

第三章 超寬頻(UWB)天線設計(I)——

具圓弧邊緣結構之印刷式單極天線

從第三章開始，將進入研究主題「超寬頻天線設計」，內容大致為天線結構的演變及其對應的反射損失(Return Loss)，天線的輻射場型(Radiation Pattern)，除此之外，還會展示隨頻率改變時天線上電流分佈及天線的饋入端的實部電阻和虛部電抗的變化，有助於瞭解天線在這麼寬頻的情況下，對應的特性變化。在此研究中使用的基板材料是FR4 PC板，板材的介電係數是4.4、板厚為0.8mm。

3.1 以平面印刷圓錐單極天線(Conical monopole)為基礎之超寬頻(UWB)天線設計



在第二章有提及圓錐形單極(Conical monopole)天線，並討論到該天線輸入阻抗的實部和虛部對應波長改變的響應曲線，(請參閱圖 2.9(a), (b))。由圖 2.9 可知若固定 L_h ，只增加圓錐形天線的角度 $2\theta_h$ ，可以減少阻抗值隨頻率改變的「變量」，換句話說，也就是讓天線的輸入阻抗對頻率變化的敏感度降低；在天線設計中輸入阻抗的匹配是設計者碰到且須達成的首要目標。

而寬頻天線的設計，更希望能做到降低輸入阻抗對頻率的敏感度，甚至和頻率無關(frequency independent)，也就是 $Z_{in}(f)=Z_0$ 。不過在實際上前者的達成可能機率比較高，而且困難度也要視頻寬的範圍而定，愈寬輸入阻抗的變化量愈不易控制，當然匹配也相對的不容易做到。

所以在超寬頻天線的初始設計以圓錐形單極天線為基礎，與圖 2.9 不同的地方，就是利用微帶線饋入方式及長方形的地面(Grounding Plane)，如圖 3.1 所示。 L_h 固定為 25mm，更改圓錐的夾角 $2\theta_h$ 由 30° 至 60° ，發現天線的反射損失果然隨著 $2\theta_h$ 的增加反射量會降低，不過也不可能將 $2\theta_h$ 一直增加下去，所以便更改天線的其他部分來降低天

線的反射損失，圖 3.2 所展示的就是由圓錐形單極天線($2\theta_h=60^\circ$)一直演化到能達成超寬頻匹配的幾個外形結構。

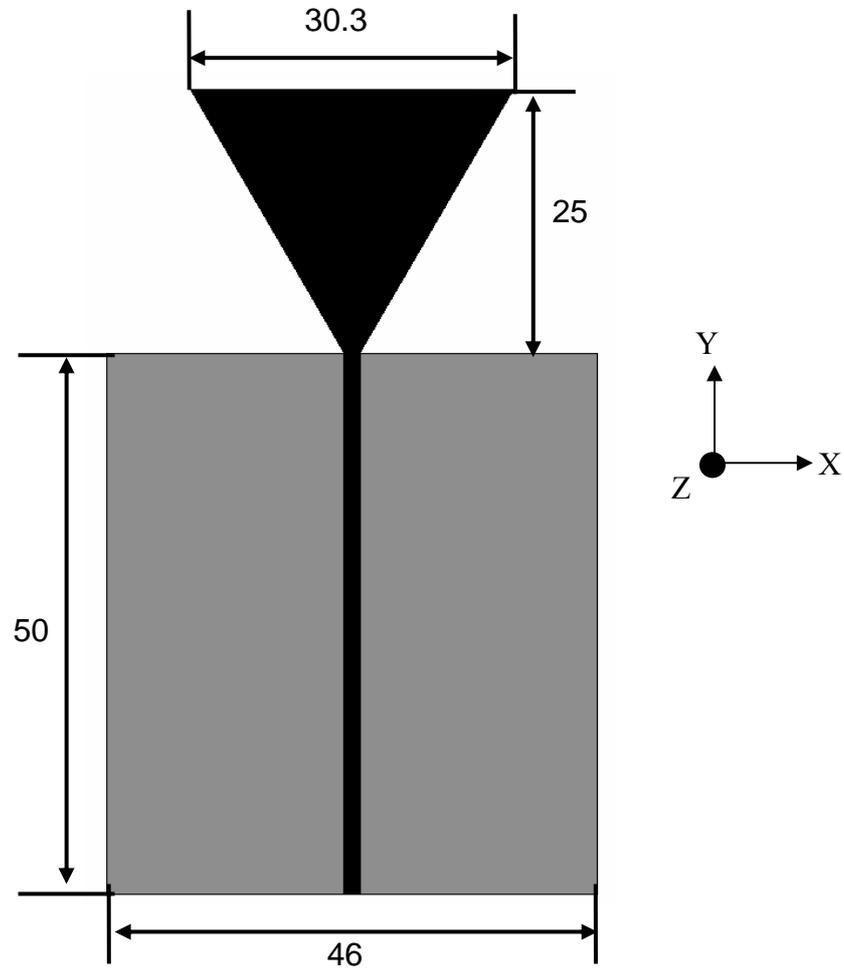


圖 3.1 結構(I)天線尺寸圖。單位:mm

黑色區域是位於 PCB 的正面(TOP Side)，灰色區域是位於 PCB 的背面(Bottom Side)

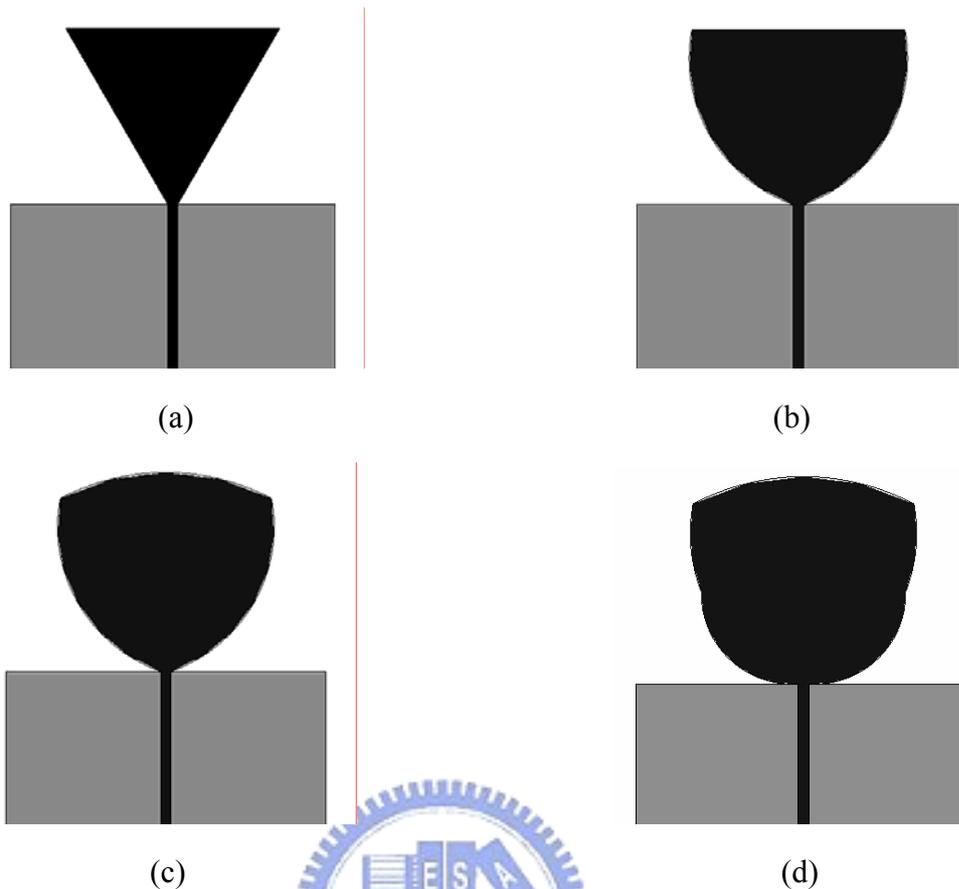


圖 3.2 天線結構圖。(a)結構(I)，(b)結構(II)，(c)結構(III)，(d)結構(IV)。

黑色區域是位於 PCB 的正面(TOP Side)，灰色區域是位於 PCB 的背面(Bottom Side)

3.1.1 天線的圓弧邊緣設計

雖然圓錐形單極天線的開口角度($2\theta_h$)愈大，對天線匹配略有幫助，但是要達到超寬頻全頻帶(full band; 3.1GHz~10.6GHz)的匹配目標，只靠調整 $2\theta_h$ 是無法完成的，必須思考其他的方式及設計參數來增加天線的匹配效果。

有效地增加天線的面積就可以提供更多的電流路徑，其目地在於達到更寬頻的匹配；基於這個想法再加上希望以圓錐形單極天線($2\theta_h = 60^\circ$ ； $L_h = 25\text{mm}$)為基礎結構衍生出圓弧形天線結構。

平面印刷式圓錐形單極天線外形就像是一個倒三角形(見圖 3.1)，而在三角形的三個邊長上加上一圓弧形狀面積(如圖 3.2(c)所示)，用以增加天線面積且藉以調整圓弧形面積的大小試圖完成天線的匹配設計。

至於如何調整及控制圓弧的曲率變化和面積大小是本節要介紹的重點。以結構(IV)天線為說明例子，由圖 3.3(a)中可知結構(IV)的外形是由五個圓弧形加上結構(I)所形成的，每個圓弧面積的大小曲率和變化皆可以由圓的半徑 r 大小及圓心 O 位置改變來調整。圖 3.3(a)中 $O = (0,0)$ 是整個天線結構的繪圖座標原點，而圖中的圓弧三和圓弧四是結構(IV)天線才具備的，同時也是結構(IV)天線達到超寬頻全頻帶匹配的重要參數。

前段提到每個圓弧都是由某個半徑長度及圓心位置所構成的圓之一段圓周，所以圓弧一、圓弧二及圓弧五的端點範圍(端點 $a \sim$ 端點 b ；見圖 3.4)以結構(I)天線的三個邊長為基準；而圓弧三和圓弧四是當初在結構(III)產生後才決定的。

訂定出每段圓弧的兩端點之後，再以一條垂直於端點 a 和端點 b 的連線之線段(如圖 3.4(a)~(f)中的虛線段；表示圓心移動路徑)，此線段將往圓弧的反方向無限沿延伸；下面將以圓的方程式及邊界條件來說明圓弧的構造。

$$(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 = r^2 \quad (3-1)$$

$$r = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2} \quad (3-2)$$

$$\phi = \tan^{-1}((y - y_t)/(x - x_t)) \quad (3-3)$$

$$\phi_a \leq \phi \leq \phi_b \quad (3-4)$$

r : 圓的半徑長度

ϕ : 圓周上點 (x_t, y_t) 和 x 軸的夾角

ϕ_a : 圓周上點 (x_a, y_a) 和 x 軸的夾角

ϕ_b : 圓周上點 (x_b, y_b) 和 x 軸的夾角

(x_o, y_o) : 圓心座標

(x_t, y_t) : 圓周上任一點座標

(3-1)式是一個標準的圓方程式，而 ϕ_a 、 ϕ_b 是圓弧在圓周上的邊界夾角(如(3-4)式所

示: $\phi_a \leq \phi \leq \phi_b$), 用來規範圓弧在圓周上的長度。

欲調整圓弧的面積與曲率, 只要將圓心座標沿著圓心移動路徑朝靠近圓弧的方向改變, 或是朝遠離圓弧的方向改變, 就可以達到此一調整目標。當圓心位置愈靠近天線邊緣, 則形成的圓弧面積及其切線斜率愈大; 反之當圓心位置愈遠離天線邊緣則形成的圓弧面積及其切線斜率愈小。

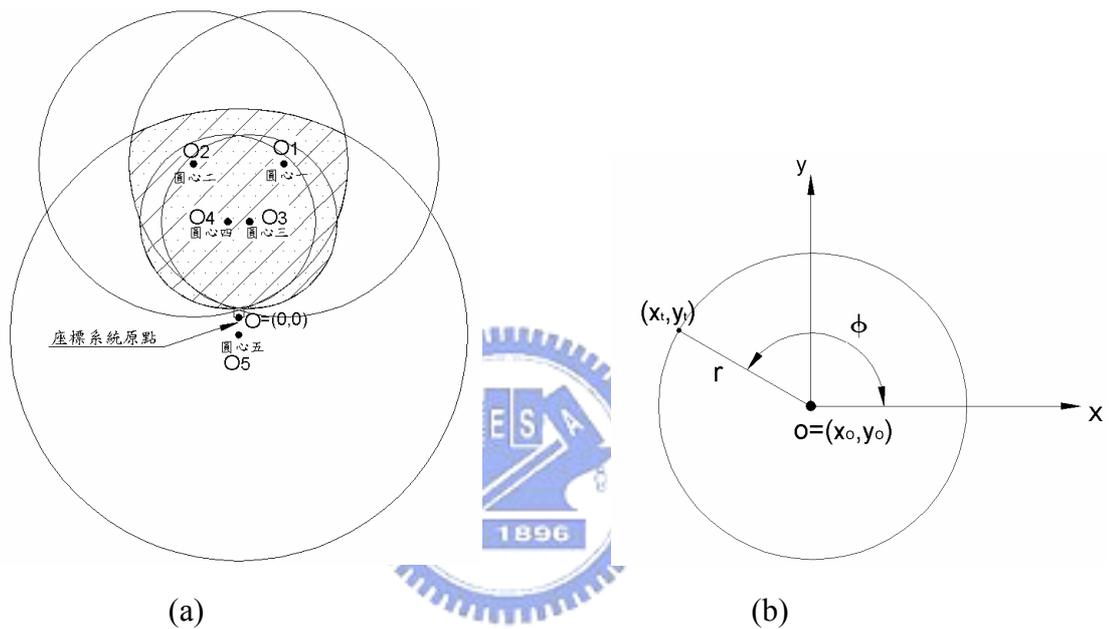
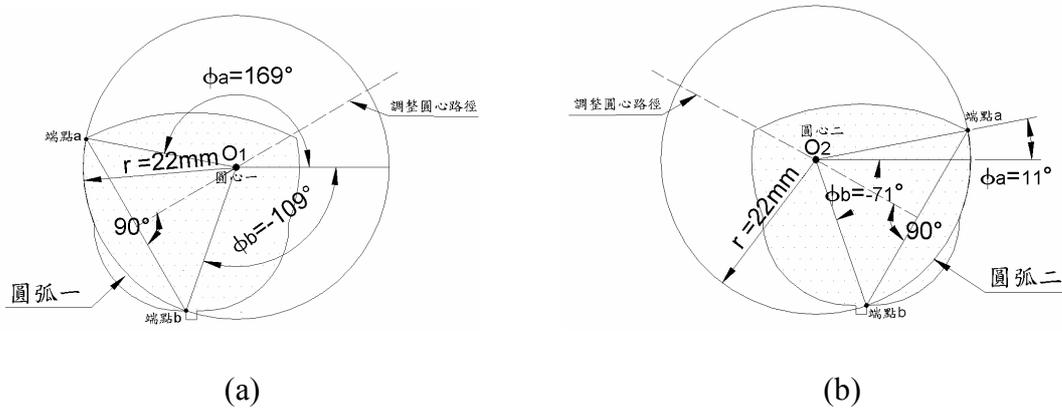


