

信息、控制与系统》系列教材

Detection of Weak Signals

微弱信号检测

高晋占 编著

Gao Jinzhan



TUP

清华大学出版社



Springer



新编《信息、控制与系统》系列教材

微弱信号检测

高晋占 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

微弱信号是淹没在噪声中的信号,微弱信号检测的主要目的是提高信噪比。本书研究噪声的来源和统计特性,分析噪声产生的原因和规律,运用电子学和信号处理方法检测被噪声覆盖的微弱信号,并介绍几种行之有效的微弱信号检测方法和技术。

全书共分7章,主要内容有:微弱信号检测与随机噪声、放大器的噪声源和噪声特性、干扰噪声及其抑制、锁定放大、取样积分与数字式平均、相关检测、自适应噪声抵消。

本书可作为自动化、电子工程、物理、化学、生物医学工程、测试技术与仪器等专业的研究生和高年级本科生教材,也可供有关专业工程技术人员自学和参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

微弱信号检测/高晋占编著. —北京:清华大学出版社,2004. 11

(新编《信息、控制与系统》系列教材)

ISBN 7-302-09817-4

I. 微… II. 高… III. 信号检测—高等学校—教材 IV. TN911.23

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第110138号

出 版 者: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 王一玲

文稿编辑: 马幸兆

印 刷 者: 清华大学印刷厂

装 订 者: 三河市李旗庄少明装订厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 175×245 印 张: 21.25 字 数: 455千字

版 次: 2004年11月第1版 2004年11月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-09817-4/TN·220

印 数: 1~3000

定 价: 35.00元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103或(010)62795704

前言

信息时代需要获取信息,许多科学研究和工程技术的信息需要用检测的方法来获取。当被测信号非常微弱时,易被噪声淹没,对它们的检测往往变得十分困难。微弱信号检测就是利用近代电子学和信号处理方法从噪声中提取有用信号的一门新兴技术学科。

微弱信号检测技术在许多领域具有广泛的应用,例如物理学、化学、电化学、生物学、天文学、地学、磁学等。微弱信号检测所针对的检测对象,是用常规和传统方法不能检测到的微弱量,例如弱光、弱磁、弱声、小位移、微流量、微振动、微温差、微压差以及微电导、微电流等。随着科学技术的发展,对微弱信号进行检测的需要日益迫切,可以说,微弱信号检测是发展高新技术,探索及发现新的自然规律的重要手段,对推动相关领域的发展具有重要意义。

“微弱信号”不只意味着信号的幅度很小,而主要指的是被噪声淹没的信号,“微弱”是相对于噪声而言的。只有在有效地抑制噪声的条件下放大微弱信号的幅度,才能提取出有用信号。因此,微弱信号检测是一门专门针对噪声的技术,其主要任务是提高信噪比。为了从噪声中提取出有用的信号,就需要研究噪声的来源和性质,分析噪声产生的原因和规律,以及噪声的传播途径,有针对性地采取有效措施抑制噪声,研究被测信号和噪声的统计特性及其差别,以寻找出从背景噪声中检测出有用信号的理论和方法。

本书分为7章。第1章介绍随机噪声的统计特性,这是后续各章的理论基础。第2章介绍电路内部固有噪声源及其特性,对各种有源器件的噪声性能进行分析,并阐述低噪声放大器设计中需要考虑的几个问题。第3章介绍干扰噪声的来源、特点及各种耦合途径,并详细介绍屏蔽和接地对于各种干扰噪声的抑制作用,以及其他一些常用的抗干扰措施和微弱信号检测电路设计原则。

经过多年的研究和实践,科技工作者提出和发展了一些从噪声中提取微弱信号的有效方法和技术,包括锁定放大、取样积分、相关检测、自适应噪声抵消等。本书第4章到第7章分别介绍这些方法的理论基础、设计实现以及一些应用实例。

微弱信号检测技术仍在持续发展,新的研究成果不断涌现。例如,基于人工神经网络、小波变换、混沌理论的微弱信号检测理论和方法都已经取得可喜的进展,限于篇幅本书不予介绍。

