

频率稳定度特性 和测量技术

杨 大 豪 著

(上 册)



微型电脑编辑部

— 九 —

频率稳定度特性和测量技术

杨 大 豪 著

(上 册)

微 型 电 脑 编 辑 部

频率稳定度特性和测量技术

杨 大 豪 著

(下 册)

微 型 电 脑 编 辑 部

内 容 提 要

这是一本关于频率稳定度方面的专著。它系统地阐述了频率源的频率稳定度特性的基本理论和有关表征；结合实际，详细介绍了频率稳定度时域和频域的测量技术；探讨了测量装置的精度分析及其检定，并附有典型电路图集。

频率稳定度特性和测量技术

杨 大 豪 著

微型电脑编辑部

(株洲电子研究所)

1982年4月第1版

定价：2.50元

前 言

随着现代科学技术的发展，频率源在雷达、通信、卫星、导弹、导航及航天等尖端技术科学部门里被广泛采用，并起作日益重要的作用。

频率源的频率稳定度，是一个极其重要的表征量。关于频率稳定度的特性表征，在相当一段时期内，曾处于混乱状态；有关频率稳定度的测量技术，人们也一直在不断探索之中。近十几年来，国内外迫于技术科学发展的实际需要，加强了对这方面的研究，对频率标准的频率稳定度的认识才趋于一致。随之，测量技术也获得了不断的提高。

本书是根据自己对国内外频率标准的频率稳定度研究的收获，以及自己十多年来在这方面工作实践之体会编著而成的。编写时着眼于由浅入深，较为系统地阐述频率源的频率稳定度特性的基本理论和有关表征。同时，结合实际，详细介绍了频率稳定度时域和频域测量技术，以及与此相关的时间和频率方面的基本概念。

本书成文较为仓促，加之自己水平有限，经验不足，不可避免地将存在错误，恳请批评指正。

本书出版得到株洲电子所乔焱熙、黄友文同志和上海市测试技术研究所朱根富同志的支持，在此表示衷心的感谢。

杨大豪 于上海

1981年5月

目 录

上 册

第一章	绪 论	(1)
第一节	频率源信号在现代技术科学中的应用.....	(1)
第二节	频率稳定度特性与测量技术的关系.....	(4)
第三节	频率稳定度测量技术解决什么问题.....	(5)
第四节	频率稳定度测量技术的发展概况.....	(6)
第二章	频率稳定度特性	(18)
第一节	频率稳定度特性的基本概念.....	(18)
第二节	频率源信号的频率不稳定性起因.....	(29)
第三节	信号的噪声谱特性和方差.....	(31)
第四节	电子电路对信号特性的影响.....	(67)
第三章	频率稳定度特性表征	(99)
第一节	关于频率稳定度特性表征的发展简况及 看法.....	(99)
第二节	频率稳定度特性表征.....	(104)
第三节	应用频率源时的频率稳定度特性要求.....	(111)
第四章	时间频率标准	(115)

第一节	时间频率标准的发展和原始基准·····	(115)
第二节	频率标准的种类和状况·····	(120)
第三节	频率标准的基本工作原理·····	(124)
第四节	频标的特性·····	(157)
第五节	频标的应用·····	(166)
第五章	频率测量 ·····	(175)
第一节	一般介绍·····	(175)
第二节	频率测量方法·····	(178)
第三节	电子计数器·····	(185)
第四节	计算计数器·····	(215)
第五节	测量频率和时间的新型计数器·····	(232)
第六节	电子式计数器的发展前景·····	(239)
第六章	频率稳定度时域测量技术 ·····	(247)
第一节	概 述·····	(247)
第二节	频率稳定度时域测量方法·····	(249)
第三节	短期频率稳定度测量系统的设计实例·····	(382)
第四节	频率稳定度的随机变量特性及数据处理·····	(398)
第五节	时域测量装置和系统·····	(402)
第六节	时域测量显示装置·····	(437)

