

展,成为一门新兴的分支学科。美国还计划为了探测宇宙X射线发射更大的天文卫星,而英国、日本及西德也已经发射或计划发射X射线天文卫星。目前利用这些设备探测宇宙中光子能量的分辨率可优于1%。由谱线的强度可以相当精确地测定宇宙天体和星云的温度以及X射线光子丰度。

参 考 文 献

- [1] 许顺生, 物理, 8 (1979), 306.
 [2] U. Bonse, M. Hart, *Z. Physik*, 188 (1965), 154; 190 (1966), 455; 194 (1966), 1.
 [3] U. Bonse, W. Graeff, *X-Ray Optics*, Springer, Berlin (1977), p. 93.
 [4] S. C. Abrahams, J. B. Cohen, *Phys. Today*, 29-11 (1976), 39.
 [5] L. V. A Záróff (Ed.), *X-Ray Spectroscopy*, McGraw-Hill, New York (1974), p. 450.
 [6] M. Yoshimatsu, S. Kozaki, *X-Ray Optics*, Springer, Berlin (1977), p. 9.
 [7] E. E. Koch, C. Kunz, E. W. Weiner, *Optik*, 45 (1976), 395.
 [8] B. K. Tanner, *Prog. Cryst. Growth Charact.*, 1 (1977), 23.
 [9] C. J. Sparks, Jr., *Phys. Today*, 34-5 (1981), 40.
 [10] J. W. Jack, T. Smith, *J. Phys. E*, 6 (1973), 162.
 [11] A. C. Mitchell, Q. Johnson, L. Erans, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 16, Plenum, New York (1973), p. 242.
 [12] G. Chaplin, L. Wood, *Phys. Today*, 28-6 (1975), 40.
 [13] 卢仁祥, 物理, 10 (1981), 91.
 [14] 王天泽, 物理, 7 (1978), 210.
 [15] C. J. Borkowski, M. K. Kopp, *Rev. Sci. Instrum.*, 39 (1968), 1515.
 [16] S. K. Byram, Bui Han, G. B. Rothbart, R. N. Samdakt, R. A. Sparks, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 20, Plenum, New York (1977), p. 529.
 [17] A. Gabriel, *Rev. Sci. Instrum.*, 48 (1977), 1303.
 [18] C. Cork, et al., *Acta. Cryst. A*, 31 (1975), 702.
 [19] E. S. Meieran, *J. Electrochem. Soc.*, 118 (1971), 619.
 [20] R. E. Green, Jr., *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 20, Plenum, New York (1977), p. 221.
 [21] G. Van Trump, Jr., P. L. Hauff, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 20, Plenum, New York (1977), p. 103.
 [22] P. F. Dismore, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 20, Plenum, New York (1977), p. 113.
 [23] W. Swindell, H. H. Barrett, *Phys. Today*, 30-12 (1977), 32.
 [24] *Phys. Today*, 32-12 (1979), 19.
 [25] J. B. MacCormack, B. K. Tanner, *J. Appl. Cryst.*, 11 (1978), 40.
 [26] J. Gastaldi, C. Jourdan, *Phys. Stat. Sol. (a)*, 52 (1979), 139.
 [27] H. B. Stuhmann, *Quart. Rev. Biophys.*, 11 (1978), 71.
 [28] K. Huang (黄 昆) *Proc. Roy. Soc. Lond. A*, 190 (1947), 102.
 [29] J. R. Schneider, *Characterization of Crystal Growth Defects by X-Ray Methods* (Eds. B. K. Tanner and D. K. Bowen), Plenum, New York (1981), p. 186.
 [30] P. M. Platzman, N. Tzoar, *Compton Scattering*, McGraw-Hill, New York (1977), p. 28.
 [31] D. G. Kanhere, H. M. Singru, R. Harthoorn, *Phys. Stat. Sol. (b)*, 105 (1981), 485.
 [32] E. Spiller, F. Feder, *X-Ray Optics*, Springer, Berlin (1977), p. 35.
 [33] H. J. Smith, D. M. Flander, *Japan. J. Appl. Phys. Suppl.* 16-1 (1977), 61.
 [34] P. A. Lee et al., *Rev. Mod. Phys.*, 53 (1981), 769.
 [35] R. L. Park et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 41 (1970), 1810.
 [36] R. L. Park, *Surface Sci.*, 48 (1975), 80.
 [37] H. Friedman, *Adv. X-Ray Anal.*, Vol. 13, Plenum, New York, p. 289.

