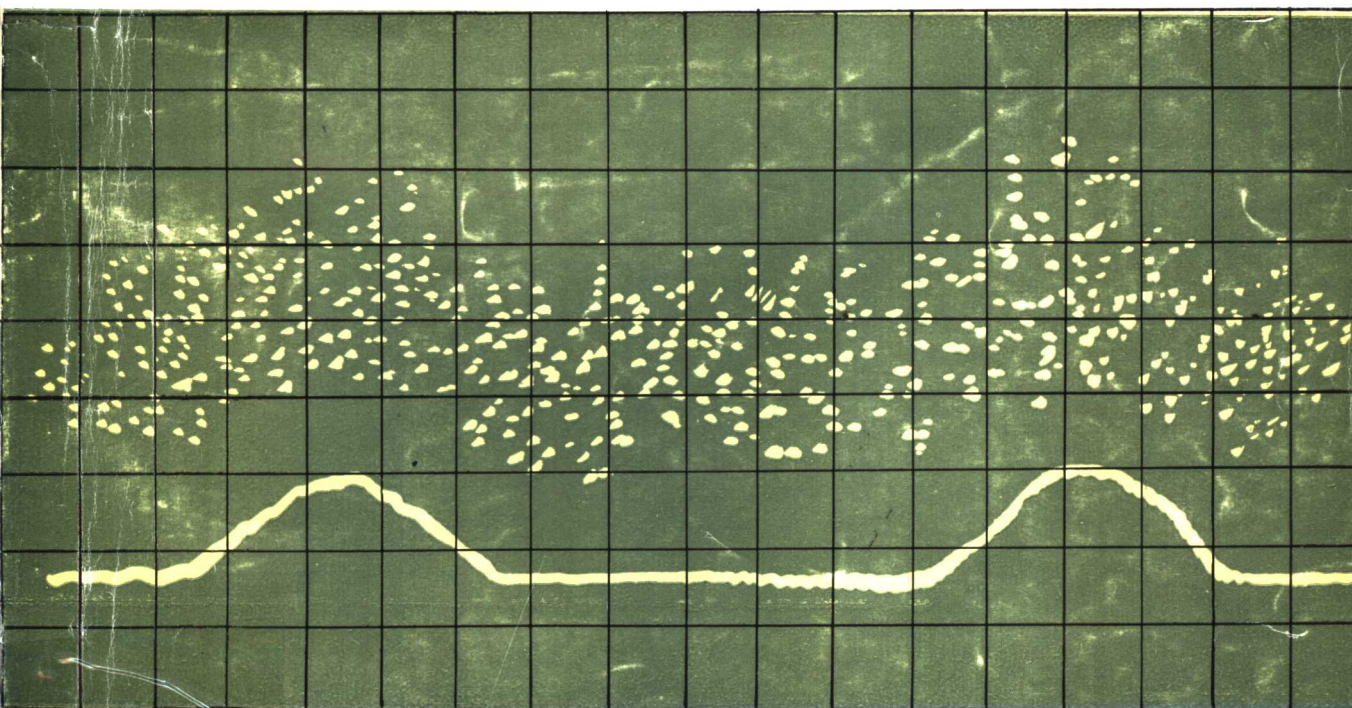


高等学校教学用书

微弱信号检测

(第二版)

曾庆勇 编著



微弱信号检测

(第二版)

曾庆勇 编著

浙江大学出版社

(浙)新登字 10 号

内 容 简 介

《微弱信号检测》是从应用角度出发,讨论有关检测微弱信号的理论和方法。全书共分六章。内容包括:噪声的分类和统计特性,以及低噪声前置放大器的设计原则;同步相干检测的原理、锁定放大器的主要部件——相关器、同步积分器、旋转电容滤波器及应用;讨论从噪声中恢复信号波形的的取样积分器和多点信号平均器;介绍光子计数器的原理及应用;讨论具有广泛应用前景的光学多通道分析系统;最后,介绍光谱信号的数据处理。

本书可作物理、光学、化学、生物物理、天文学和地震学及医疗仪器等专业的研究生和高年级本科生教材,以及供有关工程技术人员作参考书。

微弱信号检测

(第二版)

曾庆勇 编著

责任编辑 陈子饶

* * *

浙江大学出版社出版

浙江大学出版社计算机中心电脑排版

杭州富阳何云印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 16开 17.75印张 451千字

1986年11月第1版 1994年1月第2版 1994年1月第1次印刷

印数:2001—3500

ISBN 7-308-01273-5/TP·093 定价:8.50元

序

当代信息论是以香农(Shannon)信息论及信号检测、估计与处理理论作为其主要支柱。香农信息论主要研究信源、信道与信宿的基本特性,更进一步发展了现代通信技术的编码与译码理论。信号检测理论主要是研究从噪声中如何检测、处理及提取人们所需要的信号问题。获取真实信号的目的是检测对实际问题有用的信息。

微弱信号检测是讨论从噪声中如何提取极其微弱信号的问题。这样的问题大量发生在光谱学、物理、化学、天文、光通信、雷达、声纳以及生物医学工程领域。

曾庆勇同志的《微弱信号检测》一书比较集中地介绍了弱信号如何从噪声背景中检测的理论及应用的电路系统。本书再版主要有六章内容。第一章主要探讨噪声模型及噪声的统计特性分析。更进一步研究低噪声测试系统的设计有关的问题。第二章介绍同步相干检测理论,这一理论主要是以相关函数为基础的相关接收理论,在介绍理论工作的同时,清楚地论述了实现相关接收有关的相关器与同步积分器、旋转电容滤波器原理及电路实现,最后引进了利用相干检测理论的应用锁定放大器的设计。第三章讨论模拟信号离散化的关键问题,亦即取样技术,取样积分器及多点信号平均器工作原理及信号处理方法。第四章主要介绍光微弱信号检测中的重要测试仪——光子计数技术中的关键问题。光子计数技术是测量弱光功率或光子速率的一种新的技术。同时介绍了光电倍增管、放大器与鉴别器等专用器件的工作原理、参数与设计方法。第五章是专论光多通道分析系统。光多通道探测技术可实现同时检测一波段的光谱信息。这一技术是新型电视光子检测器和微电子学系统。本章详细地讨论近十年来发展起来的光多通道分析仪的原理与设计方法。本书再版增加一个新的内容,亦即光谱信号的数据处理。这一章讨论光谱的平滑、微分、积分及分离处理等有关问题。

