

微波接力通信技术丛书

# 微波系统分析仪

马承志 编著

人民邮电出版社

## 内 容 提 要

本书讲述多功能的、精密的微波系统分析仪的基本原理、测试方法和维修方法。

这类仪表是近年来出现的新式仪表，对制造微波设备、维护微波设备和微波电路是十分有用的综合性、高精度、多功能的仪表。

本书可供从事微波通信、卫星通信工作的维护、设计、生产技术人员及从事仪表的制造和维修人员参考。对大专院校有关专业的学生也有一定的参考价值。

### 微波接力通信技术丛书 微波系统分析仪

马 承 志 编著

责任编辑：俞天林

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32      1985年2月第 一 版  
印张：5 16/32 页数：88      1985年2月河北第一次印刷  
字数：123 千字 插页：2      印数：1—5,000 册

统一书号：15045·总2971—无6311

定价：0.80 元

# 目 录

|                              |        |
|------------------------------|--------|
| <b>第一章 测试原理</b> .....        | ( 1 )  |
| 第一节 调制器、解调器的直线性.....         | ( 1 )  |
| 第二节 群时延特性.....               | ( 7 )  |
| 第三节 微分增益特性.....              | ( 13 ) |
| 第四节 微分相位特性.....              | ( 16 ) |
| 第五节 调制器、解调器的灵敏度测试(频偏测试)..... | ( 18 ) |
| 第六节 幅频特性的测试.....             | ( 23 ) |
| 第七节 回波损耗的测试.....             | ( 25 ) |
| 第八节 调幅调相转换系数的测试.....         | ( 29 ) |
| <b>第二章 仪表的工作原理和组成</b> .....  | ( 43 ) |
| 第一节 概述.....                  | ( 43 ) |
| 第二节 仪表的组成.....               | ( 46 ) |
| 第三节 仪表的用途.....               | ( 62 ) |
| 第四节 各单元的工作原理.....            | ( 68 ) |
| 一、基带振荡器.....                 | ( 68 ) |
| 二、中频扫频振荡器.....               | ( 73 ) |
| 三、中频接收机.....                 | ( 83 ) |
| 四、基带接收机.....                 | ( 92 ) |
| 五、示波管显示单元.....               | ( 95 ) |
| <b>第三章 检验、校准与修理</b> .....    | ( 96 ) |
| 第一节 性能和检验.....               | ( 96 ) |
| 第二节 校准.....                  | ( 99 ) |

|      |                                |         |
|------|--------------------------------|---------|
| 第三节  | 修理                             | ( 102 ) |
| 一、   | 概述                             | ( 102 ) |
| 二、   | 仪表故障排除流程图                      | ( 105 ) |
| 三、   | 各单元的故障分析及修理                    | ( 113 ) |
| 第四章  | 射频频带微波系统分析仪                    | ( 123 ) |
| 第一节  | 仪表的主要性能指标                      | ( 123 ) |
| 第二节  | 仪表的构成                          | ( 127 ) |
| 第三节  | 工作原理                           | ( 134 ) |
| 第五章  | 新式的微波系统分析仪                     | ( 140 ) |
| 第一节  | 概述                             | ( 140 ) |
| 第二节  | 新仪表的特点                         | ( 141 ) |
| 第三节  | 标准化功能                          | ( 149 ) |
| 第四节  | 应用扫描法的基带振幅特性测量                 | ( 151 ) |
| 第五节  | 中频扫频信号发生器的中频频率显示原理             | ( 152 ) |
| 第六节  | ME538微波系统分析仪的工作原理及构成           | ( 154 ) |
| 附录一  | 安立公司 ME525A/B/C 仪表的主要技术指标      | ( 157 ) |
| 附录二  | 惠普(HP)公司 3711A/3712A 仪表的主要技术指标 | ( 160 ) |
| 附录三  | 微分相位与群时延之间的互相换算表               | ( 162 ) |
| 附录四  | 频偏计算表                          | ( 163 ) |
| 附录五  | 回波损耗、反射系数、电压驻波比之间的关系           | ( 164 ) |
| 参考资料 |                                | ( 166 ) |

