

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

一九八二年

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)

第一章 绪 论

第一节 频率源信号在现代 技术科学中的应用

频率源信号，广泛应用于现代技术科学之中。无论是雷达、通信、卫星、制导和航天等尖端技术部门，还是电子工业中，都缺少不了频率源信号。频率源信号质量的高低，在一定程度上决定和制约着这些技术的发展水平。例如：

在导弹中需要用高精度、高稳定的频率源来控制导弹内部的仪器和电子线路，以便得到高精度的制导和控制。

在雷达系统中，要求频率源信号具有良好的短期频率稳定性和频谱纯度，以便能准确地测量移动目标。在现代雷达系统里不断加大检测距离，并且采用多普勒雷达，因为，多普勒雷达系统里应用多普勒频移（频差）来鉴别目标与杂波。所以，它的分辨率和距离取决于线宽和频谱纯度，这两者都由频率源信号的短期频率稳定度所决定。因此，频率源的短期频率稳定度是多普勒雷达系统中的重要特性参数。

导航中（特别对核潜艇）需要有高精度频标如原子频标信号来控制，以免在航行中产生过大的偏差。

人造卫星、深空跟踪和通信系统中，为了准确地测量距离和变化率（速度），由于受飞船的距离和功率限制，在采用锁相接收机时，为获得足够的灵敏度，也需要有良好的频

率稳定度特性的频率源信号，更重要的是要有极其良好的频谱纯度的频标信号。

宇宙飞船的长途通信系统里，宇宙飞船和地面站都采用锁相接收机，为了防止由于游标发动机和制动发动机燃烧以及着陆时冲击引起的震动致使相位失锁，因此，宇宙飞船里的频标源信号应具有极其良好的短期频率稳定度特性要求。

时间同步技术对于国防具有极其重要的意义。高精度的时间测量和同步，在宇宙航行、卫星跟踪、导弹的精确发射和瞄准、舰艇的精确导航和潜艇的定位等系统里起着必不可少的作用。例如，潜艇发射的导弹若要命中目标，那末，潜艇首先要将其自身位置精确确定。定位是靠导航台发播标准时间信号，这标准信号是由原子频标产生的（铯原子频标），它可设在地面，也可设在卫星上。如设在地面上的罗兰—C导航系统及设在人造地球卫星上的GPS全球定位系统，在三维空间内定位飞机，二维坐标定位军舰。这些被定位的目标是靠测定导航台或人造地球卫星与其自身间的距离来确定其位置的，该距离通过测量发播时间和接收时间之间的差来确定。因为发播台的位置是已知的，这样就可确定目标的座标。各导航台之间的时间严格同步，必须用高精度原子频标来控制，所以，要求导航台建立原子时标。

在通信系统里，尤其在短波、超短波的单边带电台里对本振源即频率合成器的信号指标，希望有良好的短期频率稳定度和随机相位抖动，例如在一般单边带电台进行移相电报通信里，尤其是四相移相电报通信，对收发系统的本振源和激励源信号，必须满足系统的相位抖动，在10毫秒时不应超

过 5° 。例如，本振信号频率为 100MHz ， 10 毫秒的相位抖动小于 5° 的信号，相当于取样时间 τ 为 10 毫秒的短期频率稳定度 $\sigma_y(\tau)$ 优于 10^{-8} 。

频率标准信号源通常还作为频率和时间标准。这就要求频率源信号有良好的频率准确度和长期频率稳定度（极小的漂移率）。导弹及人造卫星的发射场需要统一的时间信号，才能将分散在各地的观测设备所测出的结果进行统一与处理。因此，作为时间频率信号产生器的频标源信号也是不可缺少的。

