

# 實驗六

# 6

## 長方形波導及衰減器與共振腔

### 6-1 長方形波導與衰減器量測

#### 實驗原理：

由實驗二可知，在微波系統中，使用被動元件將造成能量損耗，該項損耗並非刻意製造，乃元件本身特性所造成，稱為『穿透損耗』(insertion loss)。但在特殊應用中，能量損耗被刻意製造，則稱為『衰減』(attenuation)。本實驗中，將使用網路分析儀量測長方形波導與衰減器之穿透係數，並以此獲得穿透損耗與衰減量。

#### 實驗器材：

1. 短、長長方形波導二只
2. 轉接器(HP adapter X281A N-WR90)
3. 可調式衰減器 #506
4. 固定式衰減器二只 #513A/513B
5. 網路分析儀 (Agilent N5230A、E5071C)
6. 同軸校準器 (Agilent 85052D 3.5mm calibration kit)

#### 實驗目的：

使用網路分析儀量測雙埠元件之  $S$  參數，以獲得其穿透係數、衰減量等元件特性。

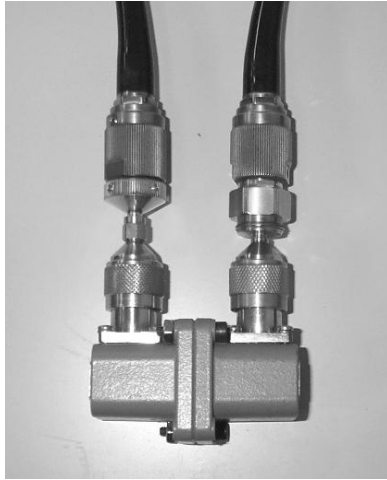
#### 實驗步驟：

##### 第一部分、校準網路分析儀－響應校準(response calibration)

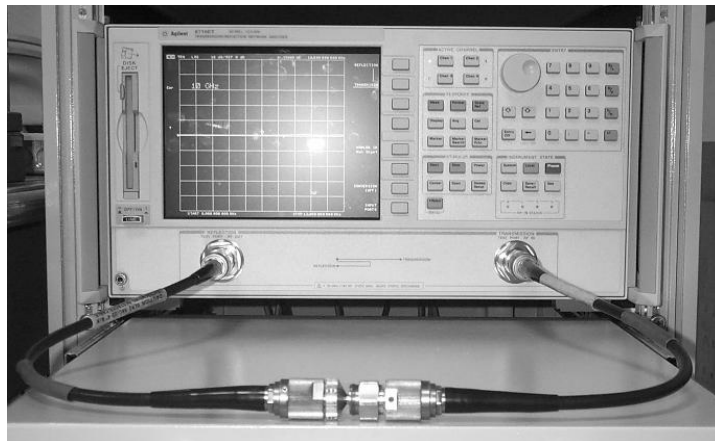
1. 將網路分析儀量測頻率範圍設定在 6 GHz 至 13 GHz。(本實驗欲量測之長方形波導與衰減器主要操作在 X-頻段(X-band)8~12GHz 且長方形波導之截止頻率約為 6.5GHz，因改變量測頻率範圍，就必須重新校準網路分析儀，故需在校準前決定欲量測之頻率範圍)。
2. 將網路分析儀之測試纜線連接如圖一所示，並參照附錄七之操作程序，對網路分析儀進行響應校準。值得注意的是，在進行響應校準時，若將兩轉接器對接，則可將轉接器之效應去除，故量測之結果已不含轉接器效應。但若於進行響應校準時，只將網路分析儀之測試纜線對接，如圖二所示，則量測之結果將包含待測元件兩端之轉接器效應。