目 录

下 册

第七章	频率稳定度频域测量技术	(443)
第一节	概 述.....	(443)
第二节	相位噪声谱的定义和概念.....	(446)
第三节	射频谱 $S_p(f_m)$ 的测量.....	(451)
第四节	相位噪声谱测量.....	(452)
第五节	$\frac{S}{N}$ (f_L , f_H) 的测量.....	(489)
第六节	频域测量的频率扩展.....	(494)
第七节	微波频率源的频率稳定度频域测量.....	(498)
第八节	谱密度测量的不精确性.....	(508)
第九节	谱密度测量显示装置.....	(515)
第十节	相位噪声功率指示器.....	(527)
第十一节	频域测量装置.....	(534)
第八章	频标传递、校频和比对	(553)
第一节	频标的传递.....	(553)
第二节	校 频.....	(561)
第三节	频标比对.....	(587)
第九章	时域测量装置鉴定方法	(595)
第一节	简 述.....	(595)

第二节	时域测量装置的灵敏度鉴定方法·····	(597)
第三节	DMTD测量系统的自检·····	(616)
第四节	频差倍增器的检定和校准·····	(618)
第十章	频标的鉴定 ·····	(626)
第一节	频标的鉴定方法和分析·····	(626)
第二节	频标鉴定的精度估算·····	(630)
第三节	频标鉴定条件和取样方式·····	(632)
第四节	电子计数器内石英晶体振荡器的鉴定·····	(636)
第五节	铷原子频标的鉴定·····	(643)
附录	有关时间——频率和测量技术的部份刊物 ·····	(647)
参考文献 ·····		(649)
附图目录和说明 ·····		(660)
I 附图目录·····		(660)
II 附图说明·····		(664)
III 附图·····		(675)

第七章 频率稳定度频域测量技术

第一节 概 述

频率源的频率稳定度特性表征量,除了表征信号的频率稳定度时域量外,另一种表征量是频率稳定度的频域量。因为任何一种频率源信号的频率不稳定度和相位起伏其主要是信号里存在着随机噪声,这是信号不稳定的主要起因。因此,直接观测信号的噪声特性更为直观,所以,用频域来分析、测量是一种直观的有效方法,频域的特征量是衡量雷达、卫星、通信、宇航飞船、导弹等工程系统的主要指标之一,在频谱学方面也常采用频域的特征量。

频域特性的分析,实际上是分析其频率源信号的噪声特性,利用频域测量系统,用波形分析仪来测量一定噪声带宽里的各个相偏或频偏的信噪比。但是频域特性不能直接反映出取样时间,虽然如此,因为频域与时域是密切相关的,所以,频域特性与取样时间有一定关系。近年来,频域测量技术发展,能够获得高精度测量频率源的频域特性,利用先进的、精密的测量通过换算获得时域的特征量,也是频率稳定度时域测量技术新的动向和发展趋势。

根据频率稳定度的表征和应用,频域可有四种频谱特性,常用的是射频频谱 $S_{RF}(f_m)$ 和相位噪声谱密度即 $S_{\varphi}(f_m)$ 或 $\mathcal{L}(f_m)$ 。

射频谱也称为全谱，利用观测全谱特性，比较全面地反映出频率源信号的频域全貌。具体来说，能反映出频率源信号近载频的噪声和远离载频的噪声以及杂波、谐波等，也就是，包括信号的带内带外频谱分布情况。虽然，用射频谱分析是较全面的分析方法，但是，直接用频谱仪来分析频谱，因为分析的谱是连续谱，在分析时，由于存在平滑化将明显地引起分析误差，这种测量误差主要是与分析带宽 B 有关，还与分析时间有关，尤其是近载频的噪声受分析仪的分析带宽限制无法进行测量。一般分析全谱，主要用频谱仪观测远离载频的噪声、谐波、杂散等频谱。

