

第10章 线性系统频率特性测量和网络分析

□ 10.1 线性系统频率特性测量

□ 10.2 网络分析仪

第1页

10.1 线性系统频率特性测量

◆ 10.1.1 幅频特性测量

◆ 10.1.2 扫频测量与扫频源

◆ 10.1.3 相频特性测量

第2页

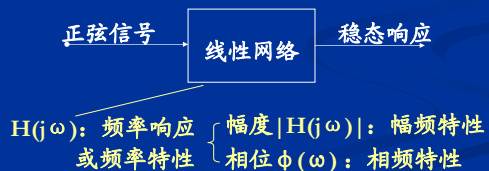
引言

◆ 频域中的两个基本测量问题

信号的频谱分析：可由频谱分析仪完成

线性系统频率特性的测量：可由网络分析仪完成

◆ 什么是线性系统的频率特性？



第3页

10.1.1 幅频特性测量

点频测量法——线性系统频率特性的经典测量法

每次只能将加到被测线性系统的信号源的频率调节到某一个频点。依次设置调谐到各指定频点上，分别测出各点处的参数，再将各点数据连成完整的曲线，从而得到频率特性测量结果。

➢ 所得频率特性是静态的，无法反映信号的连续变化；

➢ 测量频点的选择对测量结果有很大影响，特别是对某些特性曲线的锐变部分以及失常点，可能会因频点选择不当或不足而漏掉这些测量结果。

第4页

幅频特性扫频测量法

频率源的输出能够在测量所需的范围内连续扫描，因此可以连续测出各频率点上的频率特性结果并立即显示特性曲线。

➢ 优点：扫频信号的频率连续变化，扫频测量所得的频率特性是动态频率特性，也不会漏掉细节。

第5页

两种幅频特性测量法的比较

◆ 如果输入的扫频信号频率变化速度快于系统输出响应时间，扫频测量所得的动态特性曲线峰值低于点频测量所得的静态特性曲线。扫频速度越快，下降越多；

◆ 电路中LC元件的惰性会使动态特性曲线峰值出现的水平位置（频率）相对于静态特性曲线有所偏离，并向频率变化的方向移动。扫频速度越快，偏离越大；

第6页

两种幅频特性测量法的比较（续）

- ◆ 当静态特性曲线对称时，随着扫频速度加快，动态特性曲线明显出现不对称，并向频率变化的方向一侧倾斜；
- ◆ 动态特性曲线较平缓，其3dB带宽大于静态特性曲线的3dB带宽；
- ◆ 小结：测量系统动态特性，必须用扫频法；为了得到静态特性，必须选择极慢的扫频速度以得到近似的静态特性曲线，或采用点频法。

第7页



10.1.2 扫频测量与扫频源

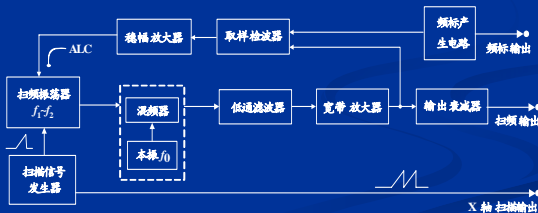
- 基本工作原理
- 扫频源的主要特性
- 获得扫频信号的方法
- 频率标记
- 宽频段扫频方法

第8页



扫频源的基本工作原理

能产生扫频输出信号的频率源称为扫频信号发生器或扫频信号源，简称**扫频源**。它既可作为独立的测量用信号发生器，又可作为频率特性测量类仪器的前端。



第9页



扫频源的基本工作原理（续）

典型的扫频源应具备下列三方面功能：

- 产生**扫频信号**（通常是等幅正弦波）；
- 产生同步输出的**扫描信号**，可以是三角波、正弦波或锯齿波等；
- 产生同步输出的**频率标志**，可以是等频率间隔的通用频标、专用于某项测试的专用频标及活动频标。

第10页



扫频源的主要特性

对扫频源通常的**技术要求**：

- 在预定频带内有足够大的**输出功率**，且**幅度稳定**，以获得最大的动态范围；
- 调频**线性好**，并有经过校正的**频率标记**，以便确定频带宽度和点频输出；
- 为使测量误差最小，扫频信号中的**寄生振荡和谐波均应很小**；
- 扫频源输出的**中心频率稳定**，并可以任意调节；
- 频率偏移的**范围越宽越好**，并可以任意调节。