## 第二部分、導波管與衰減器的量測

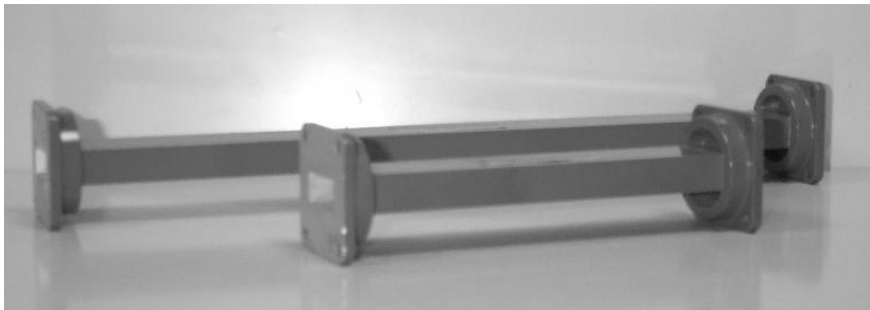
1. 本實驗之待測元件如圖三及圖四所示。



圖一、網路分析響應校準之連接圖 ( 校除轉接器效應 )。



圖二、網路分析響應校準之連接圖 ( 未校除轉接器效應 )。



圖三、待測元件-短長、長方形波導二只。



圖四、待測元件 - 可調式衰減器與固定式衰減器二只。

2. 將長方形波導連接至已校準完成之網路分析儀，觀察穿透係數之大小與其相位變化(**注意：**使用兩個視窗分別顯示大小與相位)，並使用『marker』功能標示長方形波導於頻率 10 GHz 時之衰減量（適當使用『scale』功能，獲得較準確之衰減量）與該長方形波導之截止頻率位置。
3. 將可調式衰減器與二只固定式衰減器（一為棕色，另一為白色），分別連接至已校準完成之網路分析儀，觀察及記錄頻率於 10 GHz 之衰減量大小與相位變化。
4. 使用圖二所示之連接方式進行響應校準，重複步驟 2~3，觀察及記錄包含轉接器效應之量測結果，並與不包含轉接效應之量測結果比較。

### 第三部分、校準網路分析儀－完整二埠校準(full 2-port calibration)

1. 依附錄七所示之步驟，進行完整二埠校準。
2. 將網路分析儀之測試纜線連接如圖一所示，將兩轉接器對接，使用『data→memory』功能儲存其 S21 值。

### 第四部分、導波管與衰減器的量測

1. 重複第二部分之步驟 2~3，觀察及記錄包含轉接器效應之量測結果。
2. 並使用『data/memory』功能將轉接器之效應去除，重複針對上述元件進行量測，並比較不同校準對量測有何影響。

※各組思考問題 6-1：

1. 參考 N. N. Rao 第六版電磁學課本 9.3 節（第五版課本在 10.3 節），試計算長方形波導之單位長度之衰減量，並與實驗結果比較。
2. 由可調式衰減器之量測結果，可否找出『量測衰減量』與衰減器上所標示之『標示衰減量』相近之頻率位置？
3. 比較『包含轉接器效應』之量測結果與『不包含轉接效應』之量測結果，是否可由該兩量測結果推出『單一轉接器』所造成之效應。若可，試說明並計算單一轉接器之衰減量。
4. 將 **FORMAT** 切換到 **PHASE** 選項時，可以看到導波管的相位對頻率響應為一斜線，試說明該斜線的斜率與何有關？並且長導波管與短導波管兩者斜率是否相同？為什麼。試說明是否可以利用網路分析儀的量測結果找出 $\beta$ 值，並計算。
5. 參考 N. N. Rao 第六版電磁學課本第 606 頁的(9.19)式（第五版課本第 590 頁的(10.19)式），試將本實驗室所用的 WR-90 規格的導波管，其截止頻率最低的十個模態列出來。並將算出來的  $TE_{10}$  模態與實驗所做出來的結果相比較一下。
6. 對於長方形導波管元件，一般來說，導波管的  $b/a$  會比 0.5 小或是等於 0.5，試述如此做有何好處？

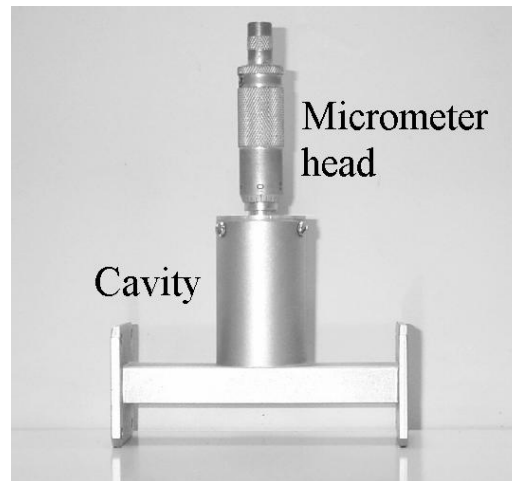
參考資料：

- [1] Manual of Agilent N5230A Network Analyzer Guide.
- [2] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, 4th ed., John -Wiley, 2011.

