記錄夾角為 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 時所量到之功率大小，（ 45° 及 135° 大概取即可）。
5. 將收、發天線恢復原先之面對面放置，均為同極化，再將柵欄放在收、發天線的正中間，柵欄面與電磁波前進方向垂直，柵欄上之金屬線先垂直於桌面，以電磁波前進方向為軸緩慢旋轉柵欄 180° ，並觀察功率計的變化，將結果記錄於表中。
6. 以上面的結果判斷號角天線的極化方向。
7. 將收、發天線改為面向反射面放置，收、發天線均為垂直極化且與反射面相距約 r_{min} ，在反射面處先放置一金屬板，略微調整金屬板方向，即可收到反射信號（注意：思考如何知道發射天線與金屬板之入射角，等於接收天線與金屬板之反射角，即是否對準），並且記錄接收之功率值。於相同位置，分別改用金屬線垂直桌面之柵欄，以及金屬線平行於桌面的柵欄取代金屬板，必要時需略微調整柵欄方向，並記錄接收之功率值。

※各組思考問題 4-3：

1. 檢查當接收天線沿 z 軸旋轉時，收到的信號功率是否滿足 $P_r \propto \cos^2 \theta$ 。
2. 可否使用平行金屬線之柵欄完全阻擋圓形極化之電磁波，若不行，有多少會通過？若柵欄如步驟 5 的方式旋轉，在圓形極化波的場合下，接收功率會有何變化？
3. 試以簡單的敘述，說明一個圓極化波可表示成兩個互相垂直的線性極化波的線性組合。一個線性極化波可表示成左旋圓極化波(left-handed circular polarization, LHCP)和右旋極化波(right-handed circular polarization, RHCP)的線性組合。

參考資料：

- [1] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., John-Wiley, 2011.
- [2] R. E. Collin, *Foundations for Microwave Engineering*, 2nd ed., New York: McGraw-Hill, 1992.
- [3] C. A. Balanis, *Antenna Theory Analysis and Design*, 3rd ed., John-Wiley, 2005.

實驗四 實驗紀錄表

組別：

4-1 號角天線

號角天線實驗記錄表

$a(\text{cm})$	$b(\text{cm})$	$\lambda_0(\text{cm})$	$r_{min}(\text{cm})$	$D_{min}(\text{cm})$

角度($^{\circ}$)	功率(dBm)	角度($^{\circ}$)	功率(dBm)
0		0	
1		-1	
2		-2	
3		-3	
4		-4	
5		-5	
6		-6	
7		-7	
8		-8	
9		-9	
10		-10	
11		-11	
12		-12	
13		-13	
14		-14	
15		-15	

$r(\text{cm})$	$P_r(\text{dBm})$	$\theta/2(^{\circ})$	$\theta(^{\circ})$	$P_t(\text{dBm})$	$G(\text{dB})$

4-2 微波傳播

微波傳播實驗記錄表

$r_{min}(\text{cm})$	$r(\text{cm})$	$P_r @ r$	3 dB 距離	6 dB 距離	9 dB 距離

4-3 天線極化特性與柵欄

天線的極化實驗記錄表

夾角	0°	45°	90°	135°	180°
P_r (dBm)					

金屬柵欄(金屬線垂直於桌面之夾角為 0°) 穿透特性實驗記錄表

夾角	0°	45°	90°	135°	180°
P_r (dBm)					

金屬柵欄反射特性實驗記錄表

反射面	金屬板	金屬線垂直桌面之柵欄	金屬線平行之桌面柵欄
P_r (dBm)			