本书文字流畅,通俗易懂,深入浅出,1992年分别获国家机械电子工业部和电子工业总局第二届全国高校优秀教材奖。是一册不可多得的好教材。随着信号检测技术的广泛应用,曾庆勇同志的书将会起到很好的导引作用。它将对本科生、研究生及广大科技人员从事弱信号检测的学习和研究具有重要的实际价值。

吕维雪

1993年3月4日

前 言

人类为揭示大自然的奥秘总是在寻求新的检测理论和方法。近 30 年来,在研究宏观和微观世界的过程中,科学家们不断开发能把淹没在噪声中的大量有用信息检测出来的理论和方法,通过不断地系统化、完整化,从而形成了一门新的微弱信号检测的学科分支。

微弱信号检测是利用电子学,信息论、物理学和电子计算机的综合技术。它是在认识噪声与信号的物理特性和相关性的基础上,把被噪声淹没的有用信号提取出来的一门新兴技术学科。

本书从应用的角度出发,讨论有关检测微弱信号的理论和方法。全书分以下五章:噪声的分类和统计特性,以及低噪声前置放大器的设计原则;同步相干检测的原理及锁定放大器的主要部件——相关器、同步积分器;从噪声中恢复信号波形的取样积分器和多点信号平均器;光子计数原理和应用;讨论具有广泛应用前景的光学多通道分析系统。

本书可作物理学、光学、化学、生物物理学、天文学和地震学及医学等专业的研究生 二年级本科生教材,以及供有关工程技术人员作参考。

由于本人对光谱仪器的专业知识了解不够全面,因此第五章的第二~四节是约请曾广杰同志编写的。本书在编写过程中得到叶关荣、林中和辛学耕三位副教授的热情帮助,安徽光机所 OSA 研制组为本书提供了大量资料。书中还吸取了国内科技人员近几年的科研成果,在此向诸位一并表示感谢。

本书承蒙缪家鼎教授仔细审阅,并提出许多宝贵意见,本人表示衷心的感谢。

由于水平有限,书中谬误和不妥之处不少,敬请读者批评指正。

曾庆勇

1986 年 6 月于浙江大学光仪系

再版前言

本书自 1986 年出版以来,采用的高校颇多,先后被 10 多所高校选作研究生、本科生教材,还被一些高校指定为主要参考书。再版采纳了广大读者的意见,在第一版的基础上进行了修订。

这一版补充了微弱信号检测系统的屏蔽与接地、旋转电容滤波器、信号的斩波调制、固态自扫描光敏二极管阵列和电子束及 X 射线固态自扫描多通道探测器。再版书中还把原版各章的数据处理部分集中,并增加了谱图分离处理的内容,而设为第 6 章光谱信号的数据处理。此外各章增设了思考题,改正初版中若干排版错误。

信号检测是一个非常宽广的研究课题,一本书不可能面面俱到。本书主要讨论目前国内外常用的、仪器化的微弱信号检测理论、基本方法和常用的仪器设备。对于如随机信号检测、自适应滤波、信号参数的估计^[62]、调频、调相、调幅信号的复制与解调等问题^[62,66],因受到教学学时和本书篇幅的限制而不作介绍,请读者原谅,如有必要,请参阅有关书籍。

本书再版承著名学者、博士导师吕维雪教授写序,对此表示衷心感谢。

曾庆勇

1993 年 6 月于求是园

目 录

绪论	1
第一章 噪声与低噪声测试系统的设计	7
§ 1-1 噪声的基本概念	7
一、干扰与噪声;二、噪声的统计特性;三、随机噪声的功率谱密度及相关函数;四、放大器及线性网络的噪声带宽;五、噪声源的相关性;六、信号噪声比(SNR)及信噪改善比(SNIR)。	
§ 1-2 电阻的热噪声和过剩噪声	13
一、热噪声的特点及计算公式;二、电阻噪声的等效电路及热噪声的计算;三、电阻的过剩噪声。	
§ 1-3 半导体器件的噪声特性	17
一、噪声系数;二、半导体二极管的散粒噪声;三、半导体三极管的内部噪声、等效电路及噪声系数;四、场效应管的内部噪声、等效电路和噪声系数;五、前置放大器的噪声电压 E_n 和噪声电流 I_n 模型;六、级联放大器的噪声系数。	
§ 1-4 低噪声放大器设计	28
一、最佳源电阻;二、器件的选择;三、工作点的选择;四、噪声匹配网络;五、低噪声放大器实例。	
§ 1-5 微弱信号检测系统的屏蔽与接地技术	38
一、电容性耦合与屏蔽;二、电感性耦合与屏蔽;三、接地方式;四、测试系统地回路电流及其抑制。	
第二章 同步相干检测—锁定放大器的工作原理	47
§ 2-1 相关函数和相关检测	47
一、能量信号与功率信号;二、相关函数;三、相关检测;四、相敏检测器。	
§ 2-2 锁定放大器概述	53
一、相关器简介;二、信号通道简介;三、参考通道简介。	
§ 2-3 锁定放大器中的相关器	57
一、相关器的数学解;二、相关器的性能;三、积分时间常数的选择;四、相关器的实用电路。	
§ 2-4 锁定放大器中的同步积分器	66
一、同步积分原理;二、同步积分器的性能;三、同步积分器的两节串联;四、等效噪声带宽;五、同步积分器实用电路。	
§ 2-5 旋转电容滤波器	75
一、旋转电容滤波器原理;二、旋转电容滤波器的性能;三、实用旋转电容滤波器电路。	
§ 2-6 几种典型的锁定放大器	79
一、以相关器为核心的锁定放大器;二、以同步积分器为核心的锁定放大器;三、同步积分器与相关器联用的锁定放大器;四、外层式锁定放大器;五、双相锁定放大器;六、旋转电容滤波器与相关器组成的同步外差锁定放大器。	
§ 2-7 锁定放大器的动态范围及动态协调	91
一、三个临界电平及动态范围的定义;二、动态范围和频率的关系;三、白噪声过载;四、动态协调。	
§ 2-8 锁定放大器的应用	96
一、使用锁定放大器应考虑的问题;二、信号的斩波调制;三、锁定放大器的调制检测法。	