# 第一章 测试原理

在微波接力通信线路的各种站上，对电路及设备的维护常常需要测定若干个技术参数（即技术指标），特别是彩色电视的传输通道的参数更多。

测定时对时间也有一定要求，并需要熟练的技术，某些参数特别要注意仪表间、仪表和线路间的或设备间的接口是否良好。因而在测试这些参数时，需要一大堆仪表和较长的时间，并有很多的接线。

自从出现较新式的综合测试仪表后，测试就十分方便了，一台多功能的综合测试仪表常常能迅速而准确地测定七、八个主要参数，因而使用得日益普遍。

这些参数散见于各种书籍、杂志，很少有汇总加以讨论的。本书结合微波系统分析仪的作用在此作一集中的简明的介绍，（参数的涵义及其分析将在本丛书中的另一册中作详细的分析和介绍）以便于读者阅读本书。

本章首先介绍一些有关参数的基本测试原理。

## 第一节 调制器、解调器的直线性

### 一、直线性

在调频制微波接力通信系统中，调制器是把多路电话信号或电视信号调变成中频调频信号的部件。相反地，解调器则是

把中频调频信号还原成多路电话信号或电视信号的部件。外来信号的总的合成电压在调制或解调时与频偏的对应关系，用调制或解调特性曲线来表示，统称为调制特性。

如图1-1所示，图中横轴代表外来信号的总的合成电压，纵轴代表相应于此电压的频率值。

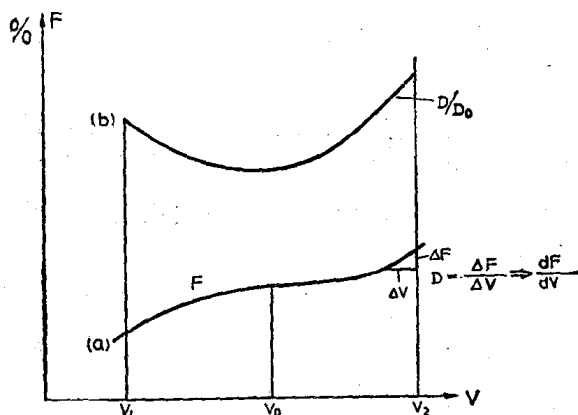


图 1-1 调制器的调制特性及其微分特性

在图中，如取曲线上某点的电压的微分值为  $D$ ，则

$$D = \frac{\Delta F}{\Delta V} \approx \frac{dF}{dV},$$

在  $V=V_0$  处的微分值为  $D_0$ ，以百分比( $\%$ )表示的比值  $D/D_0$  称为调制器的直线性。即调制器的调制特性的微分特性表示了调制器的线性。因为  $D = \frac{dF}{dV}$  代表直线的斜率，故这个微分特性也代表了调制器的灵敏度。

解调器的直线性的分析和调制器的分析相类似，只不过输入信号是调频波，输出信号是相对应的总的合成电压，所示它们的座标轴代表的符号需要互换一下。

## 二、直线性的测试原理

在调制器直线性（即微分特性）的测试中，所用测试信号是由给定的偏置电压 $V_1$ 或 $V_2$ ……上叠加一个微小的电压 $\Delta V$ 形成的。 $\Delta V$ 的幅度应保持不变，其角频率为 $p$ ，则得调频波的表示式为：

$$\sin\left(\Omega t + \frac{\Delta\Omega}{p} \sin pt\right),$$

式中 $\Omega = 2\pi F$ 为电压 $V$ 对应的角频率，此处即为中频角频率。

$\Delta\Omega$ 是 $\Delta V$ 所对应的调频波的频偏。

如果假定在输入偏置电压不论 $V_1$ 、 $V_2$ 为何值时，微小电压变化量 $\Delta V_1 \sim \Delta V_2$ 的数值都能保持恒定，则 $\Delta f_1$ 、 $\Delta f_2$ 就正比于调制特性曲线上的每点的微分值。使输入偏压 $V$ 在很宽的范围内缓慢的扫描变化，就能连续测量对应于每点电压的微分值。再通过理想解调器把 $\Delta f_1$ 、 $\Delta f_2$ ，……的相应幅值检出，并显示在对应于 $V_1$ 、 $V_2$ ……的纵轴上，即可看到调制器的线性。图1-2就是调制器直线性的测试原理图。图中的CRT为显示器。