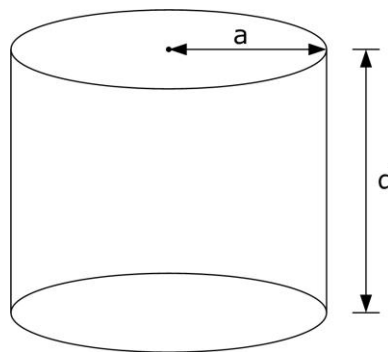
## 6-2 共振腔

### 實驗原理：

頻率量測器是利用共振腔原理量測微波信號之頻率。欲獲得頻率量測器之特性，則須將其連接至網路分析儀，量測其穿透係數，則可由該項量測資訊求得共振腔之共振頻率與  $Q$  值。當調節空腔之大小（即調整圖五中頻率量測器上之刻度）至共振頻率時，能量將會大量由波導管傳到空腔內，而幾乎無穿透成分，在量測穿透係數之網路分析儀上可觀察到一狹小且尖銳之  $V$  形波形，該頻率即為該共振腔之共振頻率。



圖五、頻率量測器。



圖六、圓柱型共振腔。

在頻率量測器共振腔中存在一個或數個共振模態，該模態經由波導管開槽流出的電場所激發。當調整空腔高度時，共振頻率將隨之變化，並可利用下式計算其共振頻率

$$TE_{nml} : f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$
$$TM_{nml} : f_{nml} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p_{nm}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

在上式中， $p_{nm}$  為方程式  $J_n(p) = 0$  的第  $m$  個根， $J_n(x)$  為第  $n$  階 Bessel 函數。另外， $p'_{nm}$  為方程式  $J_n'(p) = 0$  的第  $m$  個根，其數值可參考表一與表二。

在討論共振腔時，亦會提及一個參數叫品質因子(quality factor,  $Q$ )，其定義為

$$Q = 2\pi f_0 \frac{\text{共振時共振腔內所儲存之能量}}{\text{系統平均消耗功率}}$$

然而品質因子亦可由下式求得

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

其中， $\Delta f$  為半功率頻寬， $f_0$  為中心頻率(center frequency)。

### 實驗器材：

1. 頻率量測器 #504
2. 轉接器(HP adapter X281A N-WR90)
3. 轉接頭(N-SMA)
4. 網路分析儀(Agilent N5230A、E5071C)
5. 游標尺

### 實驗目的：

使用網路分析儀量測雙埠元件頻率量測器之  $S$  參數，以獲得共振腔之共振頻率、 $Q$  值等元件特性。

### 實驗步驟：

1. 將頻率量測範圍設為 6 GHz ~ 13 GHz，並依照附錄七之網路分析儀校準程序，進行響應校準（須校除轉接器效應）。
2. 將待測元件連接至校準完成之網路分析儀，並將共振腔刻度位置調至『0』，以進行量測。
3. 量測待測元件之穿透係數，並以『marker』標示其共振頻率及儲存該量測結果圖形檔，附於實驗報告中繳交。
4. 依照附錄七之『量測 3dB 頻寬』之步驟，量測待測元件之頻寬、 $Q$  值等特性，並儲存該量測結果圖形檔，於實驗報告中利用實驗原理所列之公式，求出其所可能存在的模態名稱。（因該共振腔  $Q$  值頗大，為避免錯過共振頻率點，進行該量測前，建議將頻率範圍調小）
5. 將共振腔刻度位置調至『5』，重複步驟 2~4。
6. 拆卸共振腔螺絲，觀察並瞭解其內部結構，使用游標尺量測共振腔的內徑之半徑大小，與上述兩刻度時共振腔的高度  $d$ ，以便在繳交報告時回答思考問題。

### ※各組思考問題 6-2：

1. 求出刻度位置為『0』之共振頻率應為何種模態？
2. 本實驗所量測的共振腔，其Q值為一有限值，由Q值的定義可知，共振腔內有能量的損耗。試說明本實驗所用的金屬圓柱共振腔能量損失的可能原因為何？
3. 試利用實驗時用尺量到的共振腔尺寸資料，以及表一和表二所列的 **Bessel** 函數零點及 **Bessel** 函數的一階導函數之零點，求出最低的十個模態之共振頻率，與實驗數據比較並討論之。
4. 試比較共振腔刻度位置為『5』之量測結果與刻度位置為『0』之量測結果，並試以物理及數學觀點解釋其間的異同。
5. 參考 N. N. Rao 第六版電磁學課本 9.3 節（第五版課本 10.3 節），簡單敘述求出金屬長方形共振腔 Q 值的步驟，並計算共振腔刻度位置為『0』及『5』對應模態之理論 Q 值。