频率源信号的频率稳定度起因是噪声，所以直接测量相位噪声谱尤其重要。相位噪声谱特性既反映了频域特性，又反映了时域的短期频率稳定度特性。对于测量相位噪声可归结为四种测量方法即零拍法、相关零拍法、差拍法以及差拍零拍法。

目前常用的测量方法是零拍法，基于零拍法和相关原理，提出一种较先进的测量方法，所谓“相关零拍法”，测量上限比零拍法高 $20\text{dB}\sim 40\text{dB}$ 。

差拍法通常有两种，一种是差拍频域分析法；另一种是差拍时域分析法。随着计算技术的发展和运用，差拍时域分析法主要由计算计数器来实现全部测量过程的数据处理，测量频偏范围约 0.01Hz 至 150Hz ，所谓用加权哈达马方差测量谱密度。例如HP5360A型计算计数器用来测量相位噪声谱。近几年来发展起来的HP5390A型频率稳定度分析仪是利用差拍法分析精密频率源时域与频域稳定度的较完整的测量装置。它是通过测量时域方差来求得频域量的相位噪声谱

密度。

频率源信号的频域表征量除了用 $S_y(f_m)$ 来表征外，还提出另一个频域特性量 $S/N(f_L, f_H)$ ，指的是信号的载频与一定带宽内的总噪声能量之比的特性，测量 $S/N(f_L, f_H)$ 的方法与测量 $\mathcal{L}(f_m)$ 值相同，常采用零拍法测量，需配置对噪声响应是真正有效值的电压表作测量指示装置。若用一般的电压表测量，因为对噪声响应不是有效值，因此将带来误差，但是，可以进行数据修正，这样可以减小指示噪声电压误差。

随着尖端技术的发展和應用，频率源的工作频段扩展到微波波段，甚至到毫米波、亚毫米波。对于微波信号的频率稳定度特性，常用频域来表征和测量。显然，对高频、微波波段频率源信号特性测量，频域测量方法仍旧基于四种方法，但是采用宽带鉴相器，工作频段是在500MHz以内。对于微波信号可采用频段扩展器，用内插本振信号的外差双路系统，将待测微波信号频率变换为中频信号再进行测量。

微波信号的频域测量常用的方法是微波鉴频器法，这是一种容易实现的测量方法。

以上这些频率源信号的频域测量技术将在本章里详细介绍，并进行适当的分析。

随着计算技术的发展，频域的最新测量方法，有所谓“离散和快速傅里叶变换法”。因为，

$$S_y(f_m) = 2 \int_0^{\infty} R_y(\tau) e^{-j2\pi f_m \tau} d\tau, \quad \text{能由 } \phi(t) \text{ 求出}$$

$R_y(\tau)$ 则再计算 $S_y(f_m)$ ，但是为了得到不同 τ 值的 $R_y(\tau)$ 实际上是较困难的，这种变换是较麻烦的。解决的办法，可采用快速傅里叶变换（F、F、T）。快速傅里叶变换是近几年来

发展起来的方法，计算机的高速发展才导致快速傅里叶变换方法的实现可能性，用该法进行信号的频域分析是很有发展前途的，它可获得极低的傅里叶频率 f_m 的功率谱密度，可分析到100KHz，因此，对频域测量技术很有价值。

第二节 相位噪声谱的定义和概念

一、简介

频率源的信号除了给出载频信号外，还包含边带调制分量。这些调制分量分布在载频信号的两侧，包括近载频噪声和远离载频的噪声和杂波（谐波、非谐波等分量），这些量都可以称为噪声。

研究频率源信号频率稳定度特性以及测量它的特性时，感兴趣的是近载频两侧的随机噪声。这些噪声直接影响信号的短期频率稳定度。

在随机调制中，通常具有调幅和调相噪声。因为，电子电路里利用良好的限幅器使它调幅影响变得很小，可以这样认为，对频率源如频标源来说，在载频附近调相频谱的能量远大于调幅频谱的能量。所以，主要分析其信号的相位噪声，同时对信号的相位噪声进行测量。