微弱信号检测的意义、内容及进展

陈 佳 圭

(中国科学院物理研究所)

一、前 言

科学技术发展到现阶段,极端条件下的物理实验已成为深化认识自然的重要手段。这些

物理

现象的精密测量以及物质的微观结构与弱相互作用的研究,不仅促进了自然科学的发展,也为国民经济和国防建设创造了有利条件,引起重大的革新。

对于众多的弱物理量(如弱光、小位移、微

温差、小电容、微电导、弱磁、弱声及微振动等), 由于电子技术的发展, 一般均通过各种传感器作非电量转换, 使检测对象变成电量。但由于弱物理量本身的涨落、传感器的本底与测量仪器噪声的影响, 表现的总效果是有用信号被噪声所淹没, 使测量受到每一发展阶段的绝对限制。这些噪声来自两个方面, 一是来自测量系统的内部, 诸如热运动产生的白噪声、载流子的复合与再生、p-n 结的散粒噪声、电子倍增噪声、表面态引起的闪烁噪声以及光的量子噪声等。二是来自系统的外部, 例如市电干扰、温度涨落、机械震动、电磁感应与辐射以及宇宙线等天体噪声等。这些噪声都有一定的频谱特性与量级, 按传统概念, 噪声就是测量的极限。

自从 1928 年 Johnson 对热骚动电子运动产生的噪声进行研究以来, 大量科学工作者对信号检测作出了重要贡献, 尤其是近三十年来, 更加取得了突飞猛进的进步, 测量的极限不断低于噪声的量级。例如 1962 年第一台锁相放大器问世, 使检测信噪比提高到 10^3 , 1968 年从大量二次电子中测得 Auger 电子, 到七十年代后期, 检测信噪比提高到 10^6 , 即平均每 4—5 年测量极限低于噪声限制近一个数量级。因此, 过去视为不可测量的微观现象或弱相互作用。现在已成为可能, 这就大大地推动了物理学和其他科学的发展。

微弱信号检测的目的乃是利用电子学的、信息论的和物理学的方法, 分析噪声产生的原因和规律, 研究被测信号的特点与相干性, 检测被背景噪声覆盖的弱信号, 它的任务是发展弱检测的理论, 探索新的方法和原理; 研制新的检测设备以及在各学科中的推广应用。

二、相干检测

相干检测是一种相关接收, 它是一个积分过程:

$$\int_0^{t'} [S(t) + N(t)] \varphi(t) dt,$$

其中 $\varphi(t)$ 是一个取决于接收方法的加权函数。

若 $\varphi(t) = S(t - \tau) + N(t - \tau)$, 即 $\varphi(t)$ 为经过延迟后的输入函数时, 则是自相关。对于频域信号 (例如正弦信号) 的处理, 经过延迟后的输入函数在这里就意味着固定频率, 并具有一定相位差的参考信号, 因此锁相放大是自相关的一个特例与变通形式。加权函数 $\varphi(t)$ 中的 τ 是一常数, 在时域表示为固定延迟, 在频域测量则意味着相位的固定, 由于噪声的随机特性, 锁相放大完成了相位的锁定。