本书可用作自动化、电子工程、物理、生物医学工程、测试技术与仪器等专业的研究生和高年级本科生教材,也可供涉及电子噪声、低噪声设计、电磁兼容性、微弱信号检测的工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中难免存在缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

高晋占

2004年6月于清华大学

新编《信息、控制与系统》系列教材

出版说明

信息、控制与系统学科是在 20 世纪上半叶形成和发展起来的一门新兴技术科学。在人类探索自然和实现现代化的进程中,信息、控制与系统学科的理论、方法和技术始终起着重要的和基础的作用。基于信息、控制与系统科学的自动化的发展和应用水平在一定意义上是一个国家和社会的现代化程度的重要标志之一。本系列教材是关于信息、控制与系统学科所属各个领域的基本理论和前沿技术的一套高等学校系列教材。

本系列教材所涉及的范围包括信号和信息处理、模式识别、知识工程、控制理论、智能控制、过程和运动控制、传感技术、系统工程、机器人控制、计算机控制和仿真、网络化系统、电子技术等方面。主要读者对象为自动控制、工业自动化、计算机科学和技术、电气工程、机械工程、化工工程和热能工程等系科有关的高年级大学生和研究生,以及工作于相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。

10 多年前,清华大学出版社会同清华大学自动化系,曾经组编出版过一套《信息、控制与系统》系列教材,产生了较大的社会影响,其中多数著作获得过包括国家级教学成果奖和部委优秀教材奖在内的各种奖励,至今仍为国内众多院校所采用,并被广大相关领域科技人员作为进修和自学读物。我们现在组编的这套新编《信息、控制与系统》系列教材,从一定意义上说,就是先前那套教材的延伸和发展,以反映近些年来学科的发展和在科学研究与教学实践上的新成果和新进展,以适应当前科技发展和教学改革的新形势和新需要。列入这套新编系列教材中的著作,大多是清华大学自动化系开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上的新编著的教材,也有部分原系列教材的更新和修订版本。这套新编系列教材总体上仍将保持原系列教材求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理论和新近进展,力求做到学科先进性和教学适用性统一。需要说明的是,此前我们曾以《信息技术丛书》为名组编这套教材,并已出版了若干种著作。现为使“书”和“名”更为相符,这些已出版的著作将在重印或再版时列入这套新编系列教材。

我们希望,这套新编系列教材,既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和教学适用的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会

2002 年 6 月

新编《信息、控制与系统》系列教材编委会

顾	问	李衍达	吴澄	边肇祺	王桂增		
主	编	郑大钟					
编	委	徐文立	王雄	萧德云	杨士元	肖田元	
		张贤达	周东华	钟宜生	张长水	王书宁	
		范玉顺	蔡鸿程				
责任编辑		王一玲					

本书常用符号

1. 基本符号

f	频率通用符号,单位为 Hz
f_0	中心频率,单位为 Hz
i	电流通用符号,单位为 A
u, v	电压通用符号,单位为 V
r	器件内部的等效电阻,单位为 Ω
B	系统频带宽度,单位为 Hz
C	电容的通用符号,单位为 F
E	数学期望运算符
G	电导的通用符号,单位为 S
I	电流的有效值,单位为 A
L	电感的通用符号,单位为 H
M	互感的通用符号,单位为 H
P	功率的通用符号,单位为 W
R	电阻或等效电阻,单位为 Ω
R_i	电路的输入电阻,单位为 Ω
R_o	电路的输出电阻,单位为 Ω
R_L	负载电阻,单位为 Ω
R_s	信号源内阻,单位为 Ω
U, V	电压的有效值,单位为 V
T	热力学温度,单位为 K
I_{dc}	平均直流电流,单位为 A
X	电抗的通用符号,单位为 Ω
Z	阻抗的通用符号,单位为 Ω
ω	角频率通用符号,单位为 rad/s

2. 线性系统符号

$A(t)$	幅度函数
$\varphi(t)$	相位函数
$G(\omega)$	幅频特性函数
$\varphi(\omega)$	相频特性函数
$h(t)$	冲激响应函数
$H(j\omega)$	频率响应函数