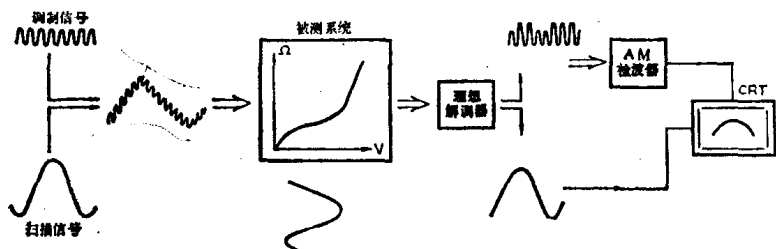


图 1-2 调制器直线性的测试原理

在ME525仪表中微分信号频率有三种，如A型为200kHz。偏置电压即扫描电压的频率选用50Hz或18Hz。它的具体工作过程见图1-3。

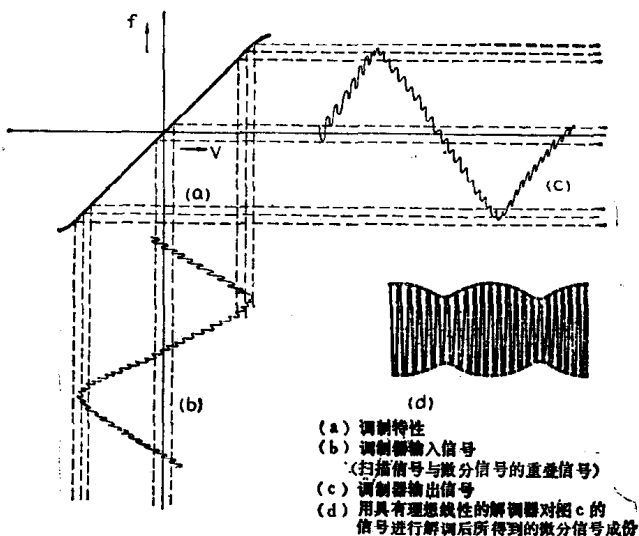
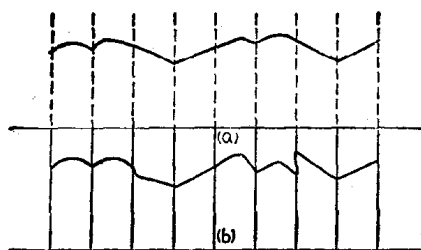


图 1-3 用扫描法测定调制器线性工作的过程

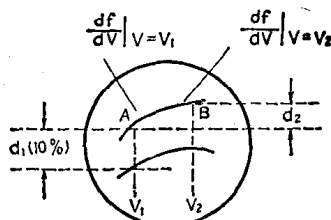
如果把(b)所示的扫描重复信号和微分信号(调制信号)所组成的重叠信号加到具有图1-3(a)所示的调制特性的调制器上，则得到(c)所示的调频波。这个调频波被扫描信号扫频，同时又被微分频率轻微调频(浅调制，调制指数 $m \leq 0.75$ )，调频后产生的频偏正比于调制特性曲线的微分值。因此，当这个调频波被一个具有理想特性的解调器解调以后，并通过一个滤波器滤去扫描信号之后，将得出(d)所示的调幅信号。

此信号被放大、检波之后，得到如图1-4(a)所示的电压波形。此电压表示了每个频率上的调制特性微分值的相对应数值。





(a) 图 1-3(d) 的检波波形



(b) 调制器的微分特性

图 1-4 调制信号被检波后的波形及示波管上的微分特性

用继电器电路将此电压的90%及100%的曲线交替倒换显示出来，如果继电器电路的倒换速度只有扫描重复频率的一半，就得到图 1-4(b) 所示的波形。将此两条曲线调整为上下极限的两条界限线，则曲线的波动就是在  $(100-90)\% = 10\%$  数值范围的线性变化。