圖 3.3 座標系統說明圖。(a)圓與圓弧之關係圖(以結構(IV)天線為說明例), (b)直角座標與極座標之關係圖。



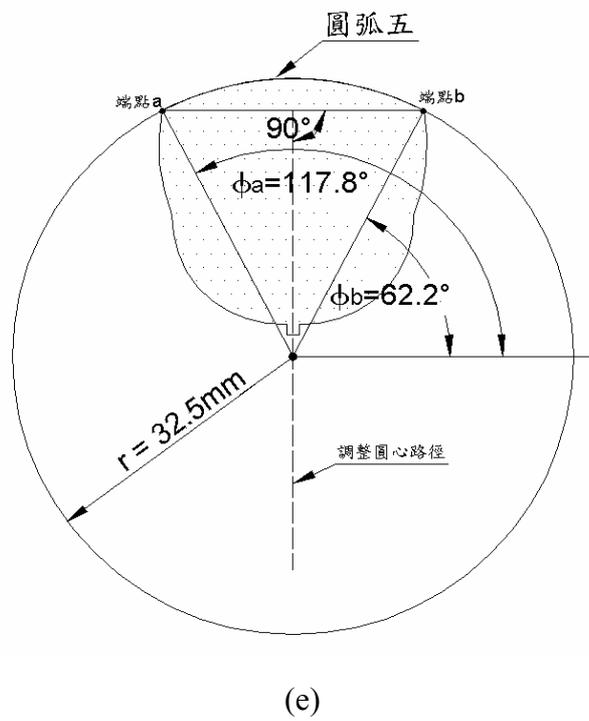
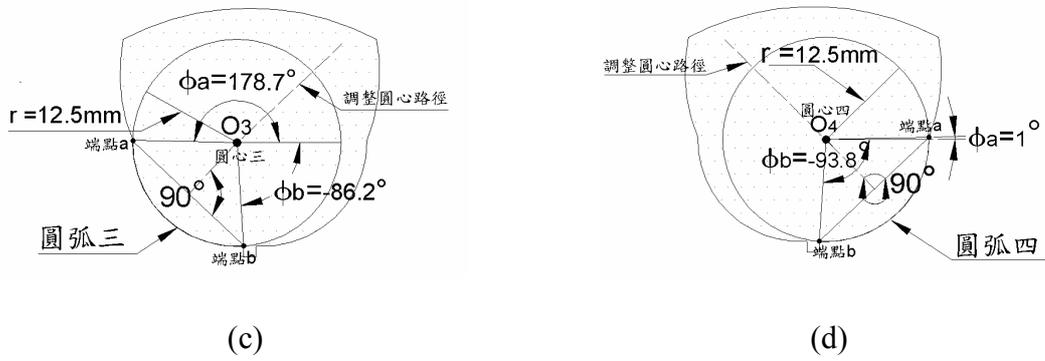


圖 3.4 結構(IV)天線之五個圓弧邊緣結構設計說明圖。(a)圓弧一，(b)圓弧二(c)圓弧三，
(d)圓弧四，(e)圓弧五。

	結構(I)	結構(II)	結構(III)	結構(IV)
圓弧 1	$O_1 = (\infty, \infty)$ $r = \infty mm$	$O_1 = (6.43, 22.05)$ $-109^\circ \leq \phi \leq 169^\circ$ $r = 22mm$	$O_1 = (6.43, 22.05)$ $-109^\circ \leq \phi \leq 169^\circ$ $r = 22mm$	$O_1 = (6.43, 22.05)$ $-109^\circ \leq \phi \leq 169^\circ$ $r = 22mm$
圓弧 2	$O_2 = (\infty, \infty)$ $r = \infty mm$	$O_2 = (-6.43, 22.05)$ $-71^\circ \leq \phi \leq 11^\circ$ $r = 22mm$	$O_2 = (-6.43, 22.05)$ $-71^\circ \leq \phi \leq 11^\circ$ $r = 22mm$	$O_2 = (-6.43, 22.05)$ $-71^\circ \leq \phi \leq 11^\circ$ $r = 22mm$
圓弧 3	無	無	無	$O_3 = (1.55, 13.75)$ $-86.2^\circ \leq \phi \leq 178.7^\circ$ $r = 12.5mm$
圓弧 4	無	無	無	$O_4 = (-1.55, 13.75)$ $-93.8^\circ \leq \phi \leq 1^\circ$ $r = 12.5mm$
圓弧 5	$O_5 = (\infty, \infty)$ $r = \infty mm$	$O_5 = (\infty, \infty)$ $r = \infty mm$	$O_5 = (0, -0.5)$ $62.2^\circ \leq \phi \leq 117.8^\circ$ $r = 32.5mm$	$O_5 = (0, -0.5)$ $62.2^\circ \leq \phi \leq 117.8^\circ$ $r = 32.5mm$

表 3.1 結構(I)~(IV)天線圓弧邊緣參數一覽表



圖 3.5 所示是天線結構 (I) ~ (IV) 的反射損失模擬結果，這四種天線結構當中，反射損失由大至小的排列分別為結構(I) > 結構(II) > 結構(III) > 結構(IV)，而且結構(IV)在 2.45GHz~11GHz 的頻率範圍內，反射損失皆小於 -10dB，在四種結構中是具備最佳的阻抗匹配，而且也符合超寬頻天線所需的匹配頻寬。

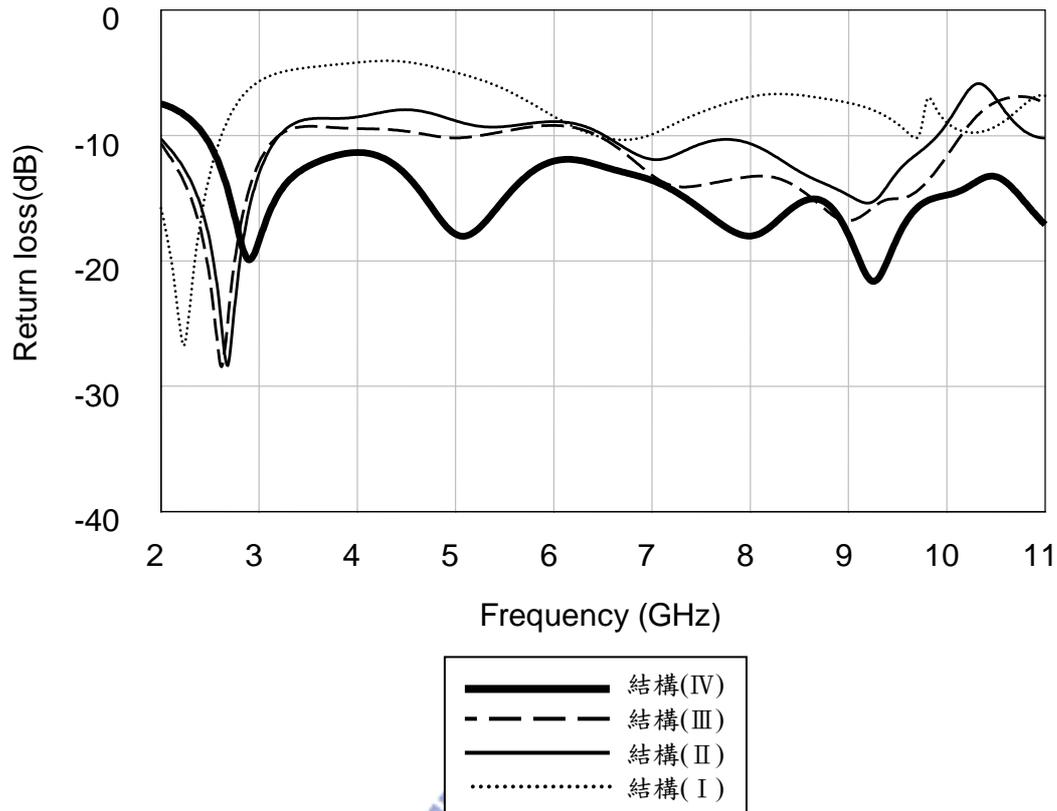
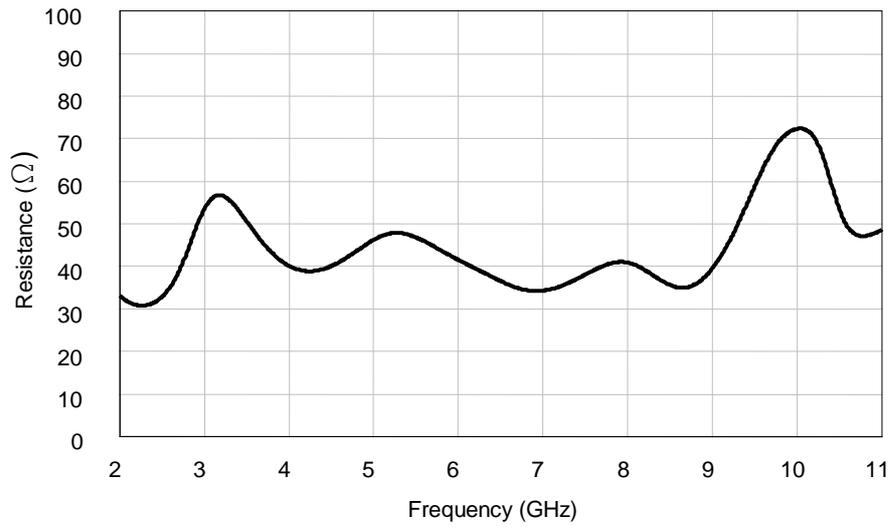
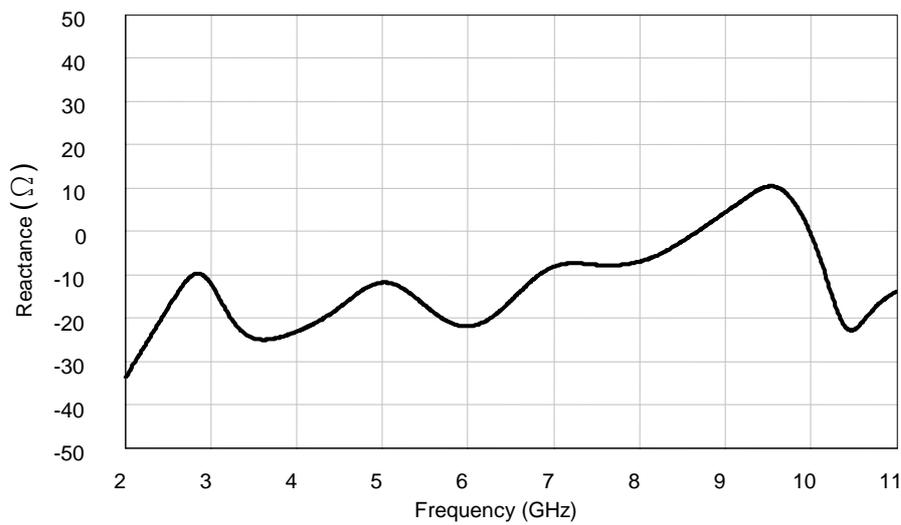


圖 3.5 結構(I)~(IV)天線反射損失模擬結果比較圖。

圖 3.6(a)是表示天線結構(IV)天線的輸入電阻 (阻抗的實部)，圖 3.6(b)則是天線的輸入電抗 (阻抗的虛部)；可以從兩圖當中觀察到實部電阻在 2.45GHz~11GHz 之間，其變化範圍在 $32\Omega(2.45\text{GHz})\sim 72.4\Omega(10.02\text{GHz})$ ，而虛部電抗變化範圍 $-25.01\Omega(3.6\text{GHz})\sim 10.29\Omega(9.58\text{GHz})$ ，且輸入電抗在 8.7GHz 時電抗值為零，顯示天線此時(8.7GHz)有共振行為發生；以特性阻抗 50Ω 為匹配的標準，上述的阻抗變動相對頻率的改變範圍並不大。



(a)



(b)

圖 3.6 結構(IV)天線之輸入阻抗圖。(a)實部電阻，(b)虛部電抗。

圖 3.7 是表示結構(IV)天線上在 10GHz 的電流分佈圖，圖(a) 饋入端電流相位為基準 0° ，圖(b)饋入端電流相位 90° ，圖(c)饋入端電流相位 180° ，圖(d)饋入端電流相位 360° 。觀察不同相位的饋入電流天線上的分佈，可發現電流的分佈類似行進波般的波包，並沒有類似駐波的節點產生；除此之外，還可以發現天線上的電流分佈密度比較集中在邊緣兩側，愈往中央部分的區電流密度愈低。