通用的电子仪器里也离不开频率源信号。用来测量频率信号的频率、时间、时间间隔的计数器，它里面的石英晶体振荡器频标是作为计数器的时基信号。

由此看来，在现代技术科学中，离不开频率源信号，更离不开高精度高稳定的频率标准频率源。

在高精度高稳定度频率标准中，石英晶体振荡器（简称晶振）应用最为广泛。它制造较为容易，可小型化、短稳较好。但是，信号的频率稳定度特性受环境因素（如湿度）的影响，同时还存在晶体的老化现象，频率稳定度较好的双层恒温的晶体振荡器，每天老化率在 10^{-10} 量级范围，而且，还需要有相当长的时间预热，才能获得较小的老化率。例如，西德R/S公司生产的XSD晶体振荡器频标，日老化率为 1×10^{-10} 时，必须连续工作二十天后才能稳定到这样的指标；又如PO4型晶体振荡器频标，连续工作一个月后，日老化率优于 $1 \times 10^{-10}/\text{日}$ 。这样，使得晶振频标在应用时受到了限制。

由于现代科学技术的发展和需要，对频率源信号的频率

稳定度要求越来越高,要求频率稳定度特性指标越来越全面,故晶振已经不能满足要求。近三十年来,通过对物质的微观量子态和它的跃迁与高频电磁场相互作用进行研究,产生了高精度的频率标准频率源—原子频标。

高精度高稳定的原子频标信号,频率准确度可达 10^{-13} 量级;频率稳定度达 10^{-16} 、甚至更高。铯原子频标已经作为基准。今天,最精密、最准确的钟都以铯原子来作钟“摆”。

在频率源的应用中,有时需要产生有多种频率的信号源,这种频率源就是合成器。频率合成器常作为产生各种频率的高稳定频标源。频率合成器的合成方式有两种,一种是直接合成;另一种是间接合成。合成器频标正向着高频、微波波段和高质量信号特性方向发展。近年来频率合成器合成频率已达18GHz。从频率稳定度特性来看,采用直接式频率合成器,例如645A合成器,在50兆赫处的1赫取样点剩余相位噪声 $\mathcal{L}$ (Hz)为-100db/Hz,非谐波的杂波含量低于100分贝。

第二节 频率稳定度特性与 测量技术的关系

各种各样的频率源信号都具有频率稳定度特性指标,频率稳定度特性指标是衡量信号质量好坏的标志。

频率稳定度的测量技术用来鉴别频率源的信号质量指标。测量技术是一门极其重要的学科,为了测量频率源信号的频率稳定度特性,首先必须对频率源的频率稳定度特性给

予恰当地、科学的表征。基于表征，采用合理可行的测量技术，方可获得精确地测量。从测量的数据中才能全面地反映出频率源信号的频率稳定度特性全貌。如果测量方法不合理，所测得的数据不正确，这样，就会直接影响频率源信号的应用。具体来讲，一台高精度的原子频标，不了解其频率稳定度特性，也就无法恰当的应用。

根据频率源的应用不同，可用不同的特性指标来衡量，比如以时域和频域的概念来衡量。对频率源信号提出合理的定义表征后，然后对频率源进行全面的测试，根据测试结果和应用的要求，可以合理地适当地将它应用于各个领域。由此看来，频率源的频率稳定度特性与测量技术直接相关。尤其是高精度高稳定度的频标源具有极高的准确度和频率稳定度，对于频标信号的频率稳定度特性的测量是很重要的。假如有了高精度频标源，而无法进行测量，也就给不出准确的频率稳定度特性指标，频标也就无法应用，也无法对频标进一步改进。频标的发展促使测量技术发展；频率稳定度测量技术的提高，同时也促进了频标源的发展。

第三节 频率稳定度测量技术

解决什么问题

测量技术往往是容易被人们忽视的。有时为了确定频率源的特性指标，利用某些测量手段进行测量，但是，容易忽视全面地定性定量的分析和处理。因此，频率稳定度测量必须注意到以下几个方面：

1. 掌握频率源信号的频率稳定度特性（尤其是频标信号的特性）。

2. 对频率源的频率稳定度给予确切的科学的表征。

3. 测量频率源的频率稳定度特性，根据表征，选择高精度的测量方法。为了达到传递、比对，应当具有统一的测量方法和检定规程。

4. 建立恰当的、较完善的测量系统。

5. 对测量系统测得的数据进行整理，同时，给予正确的数据处理和计算。

测量工作除了上述五方面的内容外，根本的问题是在统一的表征条件下，需解决测量技术的准确性、合理性，才能获得可靠的数据。例如，频率稳定度时域用取样方差来表征，推荐 $N = 2$ ， $T = \tau$ 的阿仑方差，在测量时，必须配用无间隙取样方差计数器作显示。