如果10%以内的波动很小，可以将此波动再经过放大后显示出来，则满刻度的读值又相应地减小。即波动值放大三倍，则满刻度读值为3.3%，如波动值放大十倍，则满刻度读值为1%。也就是“读值展宽”了，精确度相应地提高了。

解调器的直线性测试原理也相同，只是需要一个理想的调制器，输入一个扫描信号，使调制器输出一个扫频信号，同时

又被微分信号（调制信号）轻调制频（浅调制， $m \leq 0.75$ ）。这个“标准的调频信号”就是待测解调器的输入信号。它加在解调器上后，在输出端被分离出一个微分信号，并检出其幅度的变化量，通过校准电路而送到阴极射线示波管上显示出来。示波图形同图1-4所示。

图1-5为解调器直线性的测试原理图。

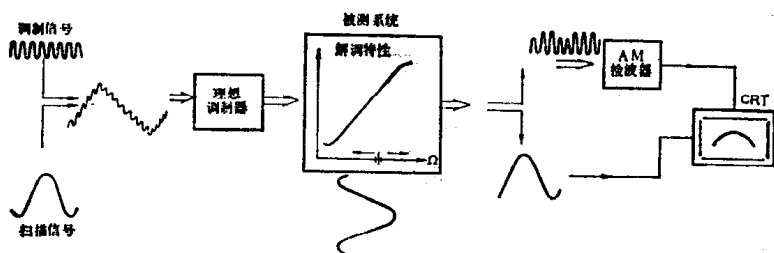


图 1-5 解调器的线性测试原理

仪表中本身包含的调制器及解调器的直线性是比较好的，因此，在测试时常将它们作为“理想的”调制器和解调器用。在测定调制器时只使用仪表中的解调器，而用待测调制器代替仪表中的调制器。同样，测定解调器时，只使用仪表中的调制器，而将待测解调器代替仪表中的解调器。仪表中的调制器和解调器的性能可以用“自环检查”的方法来进行校准。

通常，调制器和解调器的线性测试所用的调制信号（微分信号）的频率选为  $100 \sim 500 \text{ kHz}$ 。要注意与微分增益区别开来，不要相互混淆了。

## 第二节 群时延特性

### 一、群时延特性

带有多路电话或电视信号的调频波在通过传输通道或机线设备时，会引入“线性失真”。所谓“线性失真”是指调频波由于受到传输通道或设备的振幅频率特性（常简称振幅特性或幅频特性）及相位频率特性（通常用群时延特性来表示）的影响，使调频波的频率和它的振幅、相位的结构与传输前的状态有所不同，因而经过解调后的信号就引入了失真。

上面讲的线性失真是相对于非线性失真而言，而非线性失真则是指信号输入电平与输出电平间的特性具有非线性，或输入电平与输出频率之间的非线性关系（如调制器），或输入频率与输出电平之间的非线性关系（如解调器），所引起的信号失真。对线性失真说来，输入对输出电平之间的特性不论是线性的或者是非线性的都没有关连，只是由振幅频率特性或相位频率特性所引入的失真才称为线性失真。

要精确地测定相位频率特性是很困难的，而准确地测定相位频率特性的微分特性—群时延特性到比较容易做到。

图1-6为群时延特性举例。(a)为相位频率特性。横轴为角频率 $\Omega$ ，纵轴为相角 $\phi(\Omega)$ 。(b)为(a)图相位频率特性的微分特性—即群时延特性曲线。

图中示出当给定一个微小频率变化 $\Delta\Omega$ 时，即引入一个微小相位变化 $\Delta\phi$ ，当 $\Delta\Omega$ 值很小时，

$$\frac{\Delta\phi}{\Delta\Omega} \approx -\frac{d\phi}{d\Omega} \quad \text{则} \quad \tau(\Omega) = -\frac{d\phi}{d\Omega},$$