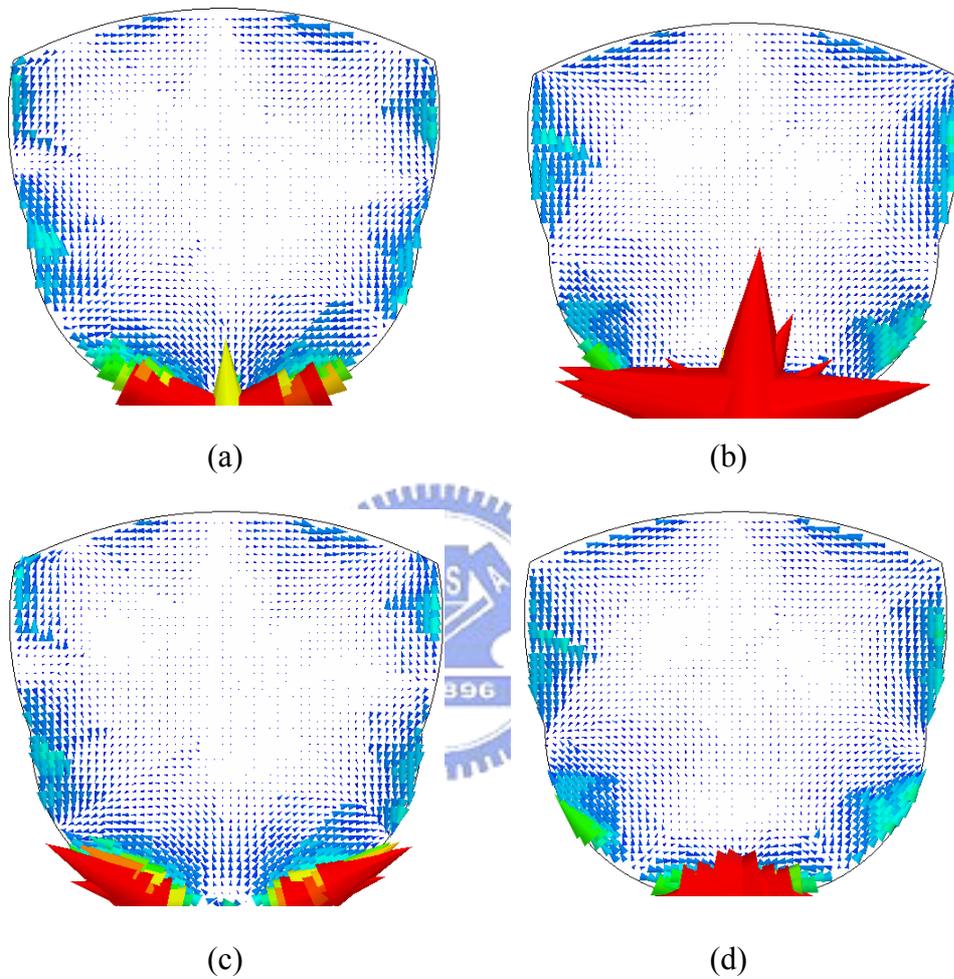


圖 3.7 結構(IV)天線電流結構圖。(a)饋入電流相位 0° ，(b) 饋入電流相位 90° ，(c) 饋入電流相位 180° ，(d) 饋入電流相位 360° 。

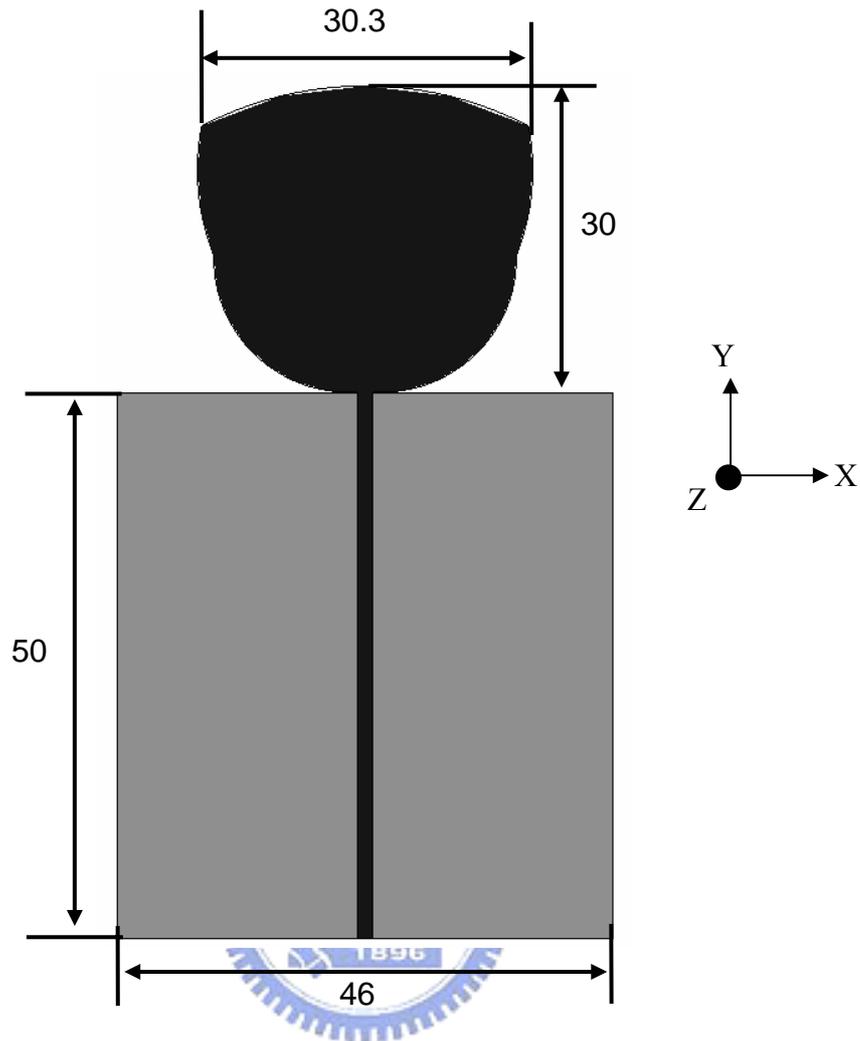


圖 3.8 結構(IV)天線尺寸圖。單位：mm。

黑色區域是位於 PCB 的正面(TOP Side)，灰色區域是位於 PCB 的背面(Bottom Side)

3.2 減少結構(IV)天線長度

結構(IV)天線的尺寸標示於圖 3.8，天線長度由饋入端算起至頂點(Y 方向)的長度為 30mm，而結構(II)和(III)之間差異為一弧狀面積，在反射損失的表現上差異並不大；結構(IV)只是將結構(III)的左右兩側($\pm X$ 方向)的弧狀面積增加，其反射損失就有明顯的變化，基於以上的考量，圖 3.8 所示結構(IV)的長度，應該可以降低，至於降低多少長度，將以反射損失的大小做為依據。

所以將結構(IV)的長度由 30mm (圖 3.8) 降低到 16mm，圖 3.9(a)是降低長度後的天線外形，將其命名為結構(V)，圖 3.9(a)(b)(c)(d)四種外形結構的天線，他們反射損失的模擬結果，如圖 3.10 所示，可知結構(V)(IV)兩者除了 5GHz 至 8GHz 之間反射損失大於-10dB 之外，相對結構(VII)(VIII)，小於-10dB 的最低頻率(3GHz)和超寬頻起始頻(3.1GHz)太接近，在實際上量測上因為一些非理想的原因，可能實測上低頻的部分會超過 3.1GHz，因此決定再增加結構(VI)的弧狀面積，演變為結構(VII)。由 3.10 結構(VII)的反射損失最低頻的部分(小於-10dB)已經降至 2.9GHz，但是在 6GHz~8GHz 頻段之間，反射損失還是超過-10dB，於是將結構(VII)的中央挖了一個長方形的槽孔，也就是結構(VIII)，如圖 3.9(d)所示，再觀察其反射損失，發現和結構(VII)的反射損失相似，正因如此，可以推測在如此的尺寸下，天線的中央部分電流密度並不高，而愈至邊緣電流密度愈高。

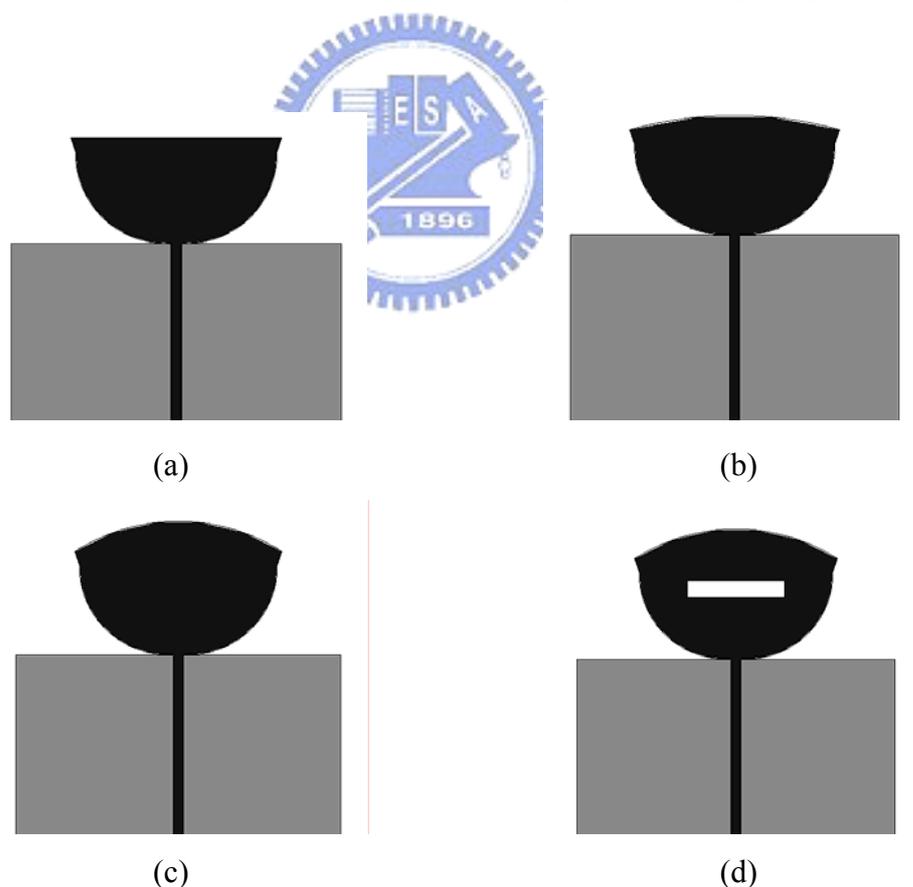


圖 3.9 天線結構圖。(a) 結構(V)，(b) 結構(VI)，(c) 結構(VII)，(d) 結構(VIII)。

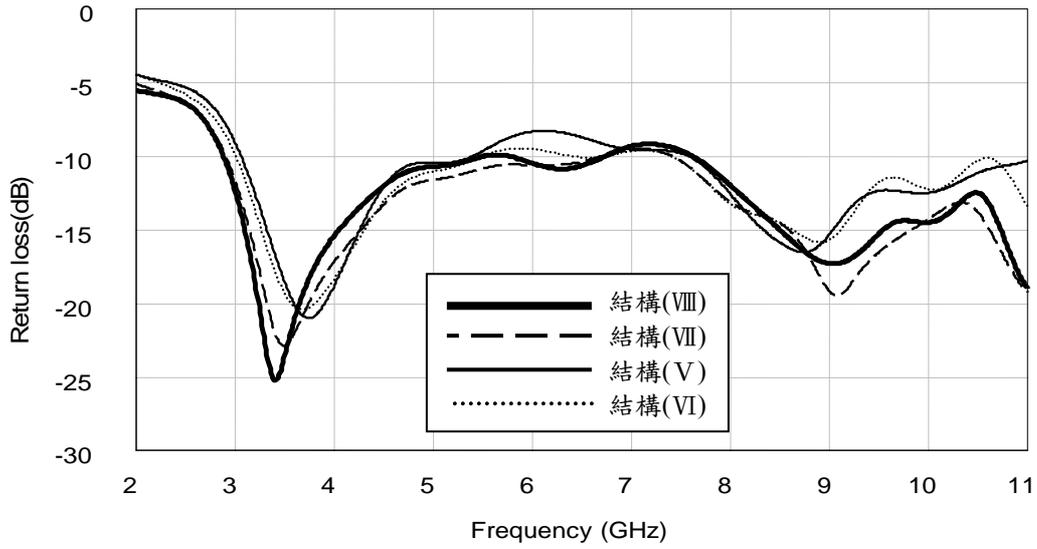


圖 3.10 結構(V)~(VIII)天線反射損失模擬結果比較圖。

3.3 調整天線饋入端間隙來達到匹配效果

由上述可知，結構(VIII)的天線並未全頻段(3.1GHz~10.6GHz)匹配（反射損失小於-10dB），在本章節就調整饋入端的間隙 G （圖 3.9 所示），來完成超寬頻天線的匹配。

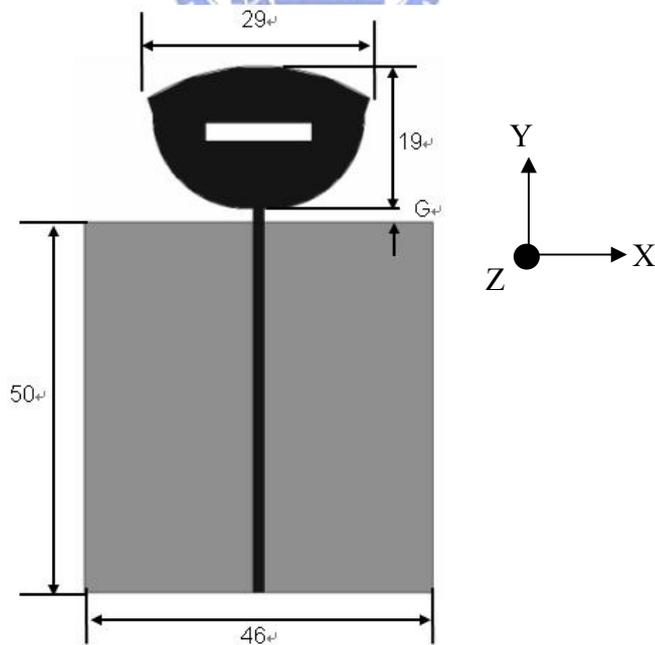


圖 3.11 結構(VIII)天線尺寸圖。單位：mm

黑色區域是位於 PCB 的正面(TOP Side)，灰色區域是位於 PCB 的背面(Bottom Side)

將結構(VIII)天線為基礎，將其間隙長度 G ，調整成 0mm，0.3mm，0.45mm，0.6mm 四種長度，分別使用模擬軟體計算他們的反射損失，並將反射損失的模擬結果集合在一起來觀察 G 的改變對匹配有何影響，如圖 3.10 所示。