传统的频域抑制噪声的检测方法是带通滤波, 籍以滤除带通以外的噪声, 但这有很多的缺点。锁相放大则是通过频谱的迁移, 利用低通滤波消除噪声, 达到较之带通滤波更窄的带宽。一般来说, 带通滤波的 Q 值为 10—100, 而锁相放大器的等效 Q 值可达 10^8 , 噪声几乎抑制殆尽。

锁相放大器是以 50 年代发展起来的相敏检波器 (PSD) 为基础的, PSD 实际上是一个模拟乘法器, 被测量的信号通过 PSD 获得频谱的迁移, 当参考信号与被测信号频率相同时, PSD 的输出是和频项 $2f_0$ 与差频项的直流成分, 说明由原来以中心频率为 f_0 的频谱。通过 PSD 转换成中心频率为 0 与 $2f_0$ 的相同频谱。从而使后续低通滤波器 (LPF) 保留与信号成比例的 DC 成分而将噪声滤除。锁相放大器包括信号通道与参考通道两个部分, 在 PSD 之前必须利用带通滤波对噪声作初步预处理, 降低 PSD 的过载电平, 参考通道提供频率与信号相同的, 可任意相移的对称方波, 前置放大器应根据测量信号的频率范围与源阻抗加以认真选择, 使附加噪声降至最小。

自从 1962 年第一台锁相放大器问世以后, 提高性能的研究工作未曾间断, 并不断取得新的进展, 归纳言之。研究的目的是根据需要克服其缺点, 以达到功能的尽量完善。

锁相放大的主要问题有三:

1. 改善过载能力

我们的目的是要检测噪声掩盖下的弱信号, 检测灵敏度越高, 相对噪声对 PSD 的输入量级也愈高, 如果噪声本身就使锁相放大处于

过载工作状态,即出现非线性,检测也就失去意义。所以提高过载能力是提高检测灵敏度和提高允许输入噪声量级的关键,衡量过载能力的参数是放大器的动态储备的大小,解决此问题的最有效的方法是利用附加的由 N 通道正交滤波器构成的交流 PSD 进行预处理,然后再用常规的直流 PSD 进行检测。这种旋转电容的 PSD 是国外一项专利技术。国内已研制成功并应用于 FS-2 型锁相放大器,另一种改善的方法是在信号通道中利用交叉带通及相适应的 PSD 抑制噪声。

2. 抑制谐波响应

参考信号是一方波,可作开关自相关处理,但会附带引入谐波响应。谐波响应常不引起使用者的注意。但在强干扰的情况下将使测量产生极大的差错。谐波响应的产生是 PSD 为梳状滤波所致,它对信号的奇次谐波均有响应,尽管信号是单频的,但噪声的白的,对应于谐波频率相同的噪声均对输出作出贡献,克服谐波响应的方法目前主要是利用外差技术。一种是检测原频的双外差,一种是检测变换中频的单外差。还有一种解决谐波响应的方法是 Brookdeal 的专利技术——脉冲宽度调制系统,利用参考通道中参考信号正交部分的不同宽度变换,使 PSD 输出无谐波成分,这是比较彻底的手段,但由于线路复杂,应用并不普遍。

3. 降低检测信号的频率

这是现实测量提出的要求,尤其是激光技术和生物医学发展等要求测量重复频率低于 1Hz 的弱信号,解决这个问题目前只有借助于数字技术的数字锁相放大器,它将信号与噪声均转换为频率,频率与信号大小成比例,采用计数技术与数据处理进行测量,另一种则是用开关门的减法处理技术,这些方法国内外均在研究中。

综上所述,相干检测 20 多年来从原理与方法上并无新的突破,但其成就是很显著的,例如最低检测频率可达 0.1Hz,最高频率为 50MHz,灵敏度最高为 0.1nV (即增益为 200dB),最高动态储备为 110dB,漂移(最小可检测信号)为