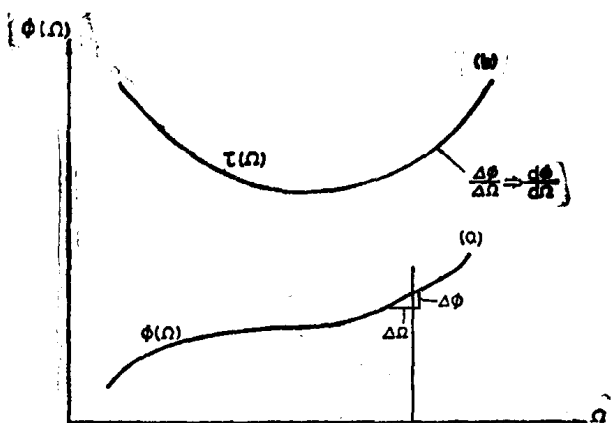


图 1-6 群时延特性

把该式定义为“群时延”，表示单位是时间。由此可见，群时延特性是相位频率特性的微分特性。

下面还是引用调频波的通常表达式来分析群时延的测量方法。

假定输入到传输通道或设备的调频波的表示式为，

$$I_1(t) = I_0 \sin\{\Omega_0 t + m_f \sin(pt + \phi_0)\}$$

为了推导方便起见，假定

$$I_0 = 1, \phi_0 = 0.$$

则

$$I_1(t) = \sin\{\Omega_0 t + m_f \sin pt\} \quad (1)$$

式中： $\Omega_0$  载波的角频率（在此为中频），

$m_f$  调制指数， $m_f = \frac{\Delta\Omega}{p}$ ，

$\Delta\Omega$  角频率，

$p$  调制波的角频率（在此为调制信号）。

用贝塞尔函数表示(1)式，则得：

$$I_1(t) = \sin\{\Omega_0 t + m_f \sin pt\}$$

$$\begin{aligned}
&= J_0(m_f) \sin \Omega_0 t && \text{载波} \\
&\quad + J_1(m_f) \sin(\Omega_0 + p)t \\
&\quad - J_1(m_f) \sin(\Omega_0 - p)t && \left. \vphantom{\begin{aligned} &+ J_1(m_f) \sin(\Omega_0 + p)t \\ &- J_1(m_f) \sin(\Omega_0 - p)t \end{aligned}} \right\} \text{第一边带} \\
&\quad + J_2(m_f) \sin(\Omega_0 + 2p)t \\
&\quad - J_2(m_f) \sin(\Omega_0 - 2p)t && \left. \vphantom{\begin{aligned} &+ J_2(m_f) \sin(\Omega_0 + 2p)t \\ &- J_2(m_f) \sin(\Omega_0 - 2p)t \end{aligned}} \right\} \text{第二边带} \\
&\quad + \dots\dots && (2)
\end{aligned}$$

式中的  $J_0(m_f)$ ,  $J_1(m_f)$ ……为贝塞尔函数, 它们都是  $m_f$  的函数。当  $m_f$  较小时, 即  $m_f \ll 1$  时, 则 (2) 式中第二边带以下各项均可忽略不计, 即 (2) 式可写作

$$\begin{aligned}
I_1(t) &= J_0(m_f) \sin \Omega_0 t + J_1(m_f) \sin(\Omega_0 + p)t \\
&\quad - J_1(m_f) \sin(\Omega_0 - p)t \\
&= J_0(m_f) \sin \Omega_0 t + J_1(m_f) \{ \sin(\Omega_0 + p)t \\
&\quad - \sin(\Omega_0 - p)t \} && (3)
\end{aligned}$$