第三章 取样与取样积分原理	107
§ 3-1 取样的物理过程	107
§ 3-2 取样定理	109
一、取样脉冲的傅里叶变换;二、时域取样信号的傅里叶变换;三、时域取样定理。	
§ 3-3 实时取样与变换取样的基本概念	117
一、实时取样;二、变换取样的基本概念;三、样品提取的方式。	
§ 3-4 取样积分器原理和工作方式	122
一、单点取样积分器工作过程的概述;二、单点取样积分器的工作方式;三、线性平均与指数平均。	
3-5 门积分器的原理分析	127
一、门积分器电路的输出信号;二、输出特性的讨论;三、等效噪声带宽;四、不相干信号的抑制与信噪改善。	
§ 3-6 几种典型的取样积分器	134
一、单通道单门取样积分器;二、两级串联取样门取样积分器;三、具有基线取样的取样积分器;四、双通道取样积分器。	
§ 3-7 取样积分器的参数选择及应用	139
一、取样门宽 T_s ;二、时基宽度 T_b ;三、慢扫描时间 T_s ;四、时间常数 T_c ;五、参数的选择;六、取样积分器的应用实例。	
§ 3-8 多点信号平均器及其发展	143
一、多点信号平均器简介;二、多点信号平均器的原理方框图简介;三、多点信号平均器的工作方式;四、信号平均器的发展。	
第四章 光子计数技术	156
§ 4-1 光子计数器的原理概述	156
一、光子;二、弱光的光电信号;三、泊松统计分布,散粒噪声和暗电流(暗计数);四、光子计数系统方框图简介。	
§ 4-2 光子计数器中的光电倍增管	161
一、工作原理简介;二、光电倍增管的偏置电路。	
§ 4-3 放大器——鉴别器	164
一、前置放大器和脉冲高度鉴别器概述;二、前置放大器参数及放大——鉴别器电路。	
§ 4-4 光子计数器的测量方法	169
一、光子速率的直接测量法;二、源补偿测量法;三、“倒数”测量法;四、恒定背景扣除测量法;五、斩光器实时自动背景扣除测量法。	
§ 4-5 模拟输出的光子计数器	173
一、线性速率计;二、对数速率计。	
§ 4-6 光子计数器中的脉冲堆积效应	175
第五章 光多通道分析系统	179
§ 5-1 光多通道分析系统概述	179
§ 5-2 衍射光栅及其特性	181
一、光栅方程;二、光栅的角色散;三、光栅的分辨率;四、光谱的迭级和自由光谱范围;五、闪耀	

	光栅和衍射效率;六、全息光栅。	
§ 5-3	光谱仪器的装置型式 187 一、艾伯特-法斯蒂(Ebert-Fastie)装置;二、切尔尼-吐奈尔(Czerny-Turner)装置;三、李特洛(Littrow)装置。	
§ 5-4	多色仪简介 189 一、工作原理;二、工作光谱范围;三、色散率;四、分辨率;五、光强度;六、杂散光。	
§ 5-5	硅靶光电导摄像管 193 一、硅靶管的结构;二、工作原理;三、硅靶管的工作特性。	
§ 5-6	固态自扫描光敏二极管阵列(SPD 阵列) 198 一、SPD 阵列的光电转换工作原理;二、SPD 器件的主要特性;三、一维 SPD 线性阵列的信号读取电路;四、放大处理电路;五、二维 SPD 平面阵列简介。	
§ 5-7	电子束和 X 射线固态自扫描多通道探测器 211 一、电子图像探测器;二、X 射线探测器。	
§ 5-8	像增强器工作原理 215 一、光阴极;二、电子光学系统;三、荧光屏;四、光学纤维面板;五、单级增强器及其级联;六、微通道板像增强器。	
§ 5-9	增强型硅靶摄像管及增强型光电二极管阵列 227 一、增强型硅靶摄像管的结构和原理;二、SIT 管的特性;三、二级增强硅靶摄像管;四、增强型自扫描硅光电二极管阵列探测器。	
§ 5-10	光学多通道分析系统摄像机 232 一、磁聚焦磁偏转系统;二、扫描控制系统;三、摄像管的直流偏置及选通工作偏置;四、摄像机的噪声;五、摄像机的信噪比;六、前置放大器与 A/D 变换。	
§ 5-11	OMA 系统的数据采集 244 一、实时及实时背景扣除采集;二、信号累加平均采集;三、信号靶面积累采集;四、正常 500 通道累集;五、瞬态光谱的采集;六、自动延时似三维图像测试;七、二维测量信号采集;八、非光学多通道探测器的信号采集。	
第六章	光谱信号的数据处理 251	
§ 6-1	光谱曲线的平滑 251 一、移动平滑法;二、多项式最小二乘方逼近法;三、累加平均与最小二乘方平滑联合使用。	
§ 6-2	光谱图的微分处理 257 一、三点中心差近似微分法;二、最小二乘方多项式逼近法求导数。	
§ 6-3	数字积分处理 262 一、采用梯形公式进行数字积分;二、辛普森(Simpson)数字积分法则;	
§ 6-4	谱图的分离处理 264 一、谱图分离处理的物理基础;二、谱图分离处理的方法;三、重叠峰的分辨极限。	
§ 6-5	各通道光谱响应的校正 271	
参考文献 274	