$H(s)$	传递函数
$H(z^{-1})$	离散传递函数

3. 随机噪声符号

e_n	噪声电压
i_n	噪声电流
$\overline{e_n^2}$	噪声电压的均方值
$\overline{i_n^2}$	噪声电流的均方值
E_n	噪声电压的有效值, $E_n = \sqrt{e_n^2}$
I_n	噪声电流的有效值, $I_n = \sqrt{i_n^2}$
e_N	噪声电压的平方根谱密度,单位为 $V/\sqrt{\text{Hz}}$
i_N	噪声电流的平方根谱密度,单位为 $A/\sqrt{\text{Hz}}$
e_t	热噪声电压
i_t	热噪声电流
e_{sh}	散弹噪声电压
i_{sh}	散弹噪声电流
e_f	1/f 噪声电压
i_f	1/f 噪声电流
F	噪声系数(noise factor)
NF	噪声因数(noise figure),单位为 dB
SNR	信噪比
$SNIR$	信噪改善比
B_e	等效噪声带宽
Δf	窄带宽度
$p(x)$	x 的概率密度函数
μ_x	x 的均值
σ_x^2	x 的方差
σ_x	x 的标准差
$\overline{x^2}$	x 的均方值
$C_x(\tau)$	x 的自协方差函数

$C_{xy}(\tau)$	x 和 y 的互协方差函数
$R_x(\tau)$	x 的自相关函数
$R_{xy}(\tau)$	x 和 y 的互相关函数
$S(f)$	噪声的功率谱密度函数
$S_e(f)$	噪声电压的功率谱密度函数
$S_i(f)$	噪声电流的功率谱密度函数
$S_x(f)$	x 的功率谱密度函数
$S_{xy}(\omega)$	x 和 y 的互功率谱密度函数
$\rho_x(\tau)$	x 的归一化自相关函数
$\rho_{xy}(\tau)$	x 和 y 的归一化互相关函数
$ J $	雅可比(Jacobi)行列式
4. 半导体器件参数符号	
b	基极
c	集电极
e	发射极
f_T	晶体管的特征频率, 即共射接法下电流放大倍数为 1 的频率, 单位为 Hz
g_m	跨导
$r_{bb'}$	基区体电阻
$r_{b'e}$	发射结的微变等效电阻
r_{ce}	共射接法下集电极之间的微变电阻
r_{ds}	场效应管漏源间的等效电阻
r_{on}	导通电阻
D	二极管, 场效应管的漏极
G	场效应管的栅极
S	场效应管的源极
I_D	二极管电流, 漏极电流
I_B	共射接法下的基极电流

I_C	共射接法下的集电极电流
I_E	共射接法下的发射极电流
α	共基接法下的电流放大倍数, $\alpha = \Delta I_C / \Delta I_E$
β	共射接法下的电流放大倍数, $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$

5. 其他符号

c	电磁辐射速度, $c = 2.998 \times 10^8$ m/s
h	普朗克(Planck)常数, $h = 6.62 \times 10^{-34}$ J · s
k	玻尔兹曼(Boltzmann)常数, $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J / K
q	电子电荷, $q = 1.602 \times 10^{-19}$ C
λ	波长, 单位为 m
ϵ	介质的介电常数
ϵ_0	自由空间的介电常数, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ pF/mm
ϵ_r	对自由空间的相对介电常数, $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$
μ	介质的导磁率
μ_0	自由空间的导磁率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m = $4\pi \times 10^{-4}$ μ H/mm
μ_r	对自由空间的相对导磁率, $\mu_r = \mu / \mu_0$
σ	介质的电导
σ_c	铜的电导, $\sigma_c = 5.82 \times 10^7$ S/m
σ_r	对铜的相对电导, $\sigma_r = \sigma / \sigma_c$
CMRR	共模抑制比