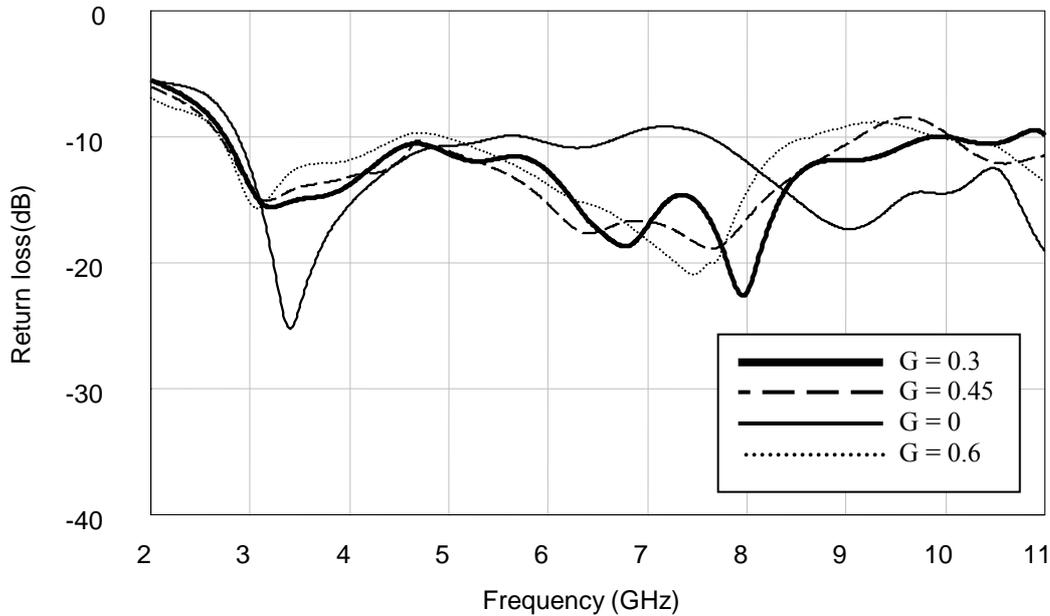
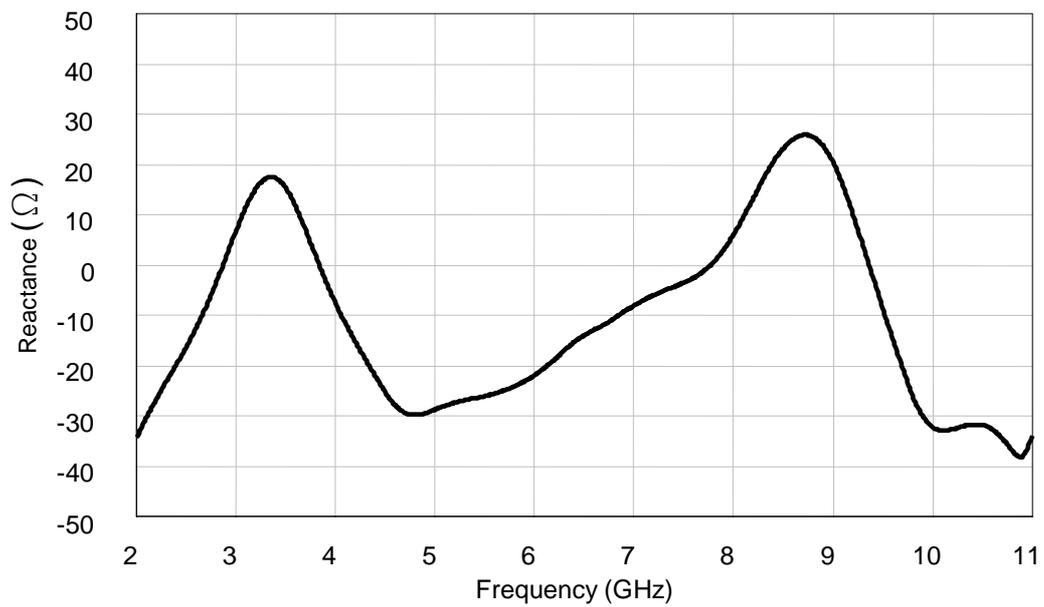
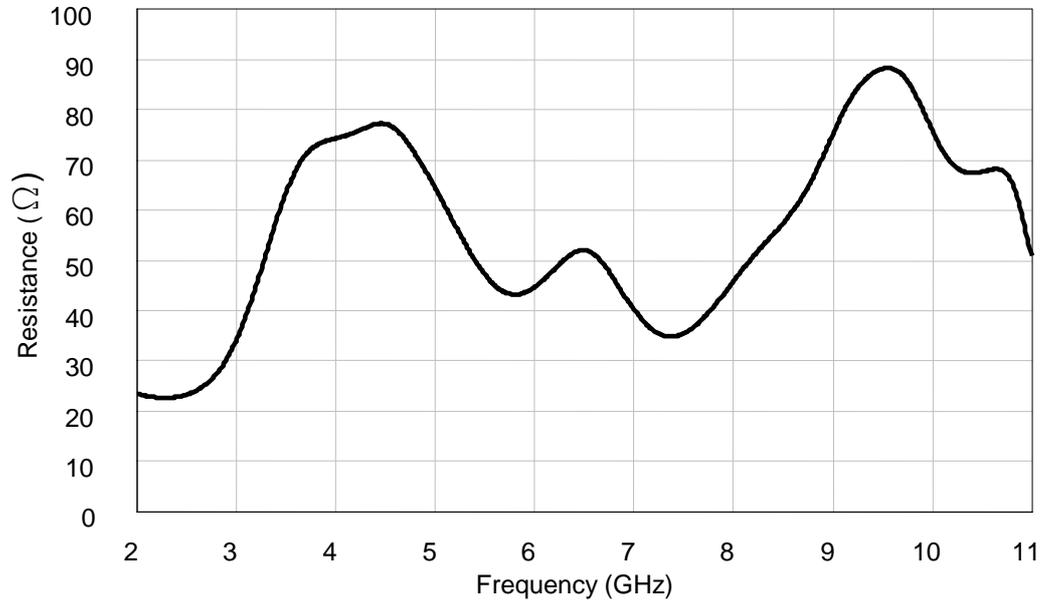


圖 3.12 不同饋入間隙長度(G)之結構(VIII)天線反射損失比較圖。單位：mm

在圖 3.12 中可以觀察到 $G=0.3\text{mm}$ 時天線的反射損失在 $3\text{GHz}\sim 10.6\text{GHz}$ 之間只有在 10GHz 時反射損失等於 -10dB ，其餘部分的反射損失皆在 -10dB 以下；除了反射損失之外，也可以觀察天線輸入阻抗，對「頻率變化」的敏感度來判定寬頻匹配的好壞，圖 3.11 所示即為結構(VIII)天線在饋入間隙 $G=0.45\text{mm}$ 時的實部電阻(圖 3.13(a))及虛部電抗(圖 3.11(b))；在 3.1GHz 至 10.6GHz 的頻段範圍為 $-29.33\sim 25.95\Omega$ ，前面敘述的電阻、電抗變化範圍是大致判斷輸入阻抗對頻率改變的敏感程度，在此強調任一點頻率反射損失，應該是每一點頻率時的電阻、電抗一齊考慮，例如天線的反射損失在 7.94GHz 時的反射損失為 -22.53dB (圖 3.13， $G=0.45\text{mm}$)，相對在 7.94GHz 時，輸入電阻 44.6Ω ，輸入電抗為 4.52Ω ，此時電阻值接近 50Ω ，電抗接近 0Ω ，得到不錯的匹配，但是在 10GHz 時，雖然輸入電阻 74Ω ，蠻接近 50Ω ，但是此頻率下的輸入電抗值為 -32.51Ω ，造成 10GHz

反射損失較大。



(b)

圖 3.13 結構(VIII)天線之阻抗圖。(a)電阻，(b)電抗。

圖 3.14 表示結構表示結構(VIII)天線上在 10GHz 的電流分佈圖，以圖(a) 饋入端電流相位為 0° ，圖(b)饋入端電流相位 80° ，圖(c)饋入端電流相位 160° ，圖(d)饋入端電流相位 240° 。從圖(a)至(d)四個不同饋入電流的相位變化，在天線上的電流分佈猶如行進波般地向天線尾端流動。

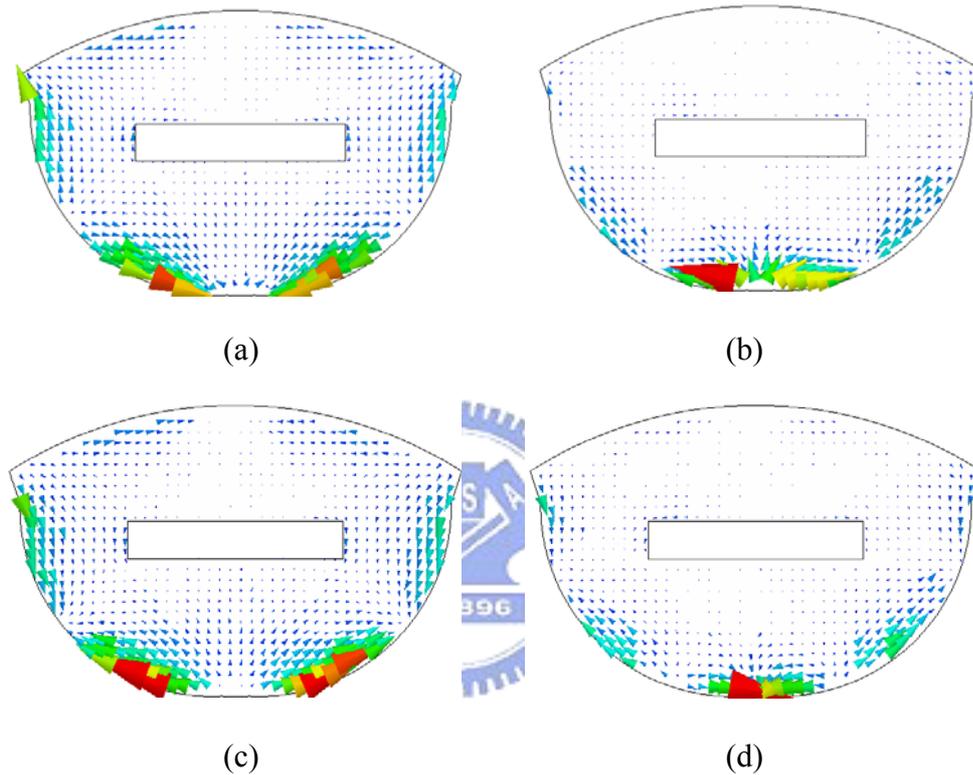


圖 3.14 結構(VIII)天線電流結構圖。(a)饋入電流相位 0° ，(b) 饋入電流相位 80° ，(c) 饋入電流相位 160° ，(d) 饋入電流相位 240° 。

3.4 結構(VIII)天線的實際量測

3.4.1 反射損失的實際量測

圖 3.15 為結構(VIII)天線($G=0.45\text{mm}$)的反射損失量測及模擬結果，虛線線段為模擬的反射損失，以小於 -10dB 為基準，匹配的頻段最低頻的頻率是 2.75GHz ，最高頻的頻率是 10.7GHz ，不過 9.8GHz 到 10GHz 這個頻帶上的反射損失恰好在 -10dB 的臨界值上。

實線線段是表示經實際量測得到的反射損失，實測反射損失低於-10dB 的頻帶範圍是 2.85GHz（最低頻率）至 10.7GHz（最高頻率）；和模擬結果比較起來，實測的結果低頻部分稍微偏移了 0.1GHz，高頻的部分則模擬結果和實測結果相同(10.7GHz)，而且在實際的反射損失匹配的頻帶範圍(2.85GHz~10.7GHz)反射損失的大小小於-10dB。

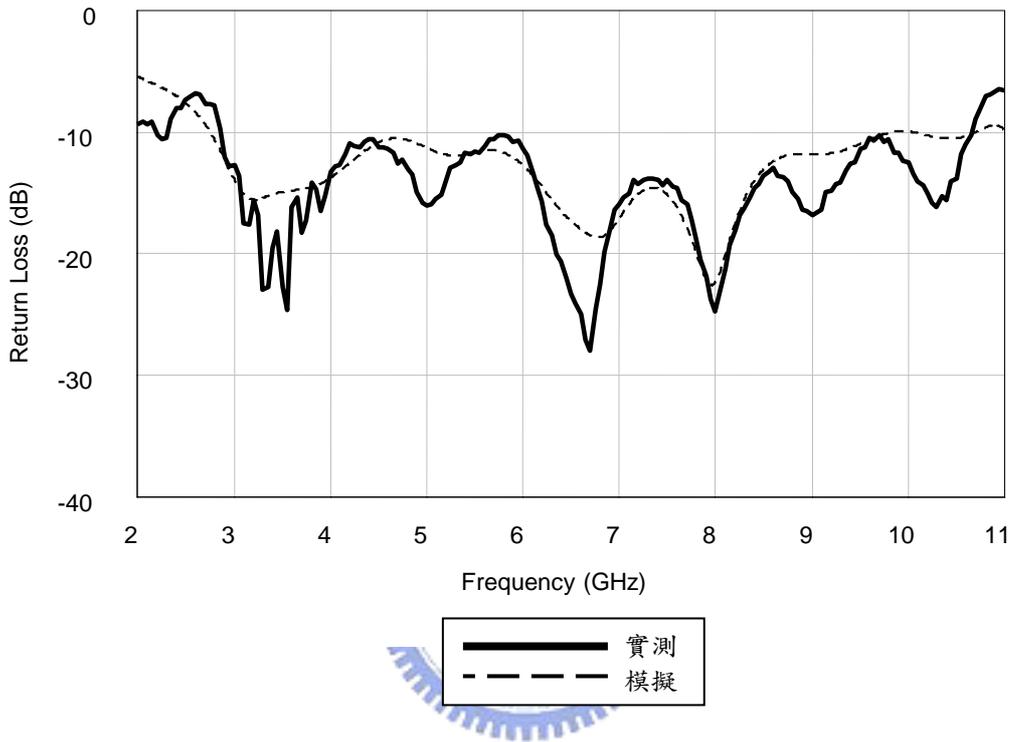


圖 3.15 結構(VIII)天線(G=0.45mm)的反射損失量測及模擬結果。

3.4.2 天線輻射場型(Radiation Pattern)量測結果

此章節內容為結構(VIII)天線(G=0.45mm)的輻射場型實測結果，分別針對 3.1GHz，4GHz，5GHz，6GHz，7GHz，8GHz，9GHz，10GHz，10.6GHz 等九個特定種頻率下量測天線輻射場型，而在每頻率下，會選擇天線三個不同平面(XZ，XY，YZ 平面)來測量其輻射場型。每一個平面會展示三個場型，其包括兩個互相垂直的電場極化(E-phi，E-theta)，另一個是前兩者的極化向量加成總和(E-total)，如圖 3.16 所示。觀察 3.1GHz，4GHz，5GHz，6GHz 四個頻率時的場型發現，XZ 平面(phi 方向的電場極