绪 论

一、微弱信号检测与科技发展

科学是最实事求是的,容不得半点虚假。在科技领域中,那些漂亮的,夸夸其谈的言词是无济于事的,只有完整可靠的实验数据才能有力的证明你的研究成果,从而获得同行们的认可。科学发展史表明:新的检测理论、方法和仪器提供了新的数据,得出了新的结果,从而开辟了新的科技领域,推动了科技的新发展。因此,如何获得正确的实验数据是科学研究的关键。随着科学技术向纵深发展,人们在研究宏观和微观世界的过程中,常需检测极微弱的信号。如生物学中细胞发光特性、光合作用、生物电、生物磁的测量;天文学中的星体光谱;化学反应中的物质生成过程;物理学中的表面物理特性;光学中的拉曼光谱、光声光谱、脉冲瞬态光谱的测量等等。由于任何检测设备均存在内部噪声和背景,信号往往被噪声淹没,常规的检测方法对此无能为力。为此,人们开始研究新的检测理论、方法和设备,以满足现代科学技术研究之需。微弱信号检测(Weak Signal Detection)这门新兴的信号检测与处理的技术学科就是在这种情况下产生并得到迅速发展。自 60 年代初到现在已取得重大进展,应用范围遍及光、电、磁、声、热和生物、力学、地质、环保、医学、激光及材料等领域,其仪器已成为现代科学研究中不可缺少的设备。

微弱信号检测技术是采用电子学、信息论、计算机及物理学的方法,分析噪声产生的原因和规律,研究被测信号的特点与相关性,检测被噪声淹没的微弱有用信号。微弱信号检测的宗旨是研究如何从强噪声中提取有用信号,或者说用什么技术来提高检测系统输出信号的信噪比。其任务是研究微弱信号检测的理论,探索新方法,研制新设备,从而在各学科领域中获得广泛应用。

所谓“有用信号”就是能传递信息的物理量。如电信号的振幅、相位、频率、波形;光学信号的光强、波长;力学中的位移、压力、流速等等。在实际测量中,常采用不同的传感器把非电量的物理量,化学量或生物量转换成模拟电信号再进行测量,如表 0-1 所示^[66]。因此,若暂不考虑传感器信号转换原理及效应,那么信号检测就归结为对电信号中的振幅(或电平)、相位、频率(速率、重复率)、波形及功率等参数的测量。

表 0-1 典型的基本型传感器的变换原理、效应

基本型传感器	变换原理、效应	输出形式	传感器实例
光传感器	量子型		
	光电效应	电流、电压	光敏二极管、光敏晶体三极管
	光导效应	电流、电阻	C ₆ S 元件
	光子牵引效应	电压	Ge 元件
	约瑟夫逊效应	电压	红外线传感器
	光电发射效应	电流	光电倍增管
	热型		
	温差电效应	电压	热电偶、热电堆
	热释电效应	电压	热释电探测器
	气体的热膨胀	电流	高莱探测器

续表 0-1

基本型传感器	变换原理、效应	输出形式	传感器实例
温度传感器	塞贝克效应	电压	热电偶
	电阻的温度变化	电位差、电阻	热敏电阻、电阻温度计
	pn 结的温度特性	电流、电压	晶体管温度计
	压电常数与温度的关系	共振频率	压电晶体温度计
	强磁性常磁性的相互转化	共振频率	感温舌簧接点开关
	核四极共振吸收的温度依存性	共振频率	NQR 温度计
	透射率的变化	透射率	液晶温度计
	约瑟夫逊效应	噪声电压	
压力、应变式传感器	压阻效应	电位差、电阻、电流	应变计、测力传感器、感压
	压电效应	电压	二极管、话筒
磁传感器	霍尔效应	电压、	霍尔元件
	磁阻效应	电流、电压、电阻	S 磁阻元件、磁二极管
	约瑟夫逊效应	电压、频率	QUID
	核磁共振吸收	电压	质子共振磁通计
	磁通变化所感应的电流	电流	磁头
气敏传感器	半导体表面的吸附效应	电阻	各种半导体气敏传感器
	可燃性气体的反应热使 P _t 线电阻变化	电阻	可燃性气体传感器
	玻璃电极	电压、电动势	pH 计
湿度传感器	由于吸湿而产生的离子传导	电流、电阻	工业用湿度计
	吸湿后陶瓷电阻变化	电流、电阻	陶瓷湿度传感器
	吸湿后物质的颜色变化	色	颜色湿度计
	吸湿膨胀	伸长	毛发湿度计
生物传感器	稳定化酶电极	电压、电动势	尿素传感器、葡萄糖传感器