目 录

本书常用符号	XIII
第 1 章 微弱信号检测与随机噪声	1
1.1 微弱信号检测概述	1
1.2 常规小信号检测方法	3
1.2.1 滤波	3
1.2.2 调制放大与解调	3
1.2.3 零位法	5
1.2.4 反馈补偿法	7
1.3 随机噪声及其统计特征	8
1.3.1 随机噪声的概率密度函数	8
1.3.2 随机噪声的均值、方差和均方值	10
1.3.3 随机噪声的相关函数	11
1.3.4 随机噪声的功率谱密度函数	17
1.4 常见随机噪声	20
1.4.1 白噪声	20
1.4.2 限带白噪声	21
1.4.3 窄带噪声	21
1.5 随机噪声通过电路系统的响应	27
1.5.1 随机噪声通过线性系统的响应	27

1.5.2	非平稳随机噪声通过线性系统的响应	30
1.5.3	随机噪声通过非线性系统的响应	31
1.6	等效噪声带宽	35
1.6.1	等效噪声带宽的定义	35
1.6.2	等效噪声带宽的计算方法	36
第2章	放大器的噪声源和噪声特性	40
2.1	电子系统内部的固有噪声源	40
2.1.1	电阻的热噪声	41
2.1.2	PN结的散弹噪声	45
2.1.3	$1/f$ 噪声	47
2.1.4	爆裂噪声	48
2.2	放大器的噪声系数	49
2.2.1	噪声系数和噪声因数	49
2.2.2	级联放大器的噪声系数	51
2.3	放大器的噪声性能分析	53
2.3.1	放大器的噪声模型	53
2.3.2	放大器的噪声特性	55
2.4	二极管和双极型晶体管的噪声特性	60
2.4.1	半导体二极管的噪声模型	60
2.4.2	双极型晶体管的噪声模型	62
2.4.3	双极型晶体管的等效输入噪声	63
2.4.4	双极型晶体管的噪声因数频率分布	67
2.5	场效应管的噪声特性	71
2.5.1	场效应管的内部噪声源	71
2.5.2	场效应管的噪声等效电路与噪声特性	73
2.6	运算放大器的噪声特性	76
2.6.1	运算放大器的等效输入噪声模型	76
2.6.2	运算放大器的噪声性能计算	77
2.7	低噪声放大器设计	80
2.7.1	有源器件的选择	81
2.7.2	偏置电路与直流工作点选择	83
2.7.3	噪声匹配	86
2.7.4	反馈电路	92
2.7.5	高频低噪声放大器设计考虑	96

第 3 章 干扰噪声及其抑制	99
3.1 环境干扰噪声	100
3.1.1 干扰噪声源	100
3.1.2 干扰噪声的频谱分布	105
3.2 干扰耦合途径	106
3.2.1 传导耦合与公共阻抗耦合	106
3.2.2 电源耦合	107
3.2.3 电场耦合	109
3.2.4 磁场耦合	111
3.2.5 电磁辐射耦合	117
3.3 屏蔽	118
3.3.1 场传播与波阻抗	119
3.3.2 屏蔽层的吸收损耗	122
3.3.3 屏蔽层的反射损耗	123
3.3.4 屏蔽效果	125
3.4 屏蔽电缆的接地	130
3.4.1 电缆屏蔽层和芯线之间的耦合	130
3.4.2 电缆屏蔽层接地抑制电场耦合噪声	133
3.4.3 电缆屏蔽层接地抑制磁场耦合噪声	135
3.4.4 屏蔽层接地点的选择	139
3.5 电路接地	141
3.5.1 电路的接地方式	141
3.5.2 放大器输入信号回路接地	144
3.6 其他噪声抑制技术	149
3.6.1 隔离	149
3.6.2 纵向扼流变压器	150
3.6.3 信号线和电源线滤波	152
第 4 章 锁定放大	154
4.1 概述	154
4.1.1 锁定放大器中的频谱迁移	154
4.1.2 锁定放大器的工作原理	155
4.2 相敏检测	156
4.2.1 模拟乘法器型相敏检测器	156
4.2.2 电子开关型相敏检测器	166