化)上具備近似全向性(Omnidirectional)的輻射場，在相同的平面當頻率增加到 7GHz，輻射場型開始有明顯的變化，在某些角度其最大增益和最小增益差值超過-10dBi (請參考圖 3.20(a)， 3.21(a)， 3.22(a)， 3.23(a)及 3.24(a)，)。



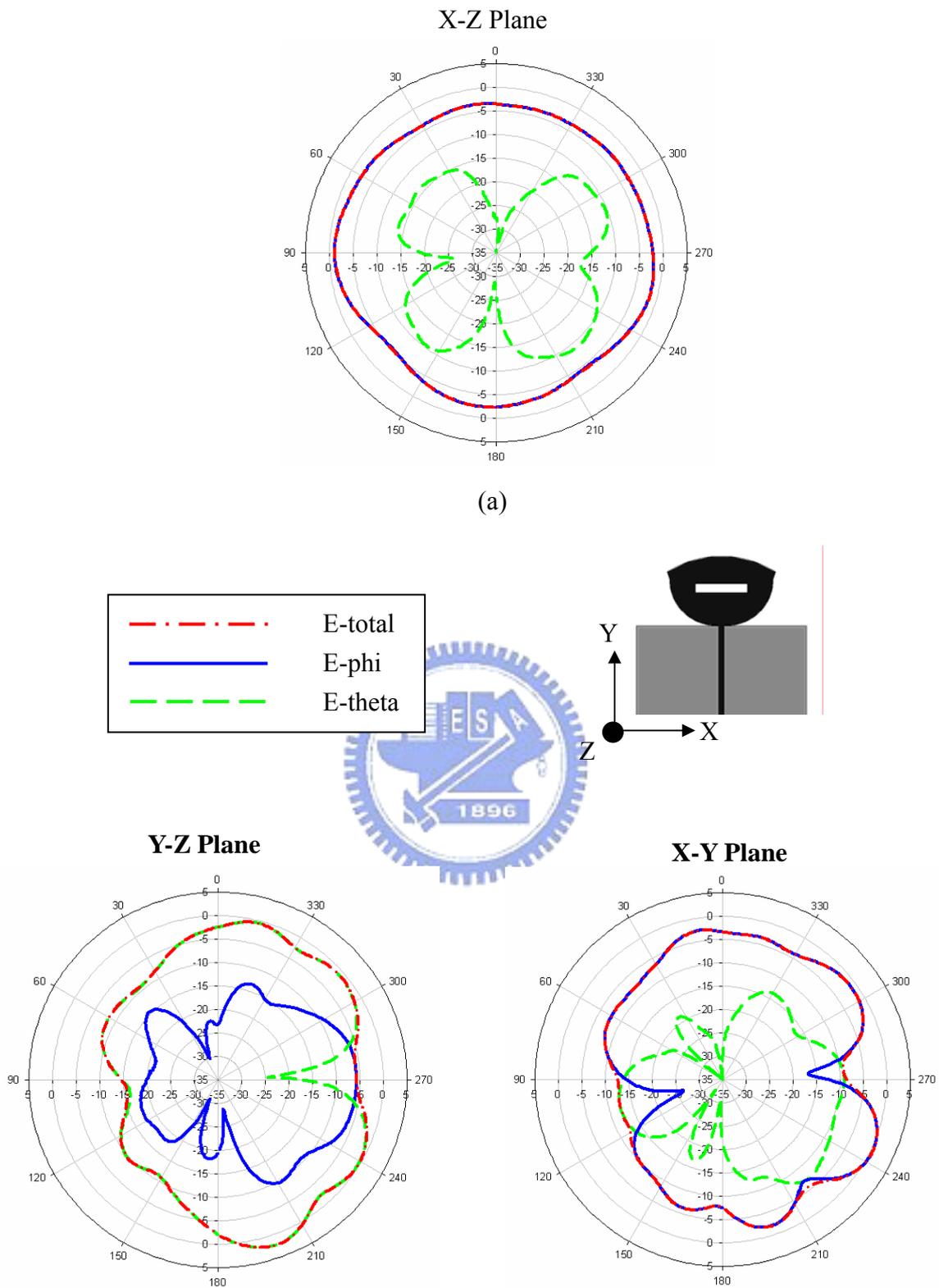


圖 3.16 結構(VIII)天線 3.1GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b) Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

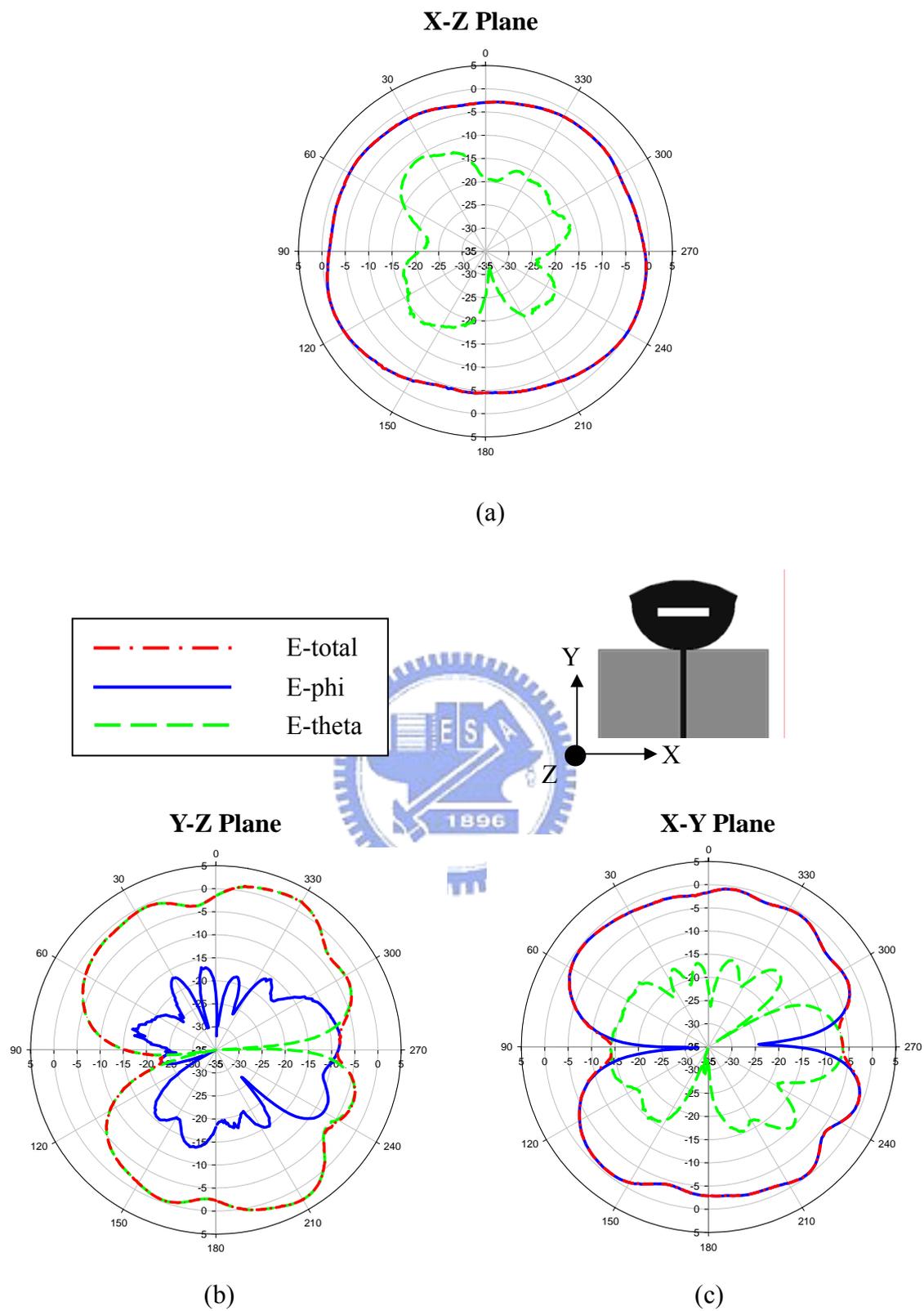
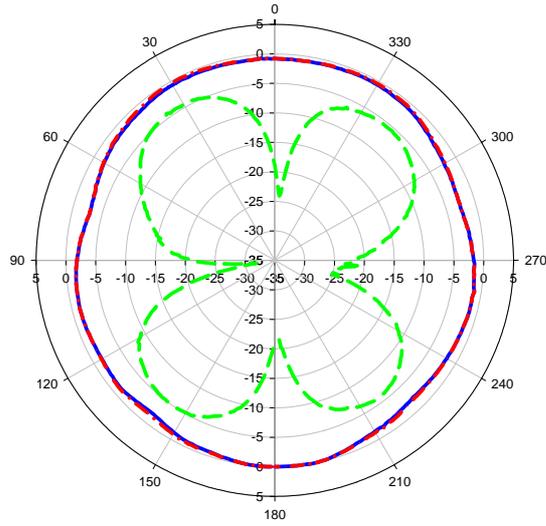
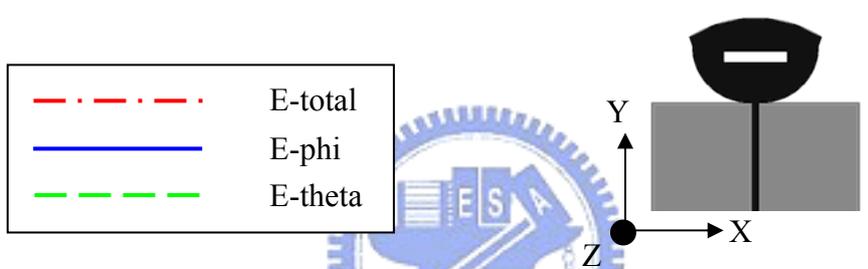


圖 3.17 結構(VIII)天線 4GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b) Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

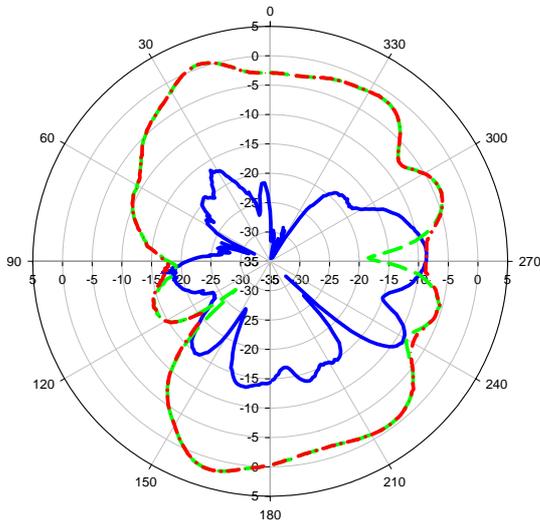
X-Z Plane



(a)

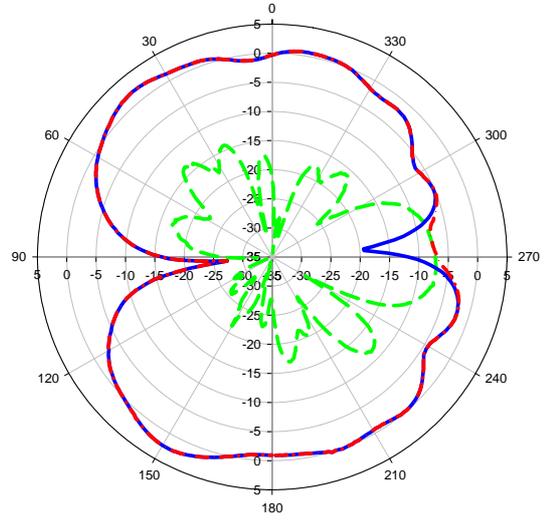


Y-Z Plane



(b)

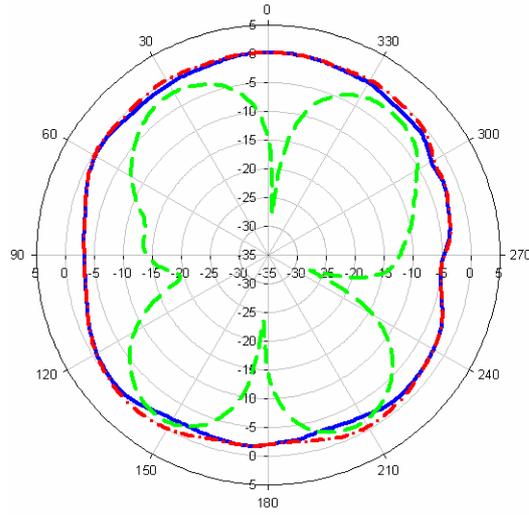
X-Y Plane



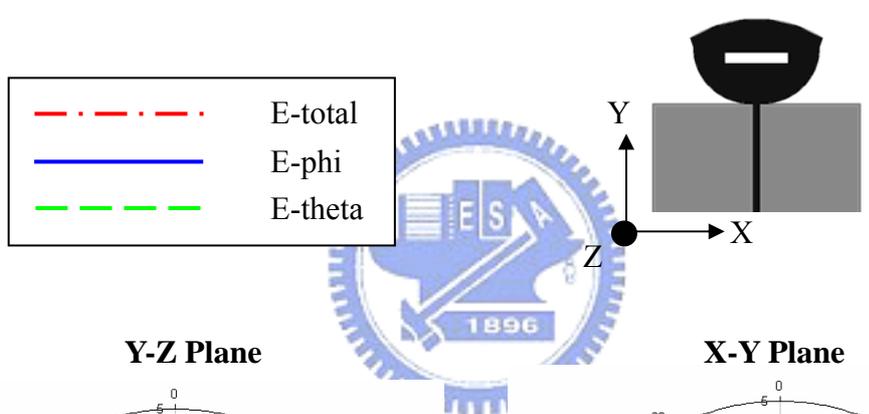
(c)

圖 3.18 結構(VIII)天線 5GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b)Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

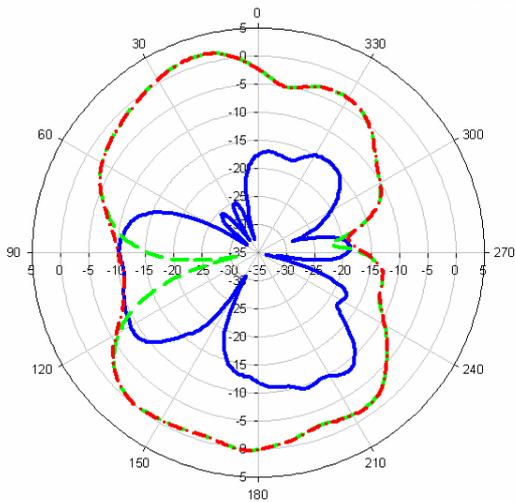
X-Z Plane



(a)