所谓“微弱信号”可从两个方面理解：其一是指有用信号的幅度，相对于噪声显得很微弱。如输入信号的信噪比为 10^{-1} 、 10^{-2} ，以至 10^{-4} ，也就是说有用信号幅度比噪声小 10 倍、100 倍乃至万倍。这时，有用信号完全淹没在噪声之中，要检测这种信号，真可谓“大海捞针”。其二是指有用信号的幅度绝对值极小，如检测 μV 、 nV 、乃至 pV 量级的电信号振幅；检测每秒钟多少个光子的弱光信号与图象。利用微弱信号检测技术和仪器设备，可大大提高检测灵敏度。常规检测方法的信噪改善比为 10 左右，而通过微弱信号检测技术则信噪改善比可达 $10^4 \sim 10^5$ ，检测灵敏度达到电压 $\leq 0.1\text{nV}$ 、电流 $\leq 10^{-14}\text{A}$ 、温度 $\leq 5 \times 10^{-7}\text{K}$ 、电容 $\leq 10^{-5}\text{PF}$ 、微量分析 $\leq 10^{-8}\text{mol}$ ，位移

$\leq 10^{-3} \sim 10^{-4} \mu\text{m}$ 等等,比常规测量灵敏度高 3~4 个数量级。

综上所述,当今微弱信号检测的原理、方法和仪器已成为现代科学研究不可缺少的理论和手段,而未来科技的发展必将对检测技术提出更高的要求。它们相互促进,相互依存,不断发展。

二、微弱信号检测的基本方法及内容

在浩瀚的科技海洋中,人们要检测种类繁多的信号。对不同信号采用不同的检测方法,这是一条可行的路。因此,人们在进行信号检测前,应深入分析信号的本质,明确检测的对象,而后确定最佳的检测方案——原理、方法和仪器。信号检测是一项非常广宽的研究课题,一书无法面面俱到。本书主要讨论目前国内外常用的,仪器化的微弱信号检测原理、方法、仪器设备及其应用。

首先讨论噪声与低噪声测试系统的设计;噪声无处不在,并与信号共存。图 0-1 示出了实

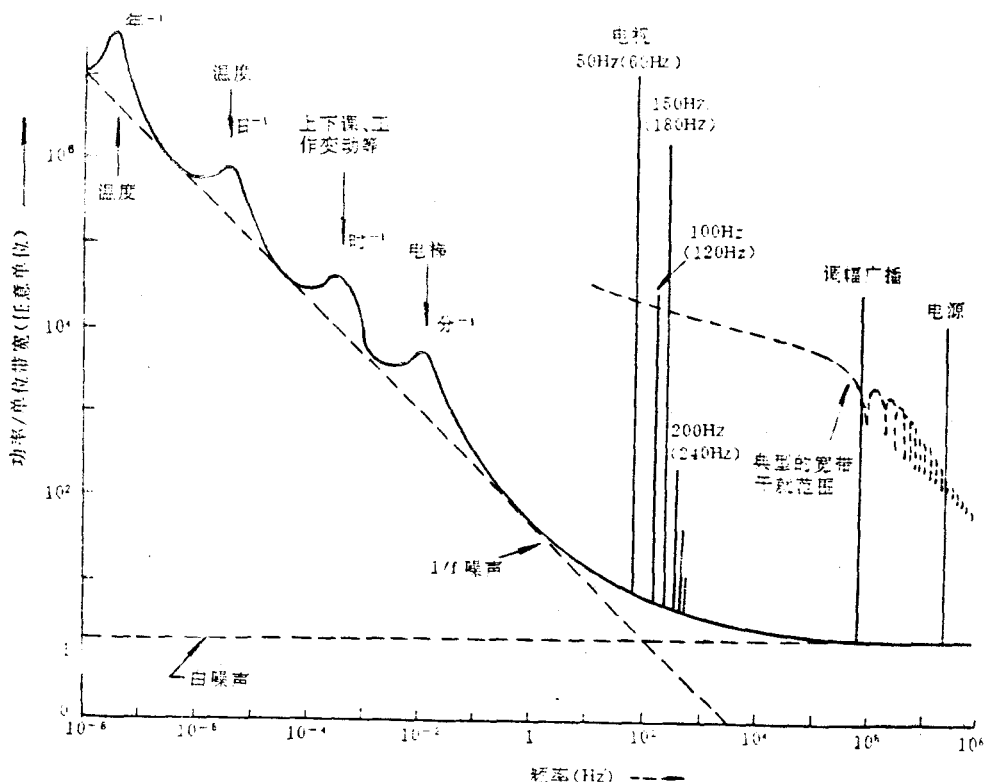


图 0-1 实验环境内的噪声与干扰大体分布图

验环境内的噪声与干扰的大体分布。要提取有用信号,必须抑制噪声,微弱信号检测技术实质上是专门与噪声作斗争的技术。知彼知己,百战不殆。所以在第一章中,首先讨论噪声与干扰的基本概念及其特点,讨论对传感器输出的弱电信号进行低噪声前置放大器的设计思想,介绍检测系统抗干扰的方法和措施。

任何微弱信号检测系统,均须把传感器输出的弱电信号进行放大,为使信号不被噪声淹没得更深,采取低噪声放大器是必要的。根据传感器的噪声和阻抗特性设计好前置放大器,特别是第一级放大器是信号通道中低噪声放大的关键,此外,对传感器及前置放大器采取低温致冷