|       | $J_0(x)$ | $J_1(x)$ | $J_2(x)$ | $J_3(x)$ | $J_4(x)$ |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|
| m = 1 | 2.4048   | 3.8317   | 5.1356   | 6.3802   | 7.5883   |
| m = 2 | 5.5201   | 7.0156   | 8.4172   | 9.7610   | 11.0647  |
| m = 3 | 8.6537   | 10.1735  | 11.6198  | 13.0152  | 14.3725  |
| m = 4 | 11.7915  | 13.3237  | 14.7960  | 16.2235  | 17.6160  |
| m = 5 | 14.9309  | 16.4706  | 17.9598  | 19.4094  | 20.8269  |

表一、方程  $J_n(\rho) = 0$  的根  $\rho_{nm}$  [1]

|       | $J_0'(x)$ | $J_1'(x)$ | $J_2'(x)$ | $J_3'(x)$ | $J_4'(x)$ |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| m = 1 | 3.8317    | 1.8412    | 3.0542    | 4.2012    | 5.3175    |
| m = 2 | 7.0156    | 5.3314    | 6.7061    | 8.0152    | 9.2824    |
| m = 3 | 10.1735   | 8.5363    | 9.9695    | 11.3459   | 12.6819   |
| m = 4 | 13.3237   | 11.7060   | 13.1704   | 14.5858   | 15.9641   |
| m = 5 | 16.4706   | 14.8636   | 16.3475   | 17.7887   | 19.1960   |

表二、方程  $J_n'(\rho) = 0$  的根  $\rho'_{nm}$  [1]

參考資料：

[1] <http://mathworld.wolfram.com/BesselFunctionZeros.html>

## 實驗六 實驗紀錄表

組別：

### 6-1 長方形波導與衰減器量測

| 元件        | 導波管（短） |  | 導波管（長） |  |
|-----------|--------|--|--------|--|
| 長度（cm）    |        |  |        |  |
| 截止頻率（GHz） |        |  |        |  |

響應校準量測  $S_{21}$  之結果

| 元件          | 無校除接頭效應 |       | 有校除接頭效應 |       |
|-------------|---------|-------|---------|-------|
|             | 大小（dB）  | 相位（°） | 大小（dB）  | 相位（°） |
| 導波管（短）      |         |       |         |       |
| 導波管（長）      |         |       |         |       |
| 可調衰減器 0 dB  |         |       |         |       |
| 可調衰減器 3 dB  |         |       |         |       |
| 可調衰減器 6 dB  |         |       |         |       |
| 可調衰減器 12 dB |         |       |         |       |
| 可調衰減器 24 dB |         |       |         |       |
| 固定衰減器（白）    |         |       |         |       |
| 固定衰減器（黑）    |         |       |         |       |

完整二埠校準量測  $S_{21}$  之結果

| 元件          | 無校除接頭效應 |       | 利用 Data/Memory 除掉接頭效應 |       |
|-------------|---------|-------|-----------------------|-------|
|             | 大小（dB）  | 相位（°） | 大小（dB）                | 相位（°） |
| 導波管（短）      |         |       |                       |       |
| 導波管（長）      |         |       |                       |       |
| 可調衰減器 3 dB  |         |       |                       |       |
| 可調衰減器 12 dB |         |       |                       |       |
| 固定衰減器（白）    |         |       |                       |       |
| 固定衰減器（黑）    |         |       |                       |       |

## 6-2 共振腔

共振腔尺寸

| 半徑 (cm) | 於刻度『0』之深度 (cm) | 於刻度『5』之深度 (cm) |
|---------|----------------|----------------|
|         |                |                |

網路分析儀量測記錄表：記錄所有的共振頻率、3dB 頻寬與 Q 值

| 刻度『0』  | 共振頻率#1 | 共振頻率#2 | 共振頻率#3 | 共振頻率#4 |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| 共振頻率   |        |        |        |        |
| 3dB 頻寬 |        |        |        |        |
| Q 值    |        |        |        |        |
| 刻度『5』  |        |        |        |        |
| 共振頻率   |        |        |        |        |
| 3dB 頻寬 |        |        |        |        |
| Q 值    |        |        |        |        |

(**建議**：使用『marker』適當標示，並以圖檔紀錄，附於實驗報告中繳交)