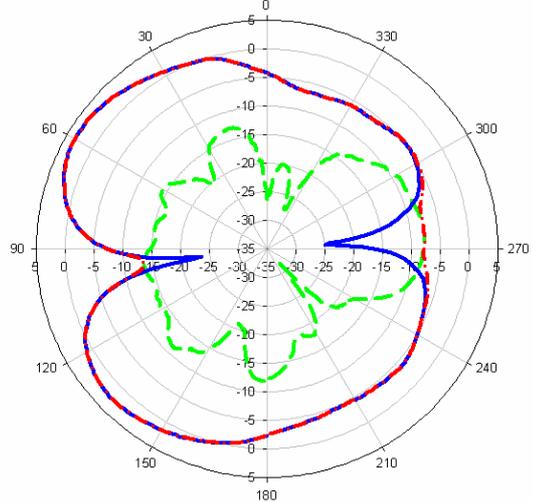


Y-Z Plane



(b)

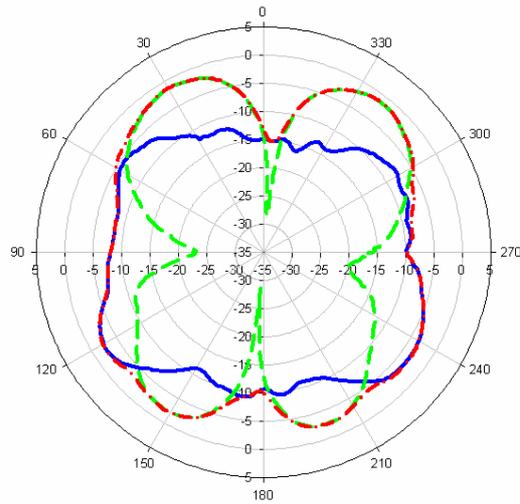
X-Y Plane



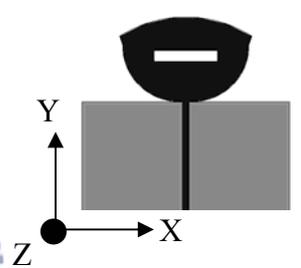
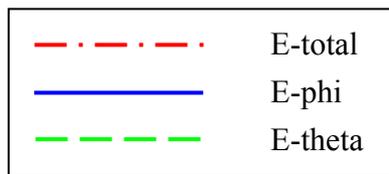
(c)

圖 3.19 結構(VIII)天線 6GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b) Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

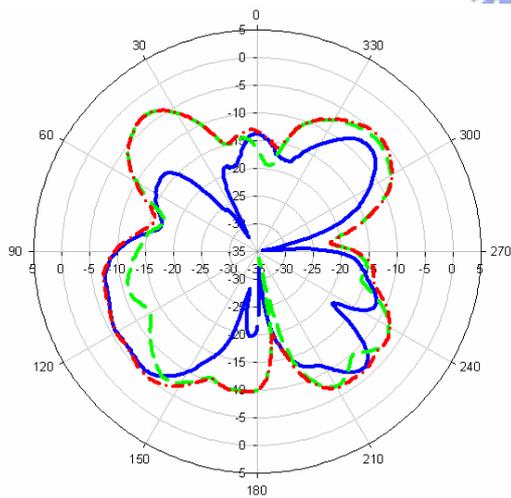
X-Z Plane



(a)

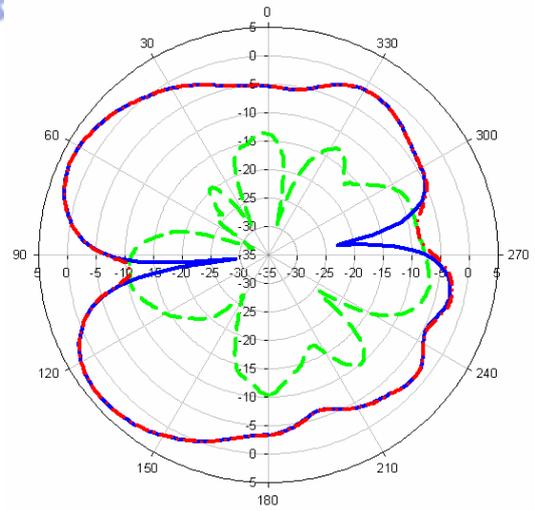


Y-Z Plane



(b)

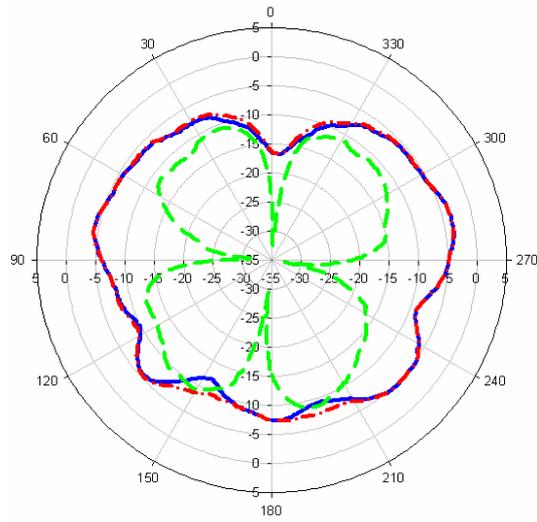
X-Y Plane



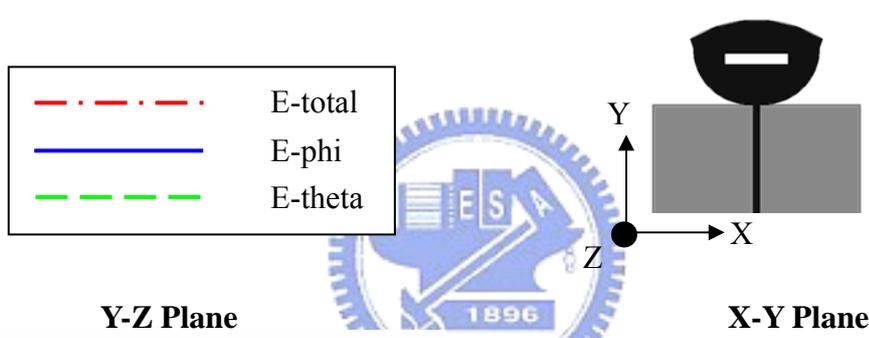
(c)

圖 3.20 結構(VIII)天線 7GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b)Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

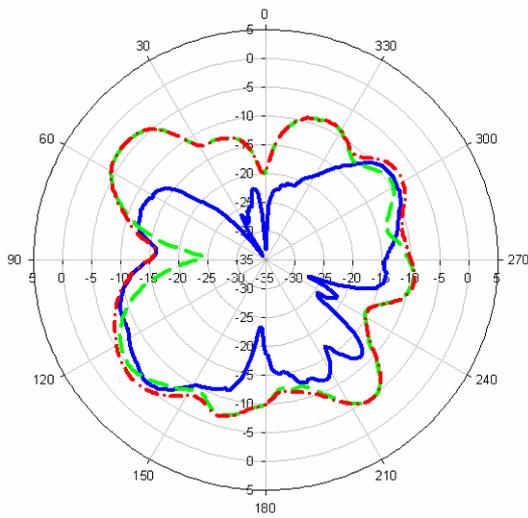
X-Z Plane



(a)

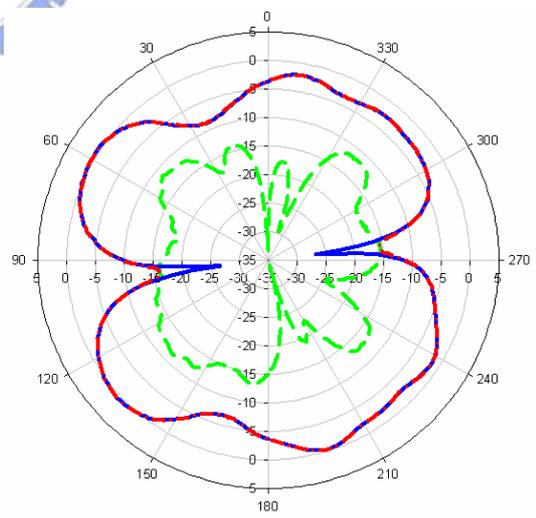


Y-Z Plane



(b)

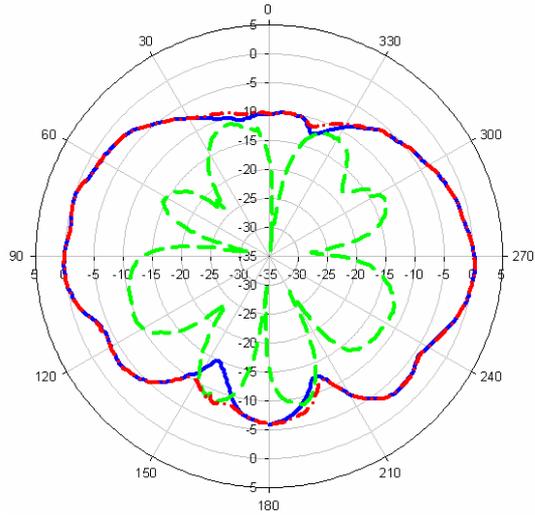
X-Y Plane



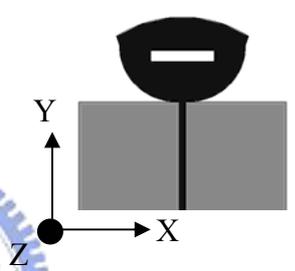
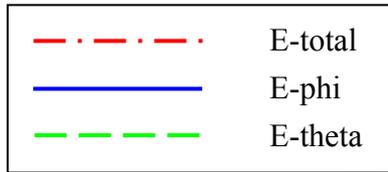
(c)

圖 3.21 結構(VIII)天線 8GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b) Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

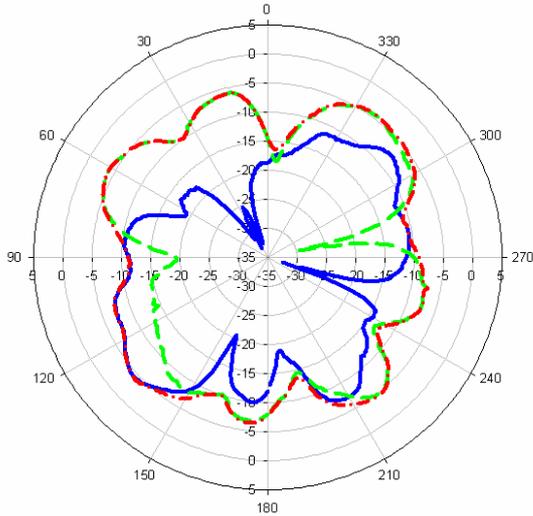
X-Z Plane



(a)

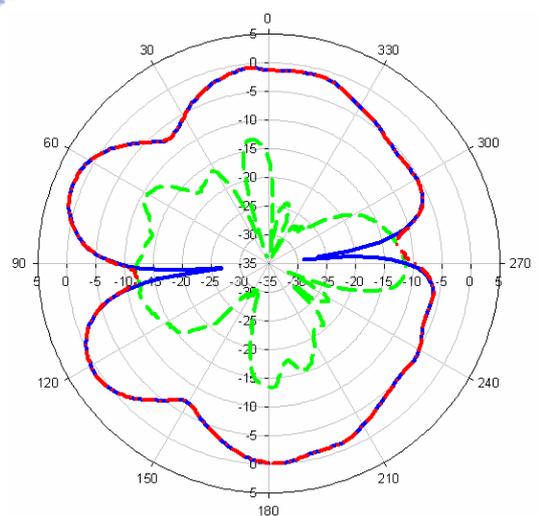


Y-Z Plane



(b)

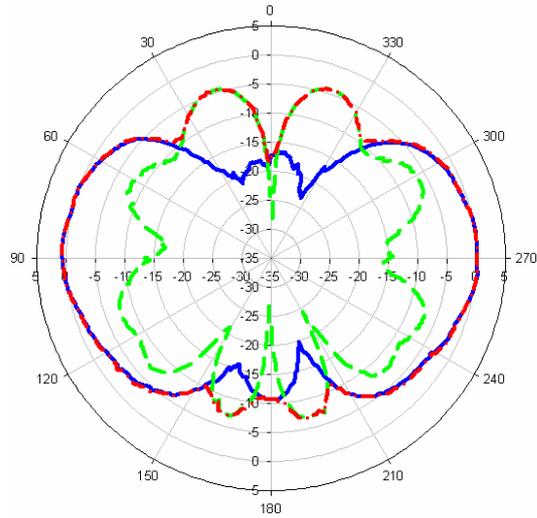
X-Y Plane



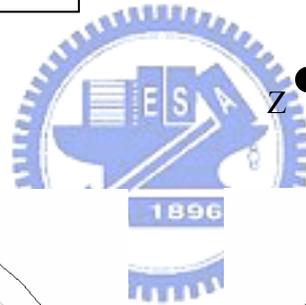
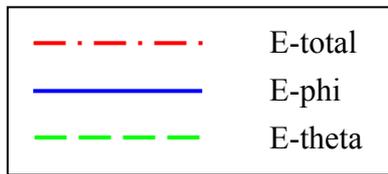
(c)

圖 3.22 結構(VIII)天線 9GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b) Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

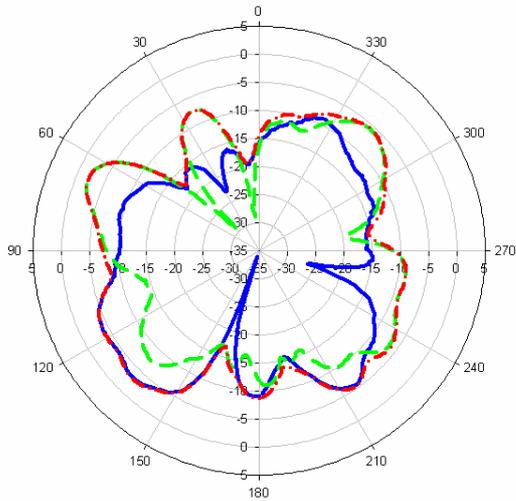
X-Z Plane



(a)