4.3	锁定放大器的组成与部件	170
4.3.1	锁定放大器的基本组成	170
4.3.2	正交矢量型锁定放大器	172
4.3.3	外差式锁定放大器	173
4.3.4	微机化数字式相敏检测器	174
4.4	旋转电容滤波及其在锁定放大器中的应用	177
4.4.1	旋转电容滤波器的工作原理	177
4.4.2	旋转电容滤波器的性能	180
4.4.3	基于旋转电容滤波器的同步外差锁定放大器	182
4.5	锁定放大器的性能指标与动态协调	186
4.5.1	锁定放大器的主要性能指标	187
4.5.2	动态范围与频率的关系	189
4.5.3	动态协调	190
4.6	锁定放大器应用	191
4.6.1	阻抗微小变化的测量	192
4.6.2	放大器噪声系数测量	194
4.6.3	其他应用	196
第5章	取样积分与数字式平均	199
5.1	取样积分的基本原理	200
5.1.1	线性门积分	200
5.1.2	指数式门积分	202
5.2	指数式门积分器分析	204
5.2.1	取样过程频域分析	204
5.2.2	指数式门积分器电路频域分析	206
5.2.3	指数式门积分器的输出特性	207
5.2.4	指数式门积分的信噪改善比	210
5.3	取样积分器的工作方式	210
5.3.1	定点工作方式	210
5.3.2	扫描工作方式	212
5.4	取样积分器的参数选择及应用	216
5.4.1	取样积分器的参数选择	216
5.4.2	基线取样与双通道取样积分器	219
5.4.3	多点取样积分器系统	222
5.4.4	取样积分器应用实例	223

5.5	数字式平均	226
5.5.1	数字式平均的原理及实现	227
5.5.2	数字式平均的信噪改善比	229
5.5.3	数字式平均的频域描述	231
5.5.4	数字式平均算法	233
第6章	相关检测	239
6.1	概述	239
6.2	相关函数的实际运算及误差分析	242
6.2.1	相关函数的实际运算	242
6.2.2	运算误差分析	243
6.3	相关函数算法及实现	245
6.3.1	递推算法	246
6.3.2	继电器式相关算法	248
6.3.3	极性相关算法	251
6.3.4	其他相关算法	253
6.4	相关函数峰点跟踪	254
6.5	相关检测应用	257
6.5.1	噪声中信号的恢复	257
6.5.2	延时测量	264
6.5.3	泄漏检测	266
6.5.4	运动速度及流速测量	268
6.5.5	系统辨识	275
第7章	自适应噪声抵消	280
7.1	自适应噪声抵消原理	280
7.1.1	简述	280
7.1.2	自适应噪声抵消原理	282
7.1.3	自适应 FIR 维纳滤波器	284
7.2	最陡下降法	286
7.2.1	最陡下降法的递推公式	286
7.2.2	最陡下降法的性能分析	288
7.3	最小均方算法	292
7.3.1	最小均方算法的原理	293
7.3.2	最小均方算法的性能分析	294

7.4 其他自适应算法	301
7.4.1 归一化最小均方算法	301
7.4.2 最小均方符号算法	302
7.5 自适应滤波器应用	305
7.5.1 消除心电图的工频干扰	305
7.5.2 胎儿心电图检测	307
7.5.3 涡街流量检测中机械振动噪声的抑制	308
7.5.4 窄带信号和宽带信号的分离	309
7.5.5 自适应回声抵消	311
附录 A 常用常数	314
附录 B 线性二端口网络的噪声模型	316
参考文献	318

第 1 章

微弱信号检测与随机噪声

1.1 微弱信号检测概述

“微弱信号”不仅意味着信号的幅度很小,而且主要指的是被噪声淹没的信号,“微弱”是相对于噪声而言的。为了检测被背景噪声覆盖着的微弱信号,人们进行了长期的研究工作,分析噪声产生的原因和规律,研究被测信号的特点、相关性以及噪声的统计特性,以寻找出从背景噪声中检测出有用信号的方法。