为了测量频率源的相位噪声，首先提出如下三点假设：

1. 在全部偏离载波的有用频率上，调幅边带的功率远小于调相边带的功率，故在分析时可以不考虑幅度噪声的影响。
2. 频率源信号的相位噪声是很小的（对于高精度频标

信号能满足的)，频率源信号的均方根相位偏移远小于1弧度，使载频附近可测范围内的最大调制分量的瞬时值在-60db以下。

3. 相位噪声认为是平稳随机过程，具有正态分布的（高斯分布的），其平均为零。

若信号为 $V(t) = A_0 \sin [\omega_0 t + \phi(t)]$ ，也就是 $\phi(t)$ 是信号相位对载波标称相位 $\omega_0 t$ 的随机起伏，而且， $\phi(t)$ 的时间平均值为零。

二、基本关系式

(一) $S_\phi(\omega)$ 与 $\phi(t)$ 的均方值关系

$S_\phi(\omega)$ 与 $\phi(t)$ 的均方值关系，可用维纳—欣钦定理推导出来，是自相关函数 $R_\phi(\tau)$ 和随机变量的频谱密度 $S_\phi(\omega)$ 互为傅里叶变换和反变换。

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时, } R_\phi(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_\phi(\omega) d\omega \quad (7-1)$$

自相关函数 $R_\phi(\tau)$ 定义为

$$R_\phi(\tau) \equiv \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \phi(t) \phi(t+\tau) dt \quad (7-2) a$$

$$\text{当 } \tau = 0 \text{ 时, } R_\phi(0) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \phi^2(t) dt = \langle \phi^2(t) \rangle$$

(7-2) b

$$\begin{aligned}\text{得 } \langle \phi^2(t) \rangle &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \\ &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} S_{\varphi}(\omega) d\omega\end{aligned}\quad (7-3)$$

若用 f_m 为偏离载频的傅里叶频率, (7-3)式可变换为

$$\langle \phi^2(t) \rangle = 2 \int_0^{\infty} S_{\varphi}(f_m) df_m \quad (7-4)a$$

从(7-4)a式可以看出, $\langle \phi^2(t) \rangle$ 为无限时间内求得的平均值, 频谱密度 $S_{\varphi}(f_m)$ 为无限时间平均值, 无限时间内的平均值是不能实现的。在现代的无线电设备和测量设备里具有一定的带宽和有限的平均时间, 所以, (7-4)a式可表示为

$$\langle \phi^2(t, f_L, f_H) \rangle \equiv 2 \int_{f_L}^{f_H} S_{\varphi}(f_m) df_m \quad (7-4)b$$

因为, 相位起伏均方值是在 $f_L < |f_n| < f_H$ 范围内 $S_{\varphi}(f_m)$ 的值。

(二) $S_{\varphi}(f_m)$ 和 $\mathcal{L}(f_m)$ 的定义及其关系

1. $S_{\varphi}(f_m)$ 定义

频率源的频率稳定度频域表征量为 $S_v(f)$, 即瞬时相对频率起伏 $y(t)$ 的谱密度 $S_v(f)$ 。

频域特性常用 $S_v(f)$ 来表示, 因为,

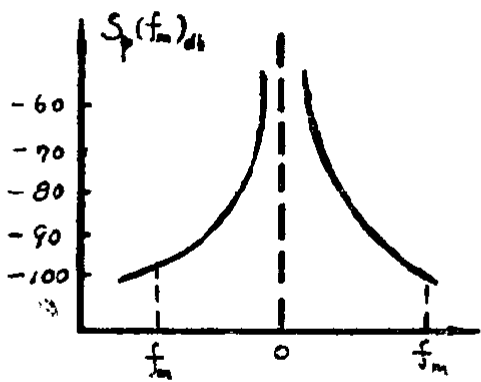
$$S_v(f) = \left(\frac{1}{v_0} \right)^2 f^2 S_{\varphi}(f)。$$