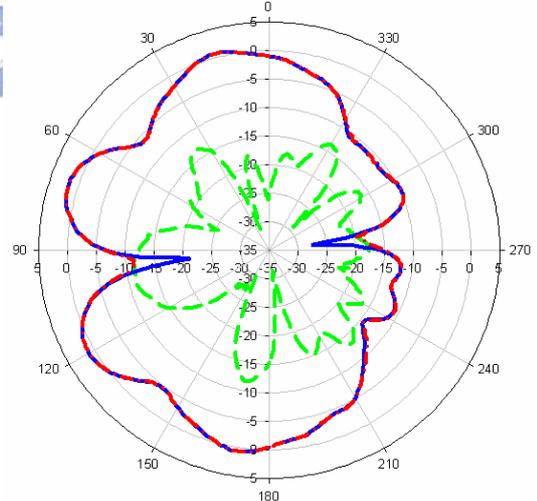


Y-Z Plane



(b)

X-Y Plane



(c)

圖 3.23 結構(VIII)天線 10GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b) Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

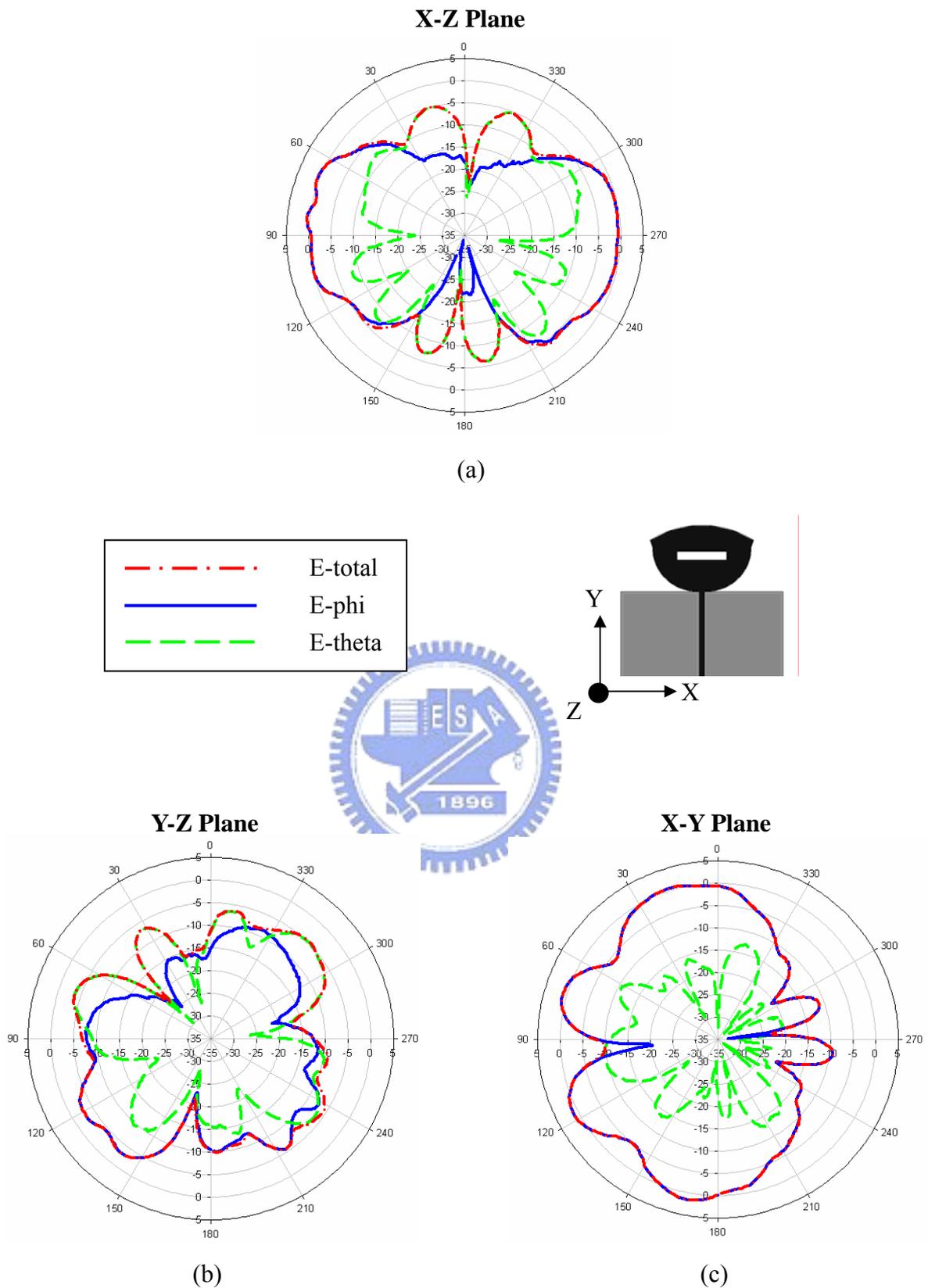


圖 3.24 結構(VIII)天線 10.6GHz 輻射場型。(a)X-Z 平面，(b) Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。

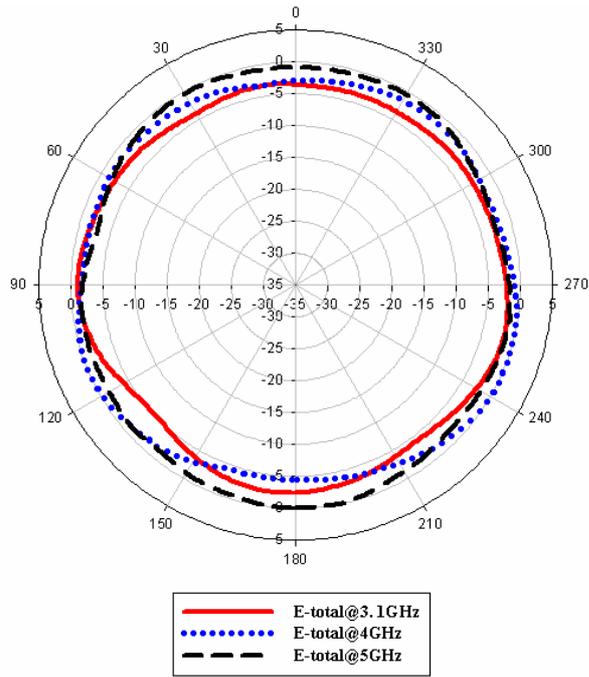
	X-Y Plane		X-Z Plane		Y-Z Plane	
	peak gain(dBi)	average gain(dBi)	peak gain(dBi)	average gain(dBi)	peak gain(dBi)	average gain(dBi)
3.1GHz	0.49	-5.94	-1.10	-3.02	2.25	-5.49
4 GHz	-0.36	-3.13	0.14	-1.91	2.55	-3.79
5 GHz	2.90	-2.63	0.02	-1.24	1.90	-5.81
6 GHz	3.54	-2.94	0.35	-1.27	1.70	-5.20
7 GHz	3.43	-2.41	-1.26	-5.18	-3.25	-9.80
8 GHz	0.62	-4.11	-3.53	-7.33	-3.43	-9.47
9 GHz	1.61	-3.80	0.37	-4.99	-3.99	-7.89
10 GHz	1.66	-5.43	0.99	-7.02	-2.12	-8.90
10.6 GHz	1.56	-5.93	0.61	-5.55	-2.80	-8.71

表 3.2 結構(VIII)天線在 3.1GHz~10.6GHz 之輻射場型的最大增益和平均增益

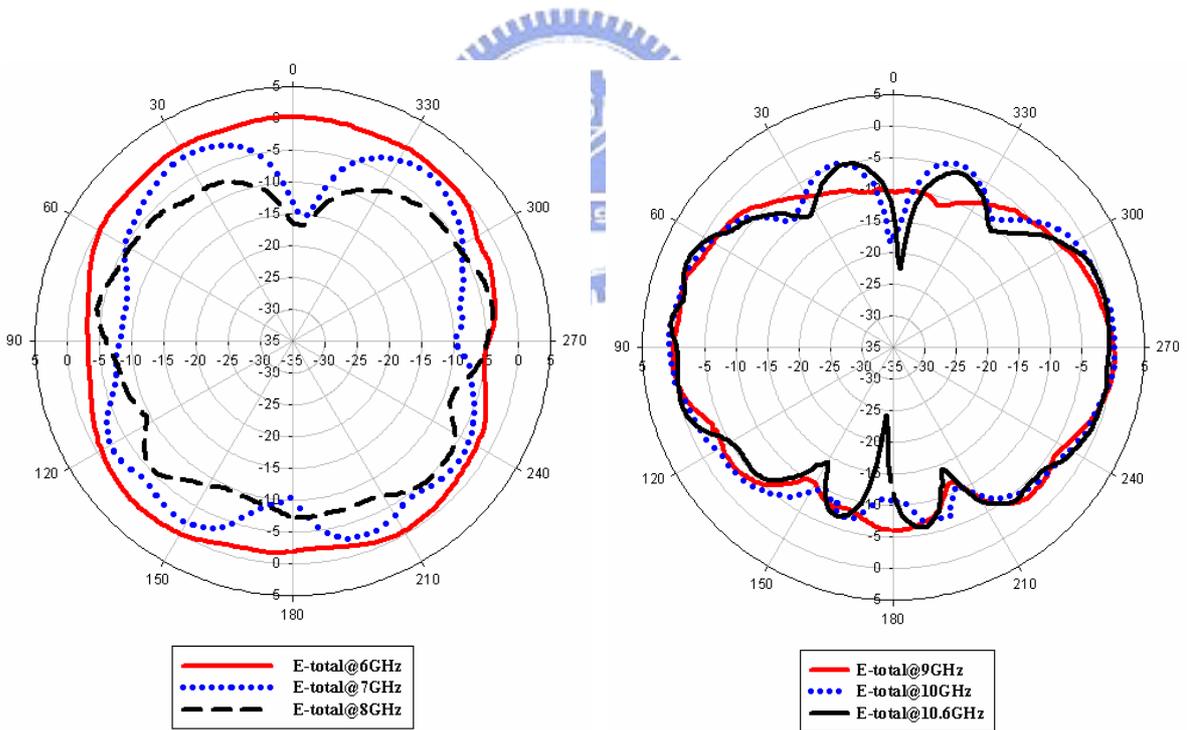
為了要更進一步了解天線每一個平面測得的輻射場型與對應頻率的響應；所以將同一平面不同頻率下測得的輻射型疊放在一起。(如圖 3.25, 3.26, 及 3.27 所示), 以圖 3.25 為例, 此圖是天線的 X-Y 平面, E-total 極化方向, 所量測的輻射場型, 為了避免九個頻率下量測得的場型疊放在同一個圖中造成觀察不便, 所以以頻率不同分成三組, 第一組是 3.1, 4, 5GHz(圖(a)所示), 第二組是 6, 7, 8 GHz(圖(b)所示), 第三組是 9, 10, 10.6GHz 下的場型分佈(圖(c)所示)。

如果將不同角度方位在頻率 3.1GHz~10.6GHz 的頻寬內對應天線功率增益變化, 放置在同一個圖上, 可清楚觀察在每一個平面, 當天線接收的方位變化其接收或發射的功率關係, 圖 3.28 就是將每個平面分割 4 個方位(0° , 90° , 180° , 270°), 以利觀察每一個方位, 天線的頻率響應。

X-Z Plane



(a)



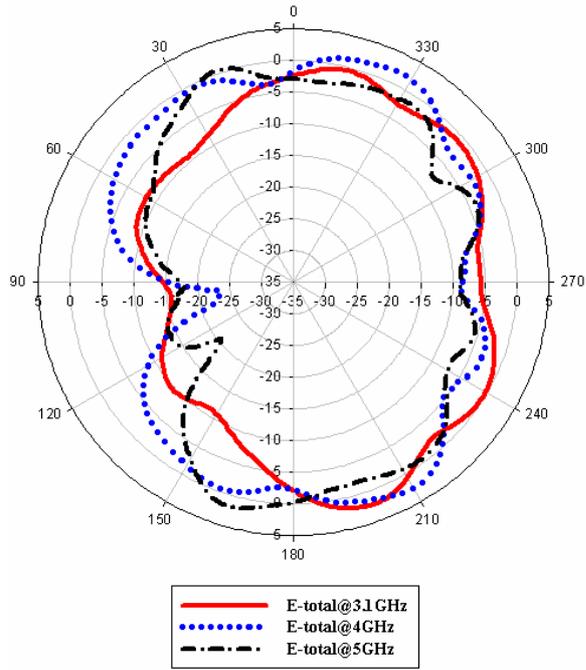
(b)

(c)

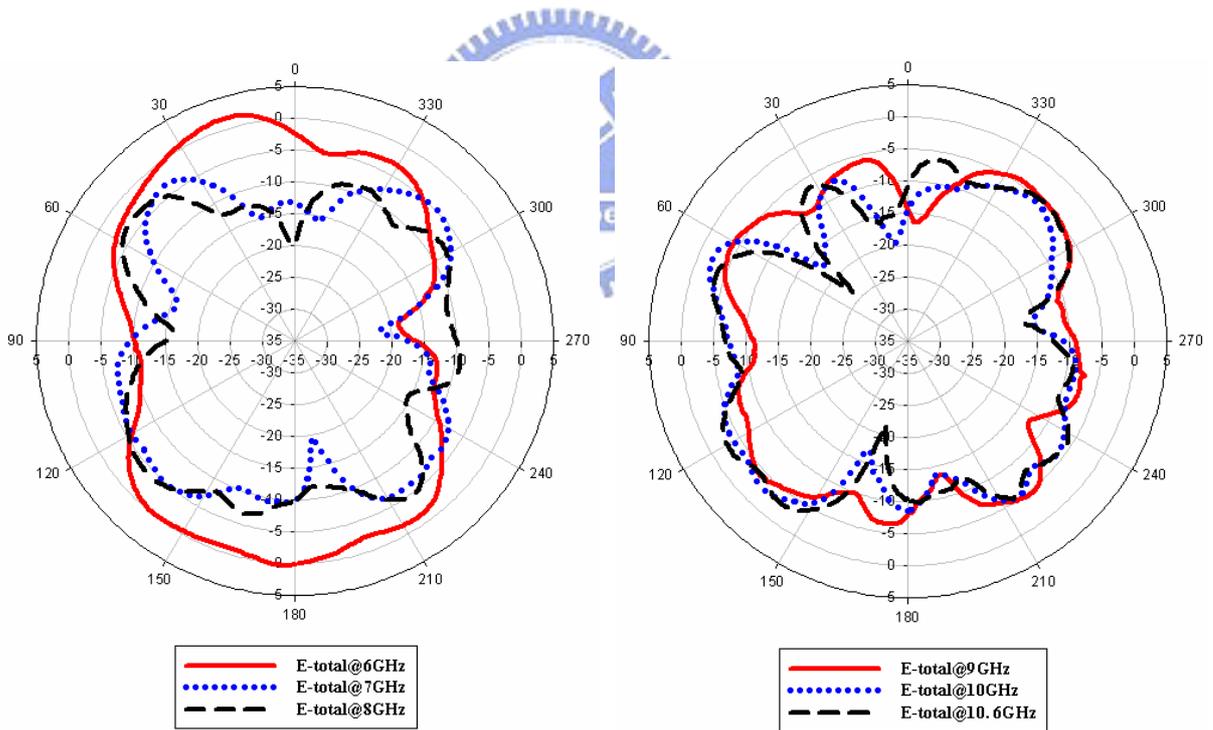
圖 3.25 結構(VIII)天線 X-Z 平面 3.1GHz~10.6GHz 輻射場型比較圖