如果 (3) 式的调频波通过具有图 1-7 所示相位频率特性的

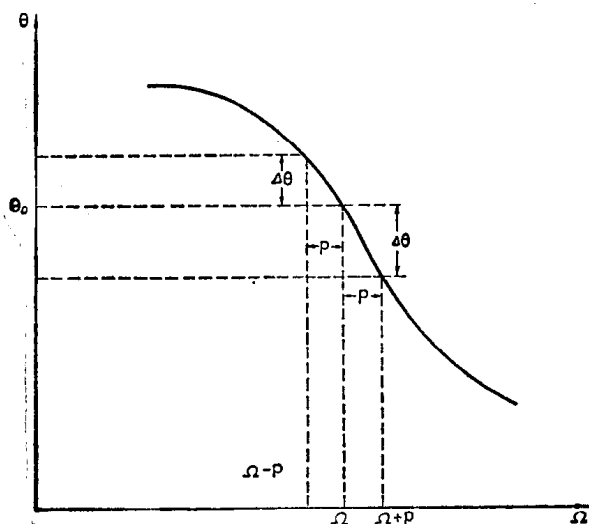


图 1-7 相位频率特性之一

被测系统，对载波相位来说，边带波的一边将会滞后 $\Delta\theta$ ，另一边带波则将超前 $\Delta\theta$ ，因而通过图1-7特性的网络后，输出端的调频波将为：

$$\begin{aligned} I_{\text{出}}(t) &= J_0(m_f) \sin \Omega_0 t + J_1(m_f) \{ \sin[(\Omega_0 + p)t - \Delta\theta] - \sin[(\Omega_0 - p)t + \Delta\theta] \} \\ &= J_0(m_f) \sin \Omega_0 t + J_1(m_f) \{ \sin[\Omega_0 t + (pt - \Delta\theta)] - \sin[\Omega_0 t - (pt - \Delta\theta)] \} \quad (4) \end{aligned}$$

把(4)式综合后即得：

$$I_{\text{出}}(t) = \sin\{\Omega_0 t + m_f \sin(pt - \Delta\theta)\} \quad (5)$$

如果把(3)式的调频波通过具有图1-8所示的相位频率特性的被测系统，同理可推出对应于载波相位来说，调制信号的相位超前了 $\Delta\theta$ ，其表示式如下：

$$I_{\text{出}}(t) = \sin\{\Omega_0 t + m_f \sin(pt + \Delta\theta)\} \quad (6)$$

从图1-8中所示符号，可得出下列关系：

$$\because \theta(\Omega + p) - \theta(\Omega - p) = 2 \cdot \Delta\theta$$

$$\therefore \Delta\theta = \frac{1}{2} \{ \theta(\Omega + p) - \theta(\Omega - p) \} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{2} \{ \theta_{+,p} - \theta_{-,p} \} \quad (8)$$

比较公式(1)、(5)、(6)之后可见：当调频波通过具有某一相位频率特性的网络以后，调频波的调制信号的相位滞后了 $\Delta\theta$ （或超前了 $\Delta\theta$ ）。 $\Delta\theta$ 表示与载频 $\Omega_0$ 相距为微小角频率 $\Omega_0 + p$ 处的相位变化量，它表示了在 $\Omega_0$ 处的相位特性的微分。当 $\Delta\Omega$ 比 $\Omega_0$ 小得很多时，可得

$$\left( \frac{\Delta\theta}{\Delta\Omega} \right)_{\Omega = \Omega_0} \cdot \frac{\Delta\Omega}{p} \approx \tau(\Omega).$$