是降低噪声的有效方法;根据信号频谱特性尽量压缩信号带宽也是降低噪声的一条途径;采用正确屏蔽与接地技术是保证测试系统正常工作的有力措施。

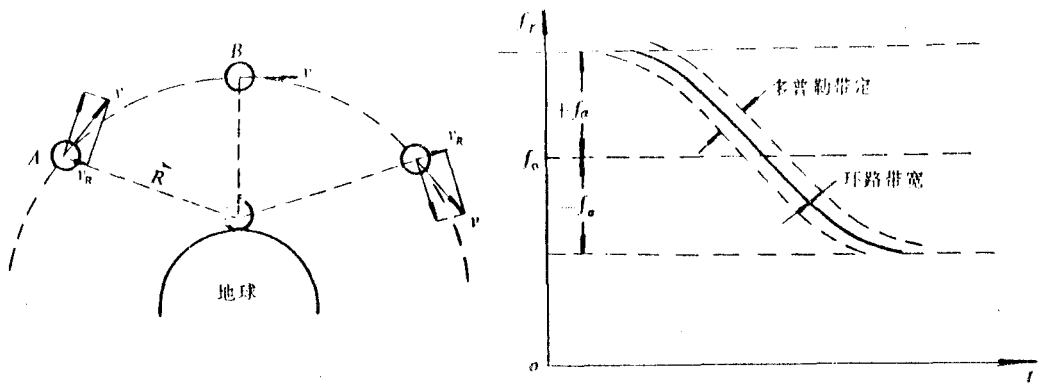
第二、讨论采用同步相关检测原理压缩带宽提取信号的振幅与相位信息。

相关检测是从噪声中提取有用信号的有效方法。这在通信、雷达、自动控制等领域中早已获得充分证实(由于噪声与噪声、噪声与信号均不相关,而信号与信号则完全相关。根据这一特性,电路完成信号与参考信号的互相关运算,从而达到将强噪声中的信号振幅和相位信息满意地检测出来。经分析可知,同步相关检测的输出特性等效为一中心频率可变的频带极窄的梳状滤波器。它只允许信号中的基波及各奇次谐波通过,滤除其他频率的信号和噪声。梳状滤波器的等效Q值高达 10^8 ,几乎把噪声抑制殆尽。)锁定放大器(Lock-in Amplifier)就是这一原理的典型应用。锁定放大器的出现使检测电压的满刻度灵敏度达到小于 $1nV$,信噪改善比优于 10^5 。这一特性使它几乎在所有的现代科技领域中获得广泛应用,成为检测噪声中周期信号振幅和相位信息的最佳仪器设备。如锁定放大器用于甲烷 $3.39\mu m$ 和碘 6238\AA 的饱和吸收超精细He-Ne激光稳频装置中,可使激光频率的重复性优于 $10^{-11}\sim 10^{-12}$ [67]。又如用于恒温控制可使精度优于 $10^{-4}C$ 等等,成功的应用不胜枚举。

第三、采用取样积分和信号平均的方法,进行频带压缩,以提取或复制噪声中的信号波形。

这就是取样积分器和多点信号平均器要讨论的内容。取样积分器是采用变换取样,累加平均的方法、复制高速高频信号的波形。实质上,它也是相关检测,与锁定放大器不同的只是部分相关,即仅在取样门宽 T_s 的一段时间内信号与参考信号相关。由于取样门脉冲很窄,其函数包含了基波及奇、偶各次谐波分量,所以其输出也包含了信号中的基波及各次谐波分量,系统输出亦为信号基波及各次谐波处的梳状滤波特性。根据信号叠加原理,只要信号中基波及各谐波分量按同样比率通过检测系统,那么它的输出波形将不失真地复现。据此原理,取样积分器(Sampling Integrator)又称Boxcar平均器(Boxcar Averager)能恢复强噪声中的信号波形。选用不同取样头,可得不同门宽的取样脉冲。目前最窄门宽达 $25ps$,其等效带宽 $\Delta f_m \approx 14GHz$,频率分辨率 $f_m \approx 16GHz$,因此,它是强噪声中高频、高速信号波形的最佳检测设备。信号平均器(Signal Averager)则是采用适时多点取样,多周期平均技术提取和复制在噪声中的低频信号波形,输出特性同样为基波及各谐波处的梳状滤波器。它广泛用于生物,医学等领域的信号检测。

应该指出,锁相环路是相关检测的另一种形式,它的窄带频率跟踪滤波和低门限特性,使它成为从噪声中检测调频,调相和调幅信号的最佳方法之一。如卫星多普勒测速定轨法中是通过测量卫星相对于接收机的径向速度($V_r = \frac{dr}{dt}$,其中R为卫星与接收机的距离)来确定卫星的运行位置,如图0-2所示。而径向速度正比于接收到卫星发射频率 f_0 的多普勒频移量,即 $f_r = f_0 \pm f_0 \left(\frac{V_r}{C}\right) = f_0 \pm f_d$, f_r 为接收到的频率, f_d 为多普勒频移,C为光速。所以,测出 f_r 值,即可知卫星此刻的位置。由于接收到的信号非常微弱,信号强度可能低于接收机的内部噪声,普通接收机无法实现信号检测。设输入信号的多普勒带宽为 $25KHz$,采用锁相环的相关检测,可使信号输出带宽压缩到窄于 $25Hz$,输出信噪比提高 10^3 倍,从而圆满地完成信号检测任务。又如,在激光测速装置中采用锁相环解调,能实现慢反射条件下的在线检测,其精度高达 $0.1\sim 0.01mm/s$ 。而在通信中采用锁相环的相关接收,对调频,调相和调幅信号的复制与解调其应用之广,效益之大更是无可估量。因此,锁相技术已成为电子技术中的重要分支。从相关检测原理与抗噪声性能的角度讲,锁相环路应在本书中占有重要篇幅,但考虑到锁相环路已有不少专著[62~65],因此,本书不作讨论。