最广泛的相位噪声谱密度定义为 $S_{\varphi}(f)$, 为了统一看法用 $S_{\varphi}(f_m)$ 代替, 不会改变含义。

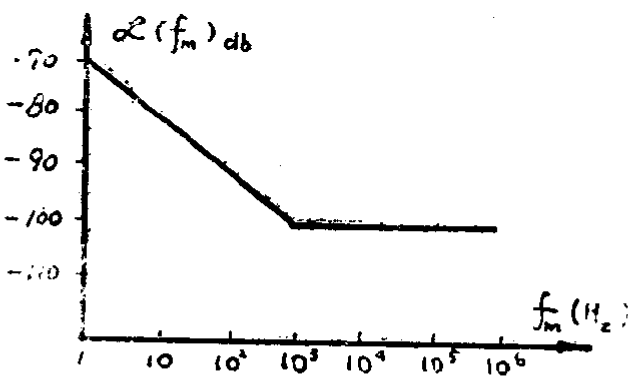
$S_{\phi}(f_m)$ 表示信号的 $\phi(t)$ 的随机相位起伏的双边带相位噪声谱密度。信号相位调制的双边带功率谱密度曲线，如图(7—1)所示。

2. $\mathcal{L}(f_m)$ 的定义

在实际测量中，常用单边带相位噪声谱密度来定义，用1赫带宽的单边带相位噪声功率与信号功率之比作为偏移频率 f_m 函数，并用花体 (HaIFard)谱密度 $\mathcal{L}(f_m)$ 来表示。因为信号的调制频谱是对称的，只需规定正调制频率的功率谱，就能表征信号的频域特性。 $\mathcal{L}(f_m)$ 的曲线如图(7—2)所示。 $\mathcal{L}(f_m)$ 单位均为分贝/赫。



图(7—1) $S_{\phi}(f_m)$ 信号的相位调制的双边功率谱



图(7—2) $\mathcal{L}(f_m)$ 功率谱曲线

3. $\mathcal{L}(f_m)$ 和 $S_\phi(f_m)$ 之间关系

因为 $S_\phi(f_m)$ (单位为弧度²/赫) 叫做 $\phi(t)$ 的“双边带功率谱密度”，若将频率源信号的整个射频谱输入到理想相位检波器可求出 $\phi(t)$ ，在这种情况下，区别在于 $S_\phi(f_m)$ 为双边数学定义，而 $\mathcal{L}(f_m)$ 是单边的数学定义，从数学上看是避免了数学的负频率。它们之间关系为 $\mathcal{L}(f_m) = \frac{1}{2} S_\phi(f_m)$ 。

(三) $\frac{S}{N}(f_L, f_H)$ 的定义

$\frac{S}{N}(f_L, f_H)$ 通常定义为信号与离载频中心 f_L 以外的 f_H 射

频带宽内的相位噪声比。若频率源信号为 (包含相位抖动)

$$V(t) = A_0 \cos [\omega_0 t + \phi(t)] \quad (7-5) a$$

因为前述假设 $\phi(t)$ 远小于1弧度时，将上述式子展开，得

$$V(t) \simeq A_0 \cos \omega_0 t - A_0 \phi(t) \sin \omega_0 t \quad (7-5) b$$

其中第一项表示载频信号，第二项是载频两侧的调制分量。边带调制分量的总功率为

$$P_N = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} A_0^2 \phi^2(t) \sin^2 \omega_0 t dt$$

$$= \frac{A_0^2}{2} \langle \phi^2(t) \rangle \quad (7-6)$$

由此得：

$$\frac{S}{N}(f_L, f_H) \equiv \frac{1}{\langle \phi^2(t, f_L, f_H) \rangle} \quad (7-7)$$