微弱信号检测技术的首要任务是提高信噪比,这就需要采用电子学、信息论、计算机和物理学的方法,以便从强噪声中检测出有用的微弱信号,从而满足现代科学研究和技术发展的需要。微弱信号检测技术不同于一般的检测技术,它注重的不是传感器的物理模型和传感原理、相应的信号转换电路和仪表实现方法,而是如何抑制噪声和提高信噪比,因此可以说,微弱信号检测是一门专门抑制噪声的技术。

对于各种微弱的被测量,例如弱光、弱磁、弱声、小位移、小电容、微流量、微压力、微振动、微温差等,一般都是通过相应的传感器将其转换为微电流或低电压,再经放大器放大其幅度以期指示被测量的大小。但是,由于被测量的信号微弱,传感器的本底噪声、放大电路及测量仪器的固有噪声以及外界的干扰噪声往往比有用信号的幅度大得多,放大被测信号的过程同时也放大了噪声,而且必然还会附加一些额外的噪声,例如放大器的内部固有噪声和各种外部干扰的影响,因此只靠放大是不能把微弱信号检测出来的。只有在有效地抑制噪声的条件下增大微弱信号的幅度,才能提取出有用信号。为了达到这样的目的,必须研究微弱信号检测的理论、方法和设备。

为了表征噪声对信号的覆盖程度,人们引入了信噪比 SNR 的概念,信噪比指的是信号的有效值 S 与噪声的有效值 N 之比,即

$$SNR = S/N \quad (1-1)$$

信噪比可以是电压比值,一般表示为 SNR_V ;也可以是功率比值,一般表示为 SNR_P 。微弱信号检测的关键是提高信噪比。评价一种微弱信号检测方法的优劣,经常采用两种指标:一种是信噪改善比 $SNIR$ (signal noise improvement ratio),另一种是有效的检测分辨率。信噪改善比定义为

$$SNIR = \frac{SNR_o}{SNR_i} \quad (1-2)$$

式中, SNR_o 是系统输出端的信噪比, SNR_i 是系统输入端的信噪比。 $SNIR$ 越大,表明系统抑制噪声的能力越强。

微弱信号检测的另一个指标是检测分辨率,它的定义是检测仪器示值可以响应与分辨的最小输入量的变化值。检测分辨率不同于检测灵敏度,后者定义为输出变化量 Δy 与引起 Δy 的输入变化量 Δx 之比,即灵敏度等于 $\Delta y/\Delta x$ 。也就是说,灵敏度表示的是检测系统标定曲线的斜率。一般情况下,灵敏度越高,分辨率越好。但是,提高系统的放大倍数可以提高灵敏度,但却不一定能提高分辨率,因为分辨率要受噪声和误差的制约。

表 1-1 对比了常规检测仪器与微弱信号检测方法所能达到的最高分辨率和 $SNIR$,表中的最后一行是专门从事微弱信号检测仪器生产的吉时利(Keithley)公司的产品近年能够达到的指标。从这些指标中可以看出微弱信号检测技术发展的大致水平。

表 1-1 检测的最高分辨率

检测方法	检 测 量					
	电压/nV	电流/nA	温度/K	电容/pF	微量分析/克分子	SNIR
常规检测方法	10^3	0.1	10^{-4}	0.1	10^{-5}	10
微弱信号检测方法	0.1	10^{-5}	5×10^{-7}	10^{-5}	10^{-8}	10^5
吉时利公司	10^{-3}	10^{-8}	10^{-6}			

自从 1962 年第一台锁相放大器问世的四十多年来,经过很多科学工作者的不懈努力,微弱信号检测技术得到了长足的发展,信噪改善比 $SNIR$ 得到不断提高。到 20 世纪 80 年代末,微弱信号检测的 $SNIR$ 可达 10^5 ,近年在一些专门检测领域(例如微弱电流) $SNIR$ 已能达到 10^7 ,从而推动了物理、化学、电化学、天文、生物、医学等学科的发展。目前,微弱信号检测的原理、方法和设备已经成为很多领域中进行现代科学研究不可缺少的手段,而未来科技的发展也必将对微弱信号检测技术提出更高的要求。