第11页



扫频源的主要特性（续）

- **有效扫频宽度**

$$\frac{\Delta f}{f_0} = 2 \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1}$$

f_0 : 扫频输出中心频率
 f_1 : 扫频起点; f_2 : 扫频终点

- **扫频线性**

$$\text{线性系数} = \frac{(k_0)_{\max}}{(k_0)_{\min}}$$

k_0 : 压控特性 f - V 曲线的斜率
 输出频率偏差

第12页



获得扫频信号的方法

➤ 变容二极管电调扫频 (PN结电容-外加电压)

常见于射频至微波段。实现简单、输出功率适中、扫频速度较快; 扫频宽度小, 在宽带扫频时线性差, 需额外进行扫频线性补偿。

➤ YIG (钇铁石榴石) 电调扫频

常用于产生GHz以上频段的信号, 利用下变频可实现宽带扫频。可覆盖高达10倍频程的频率范围, 扫频线性好、损耗低、稳定性好。(铁磁谐振频率与外加磁场有线性关系, Q值可达 10^4 量级)

➤ 合成扫频源

实际上是一种自动跳频的连续波工作方式, 频率不完全连续变化, 输出频率准确 (DDS或锁相环PLL方式)。

第13页



频率标记

频率标记是扫频测量中的频率定度 (频率范围、点频)。

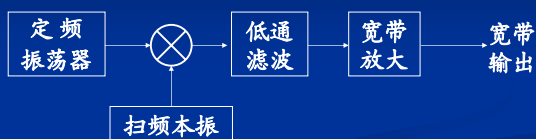
- 所用的频率基准的频率稳定性和准确度较高, 一般采用晶振。
- 频标幅度应基本一致、显示整齐
- 不包含杂频和泄漏进来的扫频信号
- 多种频标形式以满足不同的显示和测量需要
- 电路时延尽可能小以减小频率定度误差

第14页



宽频段扫频方法

◆ 差频式宽频段扫频



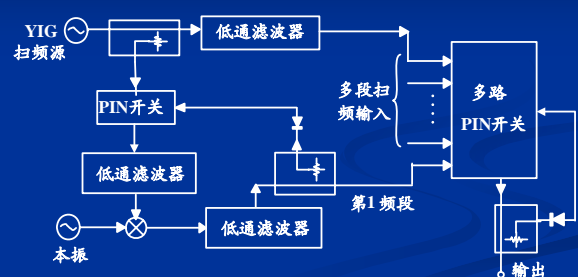
将固定频率的振荡器与作为本振信号的扫频振荡源在混频器上取差频。多个频段 (宽带、幅值稳定)

第15页



宽频段扫频方法 (续1)

◆ 全基波多频段联合式扫频



第16页



全基波多频段联合式扫频

将频段相衔接的几个单频段基波扫频振荡器组件封装起来, 用逻辑电路控制微波开关, 因此可以任意选用某个频段的振荡器输出, 也可使几个振荡器依次产生连续的输出频率, 实现宽频带扫频。

在上图所示的宽频带扫频方案中, 多个输出频率相接的YIG调谐基波扫频源结合在一起, 由控制信号通过PIN开关进行选择、组合, 按需提供单频段或多频段联合的扫频输出。

第17页



宽频段扫频方法 (续2)

◆ 多倍频程宽带扫频

以较宽频带的基波扫频振荡器为基础, 除了直接输出这个低频段信号外, 还可将它加到可选倍率 n 的倍频器中以产生若干个较高频段。基波回路与倍频器是同时调谐的。

这种倍频式 (谐波式) 宽带扫频源较全基波式构造简单, 但在高频段输出时可能夹杂来自低频段的部分谐波频率寄生信号; 另外, 倍频之后的信号寄生调频及噪声也随之倍增。

第18页



10.1.3 相频特性测量

测量线性系统的相频特性时，常以被测电路输入端的信号作为参考信号，输出端信号作为被测信号，所测的输入/输出相位差就是电路的相频特性。

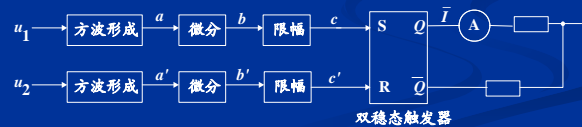
相位测量同样可采用点频或扫频法以获得相频特性曲线：扫频法所得的相频特性主要是被测网络的相位和时延特性的动态测量；本节主要讨论对单频点上的网络时延特性和相位差进行点频测量，以及用于点频测量的相频特性测量仪器，常见的有如低频段的模拟式相位计、数字式相位计，高频段的矢量电压表等。

第19页



双稳型鉴相器

也称双稳型鉴相器，是模拟式相位计。采用“过零时间法”实现相位差测量，即测量两个同频信号波形的同向过零点之间的时间间隔并与被测信号周期相比，从而得到相位差值（平均电流与全周期电流比）。