物理

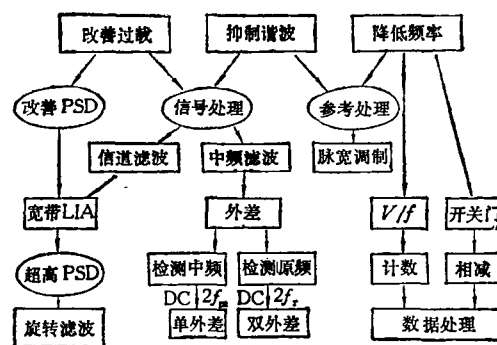


图1 相干检测的发展动向

10ppm/K,谐波抑制为 60dB。图 1 表示相干检测的发展过程与趋向。

相干检测的另一个重要课题是应用问题,所谓相干,是被测信号与另一信号(参考)存在一定的依附关系,但绝大部分的检测并不存在这种相干的关系,而需要人为地创造相干条件,常用的方法是调制技术,调制可以多种方式,如机械的斩波与振动,电驱动与电控制等电调制,形式多样,巧妙无穷,这方面作者已有专论,不再赘述。

需要附加说明的是,相干检测不仅用于锁相放大这一类通用设备,它已被应用于各种专用的仪器之中,如各种表面分析仪器,电化学设备,直流 nV 计,差热分析仪等等,对于若干无法进行相干的测量,也已有无参考的锁相系统问世,它利用压控振荡(VCO)的自跟踪捕获原理研究而成,为遥感,卫星、天文等方面的工作创造了有利条件,目前正处于方兴未艾的阶段。

三、取样平均

相干检测是频率域的窄带化处理方法,但若被测弱信号是一个用时间域描述的脉冲波形,这时用相干检测是不方便的,因为它必须完成时-频的相互变换,各自的参数没有明显的直观关系。

一种根据时域特征的取样平均来改善信噪比并恢复波形作永久记录的 Boxcar 积分器首先得到发展,对于任何重复的信号波形,在其出现

期间只取一个样本,并在固定的取样间隔内重复 m 次,由 \sqrt{m} 法则可知,信噪比改善 $SNIR = \sqrt{m}$ 。若将所描述的信号按时间顺序划分为 n 个间隔,将每个间隔的平均结果依次记录下来,便能使被噪声污染的信号波形得到恢复。 n 分得越细,恢复越准确,平均次数 m 越大, $SNIR$ 也越大,因此,当记录一个完整的波形时,共需信号重复 $n \times m$ 次,即 $SNIR$ 的获得是以长时间测量(牺牲时间)为代价的。

Boxcar 积分器的思想早在 50 年代就提出,但直到 1962 年才用电子线路予以实现。由慢扫描发生器控制的延迟电路完成逐次移动的取样间隔,在门宽的范围内积累平均以达到信噪比的改善。图 2(a) 表示一个 100kHz 的方波,正弦波,三角波被白噪声所污染的照片,通过国产 BJ-1 Boxcar 积分器的记录仪记录,其 $SNIR = 300$ 。见图 2(b)。此仪器可恢复频率