(a)E-total@3.1、4、5GHz。(b)E-total@6、7、8GHz。(c)E-total@9、10、10.6GHz。

Y-Z Plane



(a)



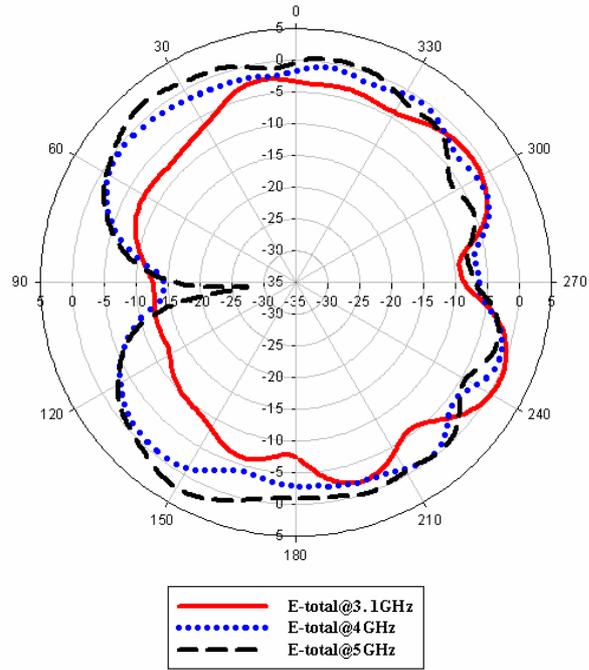
(b)

(c)

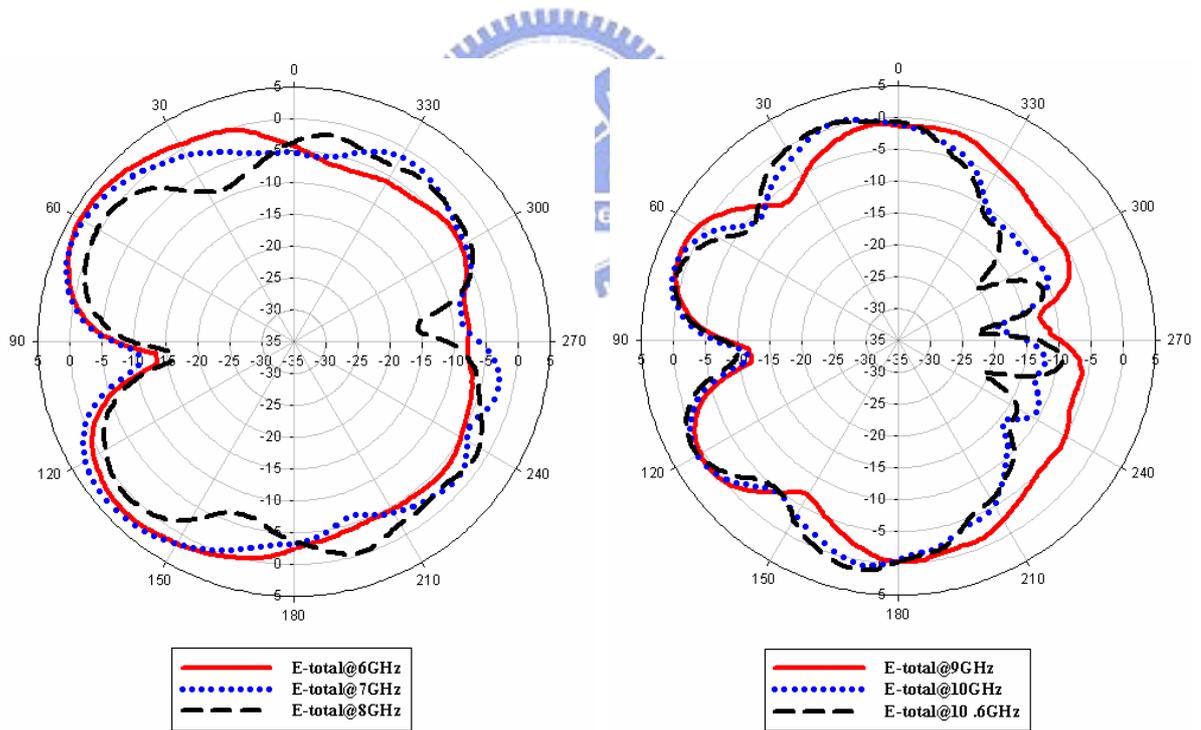
圖 3.26 結構(VIII)天線 Y-Z 平面 3.1GHz~10.6GHz 輻射場型比較圖

(a)E-total@3.1、4、5GHz。(b)E-total@6、7、8GHz。(c)E-total@9、10、10.6GHz。

X-Y Plane



(a)



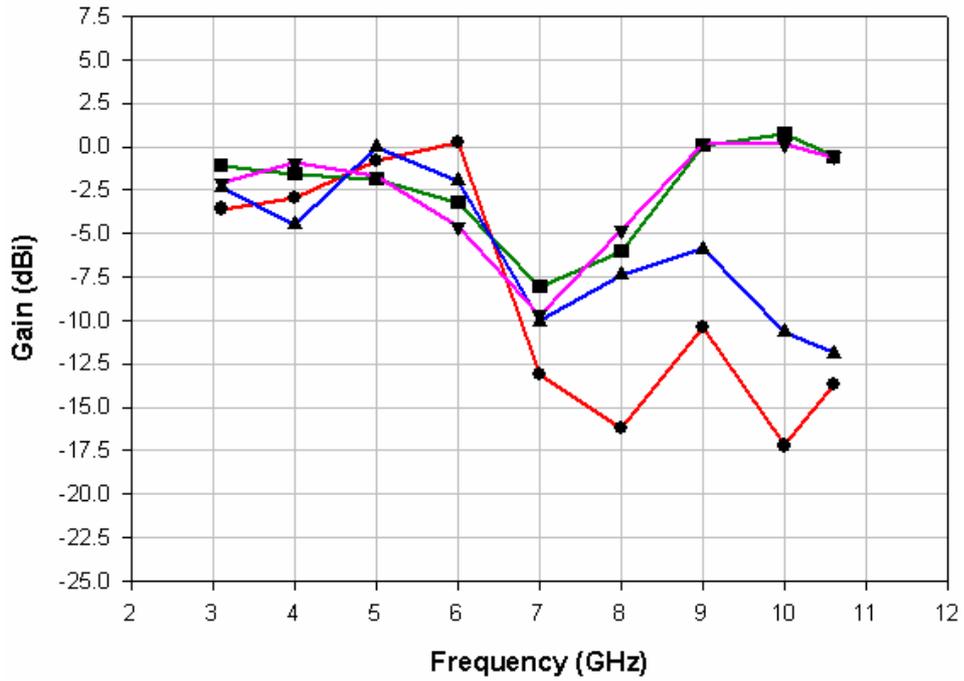
(a)

(b)

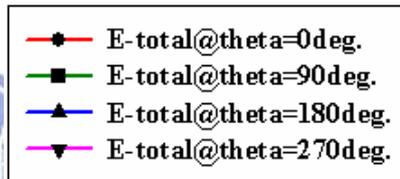
圖 3.27 結構(VIII)天線 X-Y 平面 3.1GHz~10.6GHz 輻射場型比較圖

(a)E-total@3.1、4、5GHz。(b)E-total@6、7、8GHz。(c)E-total@9、10、10.6GHz。

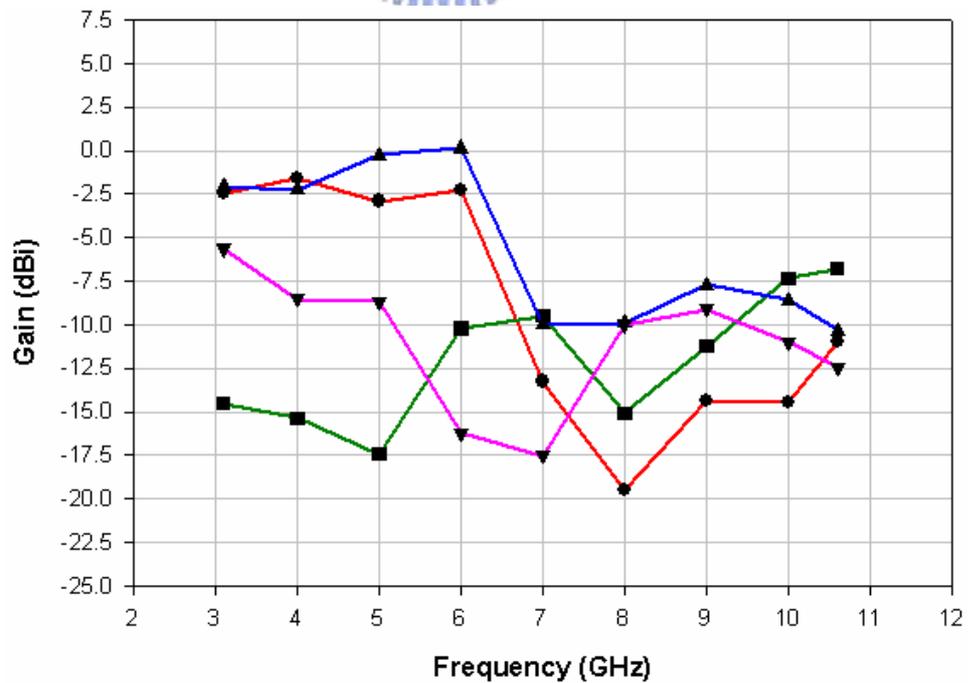
X-Z Plane



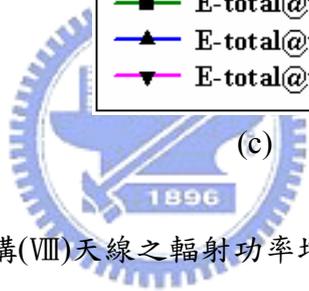
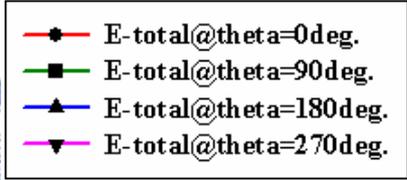
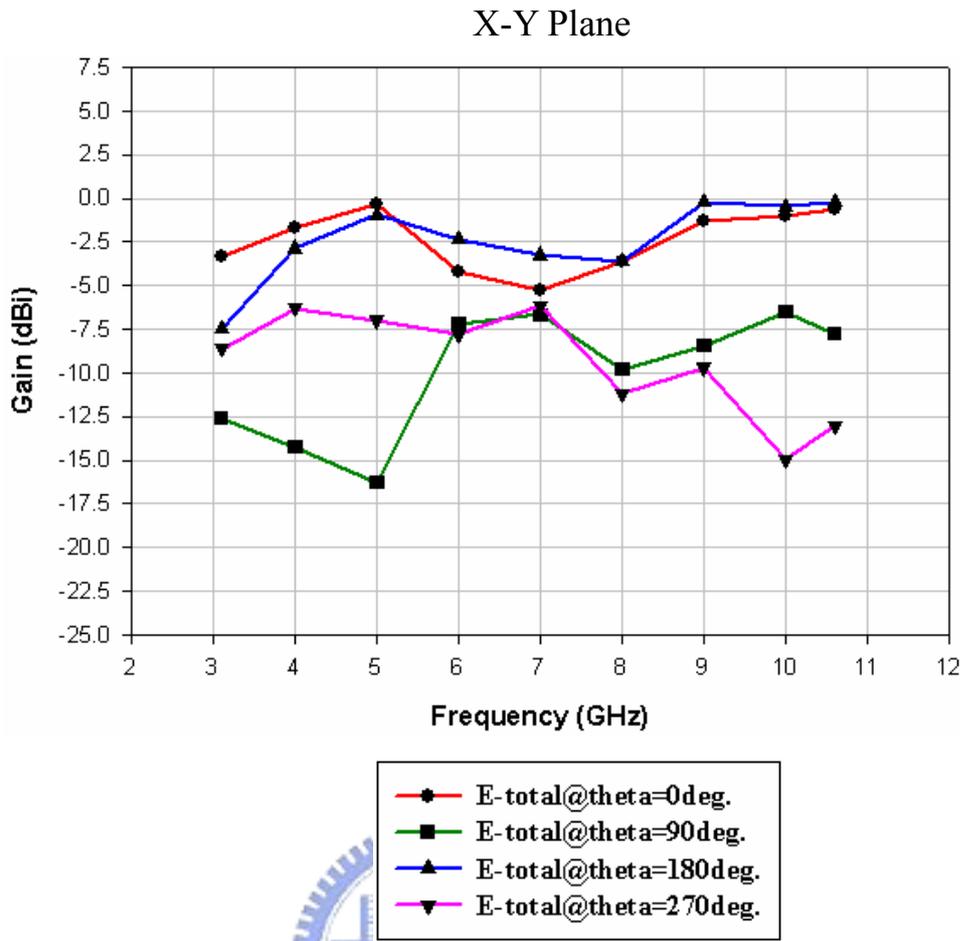
(a)



Y-Z Plane



(b)



(c)

圖 3.28 結構(VIII)天線之輻射功率增益頻率響應圖。

(a)X-Z 平面，(b) Y-Z 平面，(c) X-Y 平面。