第20页



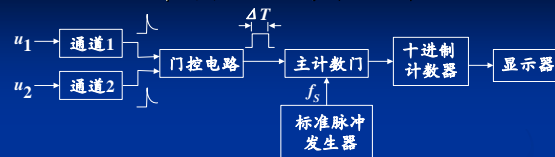
数字式相位计

有两种：相位-时间变换型将两个信号的相位差转换成时间差，再用计数器测量该时间间隔；相位-电压变换型将相位差转换成相应的电压值，然后用数字电压表完成测量。

第21页



瞬时值型数字相位计



u_1 作为参考的信号在通道1中，用作计数门的启动信号。 u_1 、 u_2 间的相位差首先被处理成两个过零脉冲的时间间隔 ΔT ，其中由 u_1 产生的过零脉冲启动主计数门，由 u_2 产生的过零脉冲负责关闭计数门。

若计数门的计数值为 N ，则相位差的计算式为：

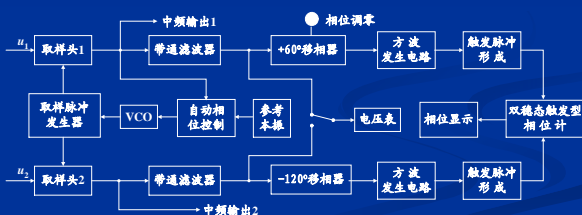
$$\Delta\varphi = \frac{\Delta T}{T_s} \times 360^\circ = \frac{f_s}{f_x} \times N \times 360^\circ$$

第22页



矢量电压表

矢量电压表是一种能同时测量信号幅度和相位的测量仪器。



第23页



矢量电压表（续）

矢量电压表较多采用的相频特性测量方法是脉冲触发式。上图是一种宽频带双通道矢量电压表，其相位差测量范围为 $-180^\circ \sim +180^\circ$ 。

高频信号 u_1 、 u_2 分别加到两个取样头变换为固定的中频信号，同时保持了高频输入原有的波形、幅度及信号间的相位关系。取样后的中频信号经过带通滤波器进行电压幅度测量，同时被整形为方波，然后进入双稳态触发型相位计中实现相位测量。固定的中频信号单独输出还可用于调幅度及波形失真等参数的测量。（180度-标定、60度-调零）

第24页



10.2 网络分析仪

- ◆ 10.2.1 网络分析的基本概念
- ◆ 10.2.2 网络分析系统
- ◆ 10.2.3 反射参数测量
- ◆ 10.2.4 传输参数测量
- ◆ 10.2.5 S参数的全面测量及误差修正

第25页

10.2.1 网络分析的基本概念

□ 频谱测量表征电路单元的信号特性，而网络测量表征电路单元组成的系统特性。

□ 网络——对实际物理电路和元件进行的数学抽象，主要研究外部特性。

□ 网络分析——在感兴趣的频率范围内，通过线性激励-响应测试确定元件的幅频特性和相频特性的过程。

□ 网络分析仪——通过正弦扫频测量获得线性网络的传递函数以及阻抗函数的仪器。

- 网络分析概述
- 微波网络S参数
- S参数的流图表示及计算

第26页

网络分析概述

◆ 线性网络与非线性网络

- 线性网络（系统）：仅改变输入信号的幅度和（或）相位，不会产生新的频率信号；
- 非线性网络（系统）：改变输入信号的频率，或产生其他频率成分。

网络分析总是假定被分析网络是线性的，因而可以基于正弦扫频法进行频率特性的定量分析。非线性网络通常使用频谱仪进行测量。

第27页

网络分析概述（续）

◆ 网络分析参数

➢ 标量反射参数： $|\Gamma|, |S_{11}|, |S_{22}|$ 复反射系数和s参数

$$\text{回波损失 } RL = -20 \lg |\Gamma|, \text{ 或 } -20 \lg |S_{11}|, -20 \lg |S_{22}|$$

$$\text{驻波比 } VSWR = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}, \rho_{11} = \frac{1+|S_{11}|}{1-|S_{11}|}, \rho_{22} = \frac{1+|S_{22}|}{1-|S_{22}|}$$

➢ 标量传输参数：衰减 $A = -20 \lg |S_{21}|$ 复传输参数T

➢ 矢量反射参数： Γ 、阻抗 $Z = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma}$

➢ 矢量网络参数：S参数 $S_{11}, S_{22}, S_{21}, S_{12}$

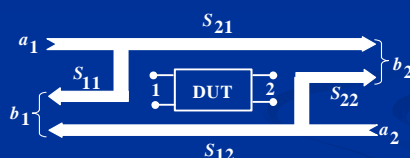
➢ 矢量相位： $\psi_{21} = \arg S_{21}$

➢ 品质因数Q

第28页

微波网络S参数

微波网络常用散射参数（S参数）表示。任何网络都可用多个S参数表征其端口特性，对n端口网络需要 n^2 个S参数。



$S_{11}, S_{21}, S_{12}, S_{22}$ ：表示双端口网络的四个S参数，即散射参量。

第29页

微波网络S参数（续）

◆ 散射方程

$$\begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases} \quad \begin{array}{l} b_1, b_2: \text{端口1、2上的所有出射波} \\ a_1, a_2: \text{端口1、2上的入射波} \end{array}$$