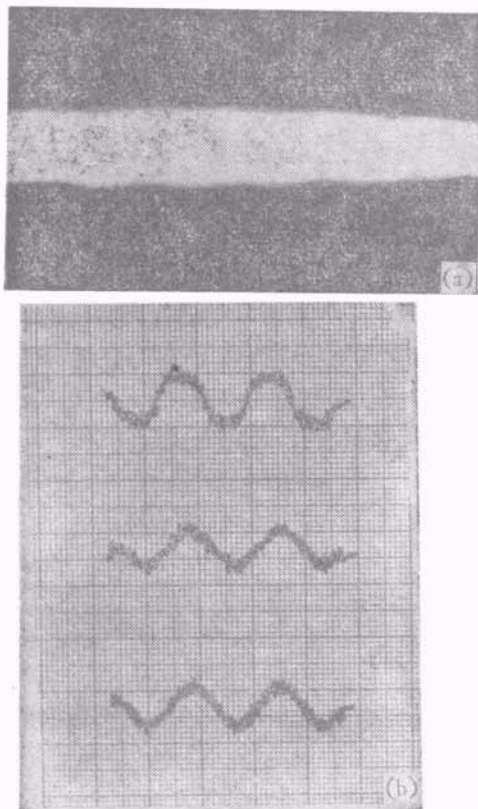


图 2 BJ-1 Boxcar 积分器的波形恢复
(参数: $f = 100\text{kHz}$; $T_B = 50\mu\text{s}$; $T_g = 20\text{ns}$, $T_s = 100\mu\text{s}$, $T_c = 1\text{ms}$, $V_s = 35\text{mV}$, $V_N = 3\text{V}$, $SNIR \approx 300$)

自 1Hz 至 1MHz 的任何波形。

Boxcar 积分器的使用较麻烦,它有三组参数可供使用,一是根据取样原理的设计参数,二是仪器面板的仪器参数,三是表征信号特点的信号参数。我们在考虑到高频分量的线性恢复程度、时间分辨率和积分器的漂移的基础上,总结并统一于计算图表,并为实验所证实,解决了参数的合理选择。

Boxcar 积分器的缺点是取样效率低,不能充分利用信号波形,其次是不利于低重复频率的信号恢复,从而限制了它的使用。近年来,随着微型计算机的普及,在 Boxcar 积分器的基础上发展了信号的多点数字平均器,平均器工作的特点是信号每出现一次,逐次取样很多点(如 $2^{10} = 1024$ 点),可最大限度地改善了信噪比或节约了时间。

伴有噪声的信号为 $f(t) = S(t) + N(t)$,每隔 T 秒后总取样一次,对第 i 个取样点(相对信号的位置是固定的)的第 k 次取样值为

$$f(t_k + iT) = S(t_k + iT) + N(t_k + iT).$$

将此值经 A-D 转换后存贮到各取样点对应的存贮地址。经 mT 秒后,总取样数为 m ,对 i 点言,共作了 m 次平均,若平均方式是简单的线性累加平均,则 i 地址上的存贮总值为

$$\sum_{k=1}^m f(t_k + iT) = \sum_{k=1}^m S(t_k + iT) + \sum_{k=1}^m N(t_k + iT).$$

因此,对信号的输出是输入信号幅度的 m 倍,而噪声是随机的,其有效值为 \sqrt{m} 倍,平均后的 $SNIR = \sqrt{m}$ 。

线性方式的平均虽可获得良好的响应,但对信号的恢复记录和显示很不方便,因为它不能一开始就获得稳定的恒幅的输出波形。因此提出另一种归一化的平均方式,即输出就是信号的均值而不是总值,同样对应于 i 点,归一化的平均结果为

$$M_m^i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m f(t_k + iT)$$

$$= M_{m-1}^i + \frac{f(t_m + iT) - M_{m-1}^i}{m}$$

即每扫描一次,就用新的扫描数去除一次,要实现快速地用不断增加的 m 去除,需要大量的硬件,线路上实现困难,近似的方法是

$$M_m^i = M_{m-1}^i + \frac{f(t_m + iT) - M_{m-1}^i}{2^j}$$

$$2^{j-1} = m < 2^j + 1.$$

这里用 2^j 代替 m ,相当于二进制运算的位移,但当噪声很大时, m 选择要大, 2^j 与 m 的偏离亦增大. 计算证明,归一化平均的 $SNIR = 0.98 \sqrt{m} \approx \sqrt{m}$. 与线性平均基本相同.