例如，中心频率（即 $\Omega_0$ ）为70MHz，调制频率（即 $p$ ）

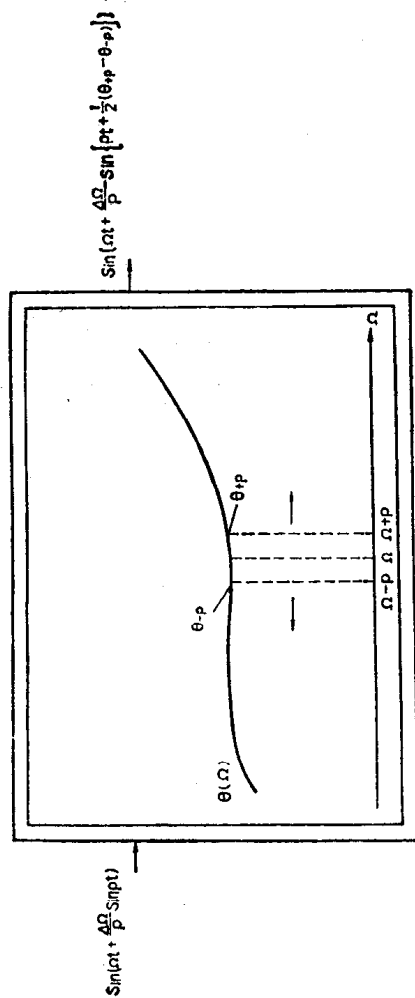


图 1-8 相位频率特性之二

为200kHz时,则符合上式的假定条件。因此在测群时延时,调制频率选得较低应能更易满足微分频率的条件,但选得过低时它会降低鉴相器的灵敏度。

由此得出一个重要结论:

调频波通过一个具有相位特性的网络之后,调频波的调制信号的相位会超前或滞后一个 $\Delta\theta$ , $\Delta\theta$ 是由于 $\Delta\Omega=\Omega_0-(\Omega_0 \pm p)$ 所引入的相位变化量,当满足条件 $p \ll \Omega_0$ 时, $\Delta\theta/p$ 即为该相位频率特性的微分值—即群时延特性。所以,实际测试时,只要能测出调频波通过被测网络之后引入的调制信号的相位变化量,就能找出被测网络的相位特性的微分特性,也就是它的群时延特性。这种方法就是我们通常所讲的“用奈奎斯特(S. Nyquist)原理来测量群时延”的方法。所以,对 $\Omega_0$ 慢慢地扫描(即用低频率扫描),变化其频率,然后检出对应其调制频率的相位变化量 $\Delta\theta$ ,就能得到群时延特性。

## 二、群时延特性的测试原理

从上段的分析中可以看到,要测量传输通道的相位频率特性时,不是直接测试它的相位频率特性,而是测量它的相位频率特性的微分特性—群时延特性。既然测量传输通道的群时延特性只要测定调频波通过该网络的调制信号的相位变化量,这就使测试工作大为简化,并且使测量结果变得准确、迅速而又直观。例如,调频信号( $p$ )的频率为200kHz,它的周期为5000ns,一周期的角度为 $360^\circ$ ,这样就很容易看出,当群时延有5ns的变化,即表示出有 $0.36^\circ$ 的相位变化。如果取调制信号频率为277.778kHz时,它的周期为3600ns,相对于 $360^\circ$ 来计算非常方便直观,即 $1^\circ=10ns$ 。这就是某些仪表采用277.778kHz作为调制频率的原因。



根据上述原理，群时延的测试原理图如图 1-9 所示，测量

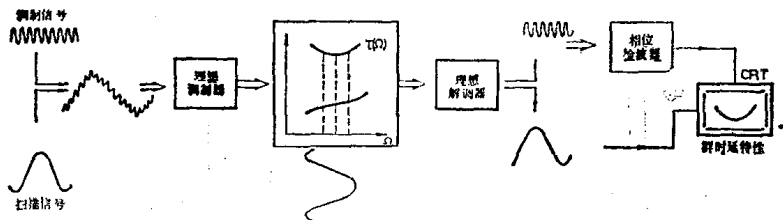


图 1-9 群时延特性的测试原理

时所用的调制频率为100~500kHz。

### 第三节 微分增益特性

#### 一、微分增益特性

调频波通过传输通道以后，由于传输通道的相位频率特性和振幅频率特性不太理想而会引入失真。相位频率特性的失真大小用它的微分特性表示，即群时延特性。振幅频率特性的失真是用“微分增益”来描述，符号记为“DG”。但是，微分增益并不直接代表幅频特性。

由于调频传输通道中具有有限幅器这样的非线性电路，所以不易直接测量它的振幅频率特性。

仍然回到调频波的简单表达式：

$$\sin\left(\Omega t + \frac{\Delta\Omega}{p} \sin pt\right) \quad (9)$$

式中： $\Delta\Omega = 2\pi\Delta f$ ， $\Delta f$ 为频偏。

在调频波中，信号幅度的大小正比于频偏的大小。这个频偏量在通过传输通道时，因为通道的振幅频率特性不太理想而