◆ S参数的物理意义

$$S_{11} = \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2=0}, \quad S_{21} = \left. \frac{b_2}{a_1} \right|_{a_2=0} \quad \begin{array}{l} S_{11}: \text{端口2匹配时端口1的反射系数} \\ S_{21}: \text{端口2匹配时的正向传输系数} \end{array}$$

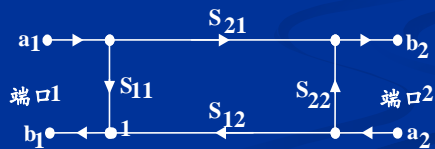
$$S_{22} = \left. \frac{b_2}{a_2} \right|_{a_1=0}, \quad S_{12} = \left. \frac{b_1}{a_2} \right|_{a_1=0} \quad \begin{array}{l} S_{22}: \text{端口1匹配时端口2的反射系数} \\ S_{12}: \text{端口1匹配时的反向传输系数} \end{array}$$

第30页

S参数的流图表示及计算

◆ 信号流图

使用节点代表信号，用支路和箭头代表信号及其流动的方向，并用支路旁标代表支路的传递函数即信号大小。上图所示的双端口网络可用流图表示如下：



第31页

10.2.2 网络分析系统

网络分析仪是通过测定网络的反射参数和传输参数，从而对网络中元器件特性的全部参数进行全面描述的测量仪器，用于实现对线性网络的频率特性测量。

网络分析仪能够完成反射、传输两种基本测量，从而确定几乎所有的网络特性，S参数是其中最基本的特性。

- **标量网络分析仪**：只测量线性系统的幅度信息；
- **矢量网络分析仪**：可同时进行幅度传输特性和相位特性测量。

第32页

系统组成原理

基本的网络分析仪主要由信号源、S参量测量装置及矢量电压表组成。定向耦合器

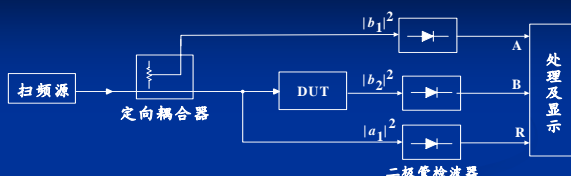


第33页

- **信号源**：向被测网络提供入射信号或激励；
- **S参量测量装置**：实际上是反射测量电路与传输测量电路的组合，首先将入射、反射及传输信号分离开，然后通过转换开关分别进行测量；
- **矢量电压表**：测量入射、反射和传输信号的幅值及它们之间的相位差。也可以通过幅相接收机实现此功能。

第34页

标量网络分析仪

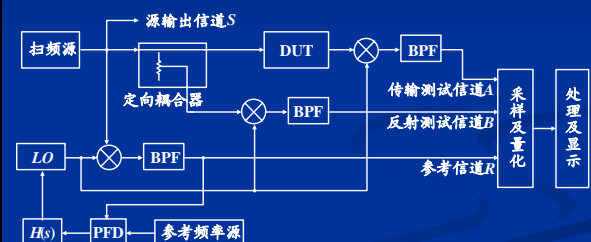


a_1 为入射波、 b_1 为反射波、 b_2 为传输波，它们的测量通道分别为R（参考）、A、B。通过这些信号可确定正向S参数 $|S_{11}|$ 、 $|S_{21}|$ 。将被测网络的激励端与测试端反接，同理可测得 $|S_{22}|$ 、 $|S_{12}|$ 。二极管检波器只能测量幅值——标量

第35页

矢量网络分析仪

一种外差式矢量网络分析仪的组成框图如下：



第36页

上图中PFD为相频检波器， $H(s)$ 为环形滤波器，BPF为带通滤波器。基本结构与外差式接收机类似：扫频源一方面为DUT提供激励，一方面可以作为单独的扫频源输出通道S。参考信号即入射波，通过R通道进行测量。反射波、传输波所在的测试通道分别为A、B。为获得复S参数而进行的复数除法可用硬件完成，现在多采用对混频所得的中频信号采样和数字化，然后通过数字处理的方法来实现。

第37页