由此看来，测量工作不单是进行操作、记录工作，而是对频率稳定度特性的研究不可缺少的一门技术。测量技术所包含的内容极其丰富，因此，本书将予以详细叙述。

第四节 频率稳定度测量 技术的发展概况

一、频率稳定度特性及频率测量简述

在各个尖端技术和系统工程里广泛被采用的频率标准，人们所关心的主要特性是它的频率稳定度。长期以来，在频率稳定度的定义和测量方法上，一直是相当混乱的。从五

十年代起，国外开始重视对频率稳定度的表征和测量技术的研究，七十年代初获得了成效。在频率稳定度表征方面主要是美国提出了表征看法，这种表征已被世界各国所采用。频率稳定度测度的第一种定义——频域，推荐的频率稳定度的定义是瞬时相对频率起伏 $y(t)$ 的谱密度 $S_y(f)$ ；频率稳定度测度的第二种定义——时域，以相对频率起伏的取样方差为基基，推荐 $N = 2$ ， $T = \tau$ 的阿仑(Allan)方差 $\sigma_y^2(\tau)$ 为频率稳定度时域测度。

经研究证实，普通振荡器所显示的噪声是按因果产生的信号与随机非确定噪声的叠加。频率不稳定性问题中包含着非平稳过程（闪变噪声调频及频率随机游动），由于在非平稳过程中，经典的统计手段存在着不收敛性的困难。为了解决发散性，提出统一的频率稳定度表征的看法，推荐用阿仑方差来定义。稳定度测度在应用频率源里是很重要的测度参数，同时对于频率和频率稳定度的测量技术、测量方法都具有极其重要的作用。基于频率稳定度的表征，提出了许多测量方法和数据处理的方法。

频率是信号的频率特性里的一个基本量，也是表征信号的电磁振荡特性的基本参量之一。信号的频段可分为长波、中波、中短波、短波、超短波、微波以及毫米波等。对这些频率的测量方法有两种，一种是直接测量；另一种是比较测量。比较法来测量频率和频率稳定度是广泛被采用的，例如，电子数字式频率计利用它内部的频标（晶振）和待测频率相比较，可以实现较高精度的测量。

在信号源的频率常规测量里，低频频段早期的测量方法用比较法，如音响差拍测频、李沙育图形测频等；在高频和微

波段常用谐振法来测量即用波长计来实现，但是用这些方法测量的频率精度很低。

随着电子技术和数字化的发展，用电子计数器直接测量频率是一种高精度的测量仪器，具有直观、快速、准确和操作简便的测量效果。

自五十年代初电子计数器首次问世以来，频率计正在向高频、微波、精确和计算方向发展。高速计数器可提高测频的上限频率，直接计数可达 1000MHz ，例如，TR5599型计数器，直接计数为 1000MHz ，高速部分采用电流开关型电路，它的第一级的电路是 1000MHz 的双稳态 $\div 2$ ，接着是 500MHz 的环形计数电路($\div 5$)。在扩展频段上，用置换的方法能测量到 18GHz ，甚至更高频率，测量精度方面，提高到 10^{-9} 以上。

为了改善电子式计数器，以时间测量为基础，采用多周期同步测量方法，称之为倒数计数器。倒数计数器以周期测量为基础，若再采用模拟内插法，测量精度可提高 $2\sim 3$ 量级。六十年代发展起来的计算计数器就是用这个原理组成的，例如，Hewlett-Packard公司生产的HP5360A型计算计数器、PO10型计算计数器和PO19(PO9)型计算时域测频器。

七十年代，一种新型电子计数器出现了，这就是HP5345A型电子计数器。其特点是内部钟信号频率为 500MHz ，即周期为 2ns ，同时，实现高精度的时间间隔测量。HP5390A型频率稳定度分析仪和HP5391A型频率和时间数据采集系统都应用了HP5345A型电子计数器，该计数器成为其中一个重要的部件。

由此看来，电子计数器向着提高测频上限、采用集成电