(a) 卫星多普勒测速轨道示意图

(b) 卫星多普勒频率曲线

图2 锁相环频率跟踪应用之一

第四、讨论弱光信号的随机计数原理及技术。

光子既有波动性又具粒子性,其波动性在光谱学与干涉计量等领域中得到广泛应用。而光子计数器则是以光子的粒子性为基础设计的弱光光强检测仪器。其目的是检测光子离散的弱光信号。光子的发射是离散的,但又服从一定概率分布的随机信号,检测这种离散的弱光信号是光子计数器的研究课题。在充分分析噪声特性的情况下,人们采用对探测器——光电倍增管低温致冷以降低热电子发射,设置合适的鉴别电平以除去倍增极上的热噪声和外来高能辐射噪声,采用不同的测量方式消除背景干扰、光源强度波动及脉冲堆积效应等引入的误差。同理,这种方法对于其他形式的离散信号检测也有一定的借鉴作用。

第五,讨论采用光多通道探测器进行快速光学图像及光谱的并行检测。

自1970年M·Margoshes首先提出把中阶梯光栅摄谱仪与电视型成像器件结合用于光谱分析的构想以来,从此开始了光多通道分析系统(Optical Multichannel Analyzer,简称OMA)的研制和发展旅程。1972年美国EG&G PARC率先推出它的OMA—I系统,目前市场上已有OMA—IV销售。此外,德国的B&M,美国的Tracor等也相继推出它们的产品。现在OMA系统已成为从紫外到红外的弱光图像及一维或二维快速光谱检测的最佳仪器设备。

OMA系统与采用傅里叶(Fourier)变换原理设计的傅里叶光谱仪不同。傅里叶光谱仪(Fourier Transformation Spectrometer)又称干涉调频光谱仪。它是在双光束干涉仪中,使相干光束间的位相差连续改变,并同步探测记录在中央条纹上产生的光强变化曲线——干涉图,然后用干涉图函数的傅里叶变换获得光谱图。由于它必须利用机械装置带动平面镜匀速移动来改变两束光的光程差,使之产生干涉条纹。因此,它测量一段谱线($4000\sim 400\text{cm}^{-1}$)目前最快仍需数百毫秒。且由于其工作原理及探测器特性缘故,它仅适用于红外光谱分析。而OMA系统采用电控扫描,光多通道探测器接收,去除了仪器中的机械传动装置使它成为高速光学图像和光谱分析的最佳仪器设备。OMA大体分三部分,即光学、光多通道探测器及电路、计算机控制与处理,而探测器是OMA的核心。早期的探测器采用电视摄像管,而目前大量采用的是一维或二维光电二极管阵列和CCPD光电耦合器件。一维探测器探测空间一直线上分布的光强,如光谱信号。二维探测器是探测一个平面上光强分布,如二维图像、二维光谱。采用OMA探测光谱,可实现快速并行探测,它能在16ms内读取1024个数据点的曲线。使用选通功能,可对ns量级的光脉冲作瞬态光谱分析,还能对光源作时间分辨光谱和二维光谱的快速分析等。上述功

能目前几乎没有其他仪器可代替。为提高灵敏度和输出信噪比,OMA 系统采用对探测器低温致冷减少暗电流,增加光敏面的曝光积累时间,使每个通道的探测灵敏度提高到近于单光子量级。在获得信号数据的基础上,采用计算机信号处理,使仪器功能非常完美。因此,在光学与光谱分析、遥感遥测、化学、医学、环保、生物及天文等领域都得到了广泛的应用。

最后一章讨论采用计算机数据后继处理,提高输出信号的信噪比和系统的分辨率问题。

计算机的大量使用给各行各业,各学科领域带来无可估量的效益,在微弱信号检测中,计算机的作用除控制外还承担信号处理工作,如利用曲线平滑进一步提高输出信号信噪比,利用数据微分,确定谱图峰位,利用数据积分,算出谱峰能量,采用谱图分离处理,确定混合谱中各峰峰位峰形及各谱峰的相对值,从而清楚地绘出样品中所含元素的种类及相对浓度,完成了硬件设备不能完成的任务,大大提高了检测系统的分辨率。这些数据的后继处理使检测结果准确,物理概念清晰。计算机数据处理是现代科学仪器的一大特点。数据处理的内容和方法繁多,本书仅针对光谱信号处理进行讨论,其方法也适用于其他类似的测量中。

三、结束语

微弱信号检测是一门综合性技术学科,在学习本课程之前,必须先修物理学、高等数学、模拟电路,数字电路、光电转换器件等课程,同时对计算机、信息论,传感器原理和光学知识应有所了解。

知识在于应用,只有用于实际才能显示出它的可贵。微弱信号检测的理论,方法和仪器设备用于科学研究有可能实现你梦寐以求的愿望。笔者希望微弱信号检测一书的再版,能有助于广大读者对本学科的学习和了解,能有助于微弱信号检测科学的普及和发展。

第一章 噪声与低噪声测试系统的设计

微弱信号检测是一门新兴的技术学科,它利用电子学、信息论和物理学的方法,分析噪声产生的原因和规律,研究被测信号的特点和相关性,检测被噪声淹没的微弱信号。

在检测系统、图象传输和通信设备中当出现噪声时,仪器的精度、稳定性及重复性就明显降低,由于噪声电报误码率增高,使通信无法正常进行,雷达无法跟踪目标,在电视荧光屏上呈现一片“雪花”,图象模糊不清。为此,在讨论微弱信号各种检测技术之前,必须对噪声的有关概念作全面的阐述。

本章的主要内容是对噪声的类型、噪声源的表示方法、等效噪声带宽、噪声功率谱密度,前置放大器的噪声系数,以及低噪声设计原则等基本概念作较详细的讨论。

§ 1-1 噪声的基本概念

一、干扰与噪声

对有用信号来讲,干扰和噪声是讨厌的扰动。为了区别,常把可以减少或消除的外部扰动称为干扰,而把由于材料或器件的物理原因所产生的扰动称为噪声。

来自检测系统外部干扰,如市电 50 或 100Hz 交流干扰;电台的调幅广播信号或电源的开关火花干扰;脉冲激光、雷达发射或电路中高能窄脉冲引起的宽带干扰;元件或部件的机械振动产生颤噪效应等。此外,宇宙射线和雷电等也归于此类干扰。这些干扰绝大多数是“人为的”,采取适当的屏蔽、滤波或元件合理配置等措施,干扰是可以减小和消除的。

材料、器件或部件的物理原因产生的噪声。如处于绝对零度以上的任何导体均具有的热噪声;晶体管、电子管或光电器件中,因电子随机作用而产生的散粒噪声等,均属于这类噪声。这类噪声是由大量的短尖脉冲组成,其幅度和相位都是随机的,脉冲的形状(时间函数)也不一定相同。但任一噪声脉冲的能量只占总噪声能量的极微小部分。这些脉冲的叠加,即产生所谓的随机噪声。

在检测系统中,可以处理的最高信号电平受电路特性的限制,但最小可检测电平取决于噪声。也就是说,噪声限制了传感器的分辨率和系统的动态范围。

当一个系统的信号扰动很大,在无法区分是干扰还是噪声时,可先加以屏蔽。频率高于 1000Hz 或阻抗大于 1000Ω 时,一般采用金属导体屏蔽,如铝或铜等。对于低频扰动或低阻抗的情况,可采用磁屏蔽,如铁镍导磁合金等。此外,也可先给前置放大器单独供电,如有效采,说明噪声主要来自外部干扰,则可进一步采取屏蔽措施。如果还不能减少扰动,就应认为噪声主要是系统内部元部件的随机的基本噪声。

二、噪声的统计特性

在微弱信号检测技术中,需要处理的主要是基本噪声,且绝大多数是随机噪声。

随机噪声是一种前后独立的平稳随机过程,在任何时刻它的幅度、波形及相位都是随机

的。但每一种噪声还是服从于一定的统计分布规律，因此又是可统计的。例如，只要产生噪声过程的条件不变，噪声功率或给定时间区间内的能量就不变，它在时间域内的幅度平均值是零。大多数噪声瞬时幅度的概率分布是正态的，即符合高斯分布规律^[1,23]：

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\alpha)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-1)$$

式中 $\sigma = \sqrt{\bar{x}^2}$ ； $P(x)$ 为随机物理变量 x 的概率密度； α 为噪声电压平均值， $\alpha = \bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x dt$ ，一般为零； σ^2 为噪声电压均方值， $\bar{x}^2 = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2 dt = \sigma^2$ ， σ 为噪声电压均方根值。在低噪声设计和检测中，主要关心的是 σ ，它是衡量系统噪声大小的基本量。

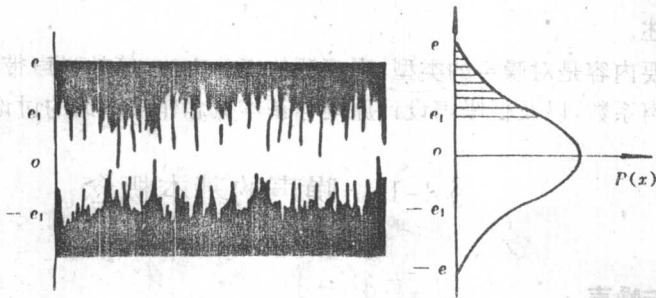


图 1-1 噪声波形及幅度的高斯分布

图 1-1 为示波器上获得的电压噪声的照片及通用的高斯曲线。高斯曲线包围的面积代表不同噪声电压产生的概率。概率的取值在 0~1 之间，所以总面积代表 1。波形集中在零电平附近，高于或低于这个电平的噪声波形的瞬时值的概率等于 0.5，超过 e_1 电平值的概率如图中所示的阴影区面积。作为工程近似，一般认为电噪声都位于正负三倍的噪声均方根值之内，峰一峰电压在 99.7% 的时间内小于六倍的均方根值。

式(1-1)说明噪声电压可以取各种值，即使幅度很大，也有一定的概率。峰值越高，概率越小。表 1-1 表示对给定的 $|x_0|$ 峰值，超过 $|x_0|$ 值的概率 $P(|x| > x_0)$ 的百分数^[23]。

表 1-1 峰值超过 $|X_0|$ 的概率 $|X| < (X_0)$ 的百分数

$P(X > X_0), \%$	10.0	1.0	0.1	0.01	0.001
$ X_0/\sigma $	1.645	2.576	3.291	3.890	4.417

由表 1-1 可知，瞬时噪声幅度基本上在 $\pm 3\sigma$ 之内。所以工程上常取噪声峰值电压为三倍的均方根值电压，并在测量噪声电压时用均方根响应电压表。正弦波全波整流的平均值是峰值的 0.636，而它的均方根值是峰值的 0.707。如用平均值电压表（常用的交流电压表）测量正弦波的均方根值，则要在平均值电压表的刻度上乘以修正系数 1.11。

高噪声电压由大量短尖脉冲组成，它的噪声电压均方根值为峰值的 0.798 倍，均方根值与平均值之比为 1.255。因此，在均方根值正弦响应的电压表上所读出的噪声电压，须乘以 1.13 的修正系数才是噪声电压的均方根值^[7]。

三、随机噪声的功率谱密度及相关函数

研究周期信号和非周期信号时，信号在频域中的特征常用频谱（幅度或相位谱）描述，它