但是,对缓慢变化的信号,归一化平均也是不利的,因为在长时间平均中,信号的变化削弱了平均效果,这种情况下最好采用指数平均的方式,即用一个固定的 x 值代替变化的 m 值,这时

$$M_m^i = M_{m-1}^i + \frac{f(t_m + iT) - M_{m-1}^i}{x}$$

$$= \frac{1}{x} \sum_{k=1}^m \left(\frac{x-1}{x} \right)^{m-k} f(t_k + iT),$$

当 x 较大时, $\left(\frac{x-1}{x} \right)^{m-k} \approx e^{-(m-k)/x}$, 表示引入了一个指数的加权平均. 其等效时常数 τ 为

$$\tau = \frac{tg}{-\ln(1 - 2^{-N})}$$

其中 tg 为取样门宽.

$$SNIR = \sqrt{2x} = \sqrt{2^{N+1}}.$$

上述三种平均方式各有优劣之处,线性平均响应快,指数平均则精度高,稳定性好,归一化平均显示清楚,其选择方式可在控制逻辑中根据需要实现. 简易的原理框图如图 3(a) 所示. 图 3(b) 是数字取样归一化平均的示意图.

目前国际上已将 Boxcar 与平均器结合起来,提供了更广泛的应用范围,最小取样门宽达 75ps,平均次数由 $2^4 - 2^{24}$,灵敏度为 0.1VFS. 另一方面,由于平均器的特殊应用,近年来发展十分迅速,例如 Lensen 用模拟技术完成 100 通道的多道平均. Srinivasan 在此基础上利用可以程控的取样周期,并控制通道数、扫描数的高速

物理

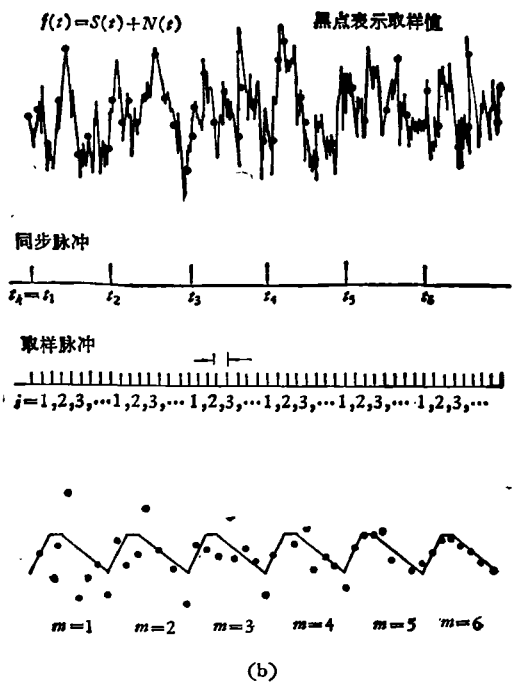
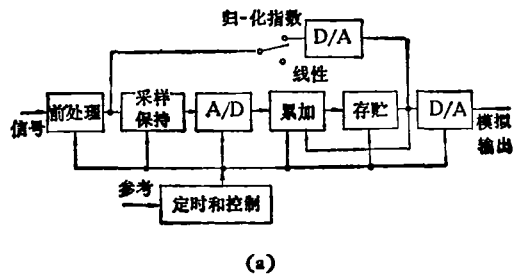


图 3 (a) 平均器的原理框图
(b) 归一化取样平均的示意图

$$\text{取样平均} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m f(t_k + iT)$$

数字指数平均器, Cooke 用硬件完成一个附件,联接 PAR162 + 164 后可测快速 (10—50ns), 低重复频率 (1—20Hz) 的信号. Neelakantan 的文章指出有效地进一步改善平均器的自相关估算的信噪比. Ironside 将重复脉冲系统加以瞬态数字化后用计算机平均. 瞬态记录仪的联用得到快速的取样周期,提高了实时工作速度. 凡此种种,不一而足.

平均的方法不仅用于测量信号幅度和恢复信号的波形,还可测量未知的时间间隔,不过积累的是计数脉冲数. 这是一种启示,平均将开拓

更多的方法,渗透更多的测量领域。

四、微弱光检测

可以说,几乎没有不发光的物质,因此弱光检测具有很大的意义。但大多数的弱光测量是相对的,即需要知道有多少输入的单色光被反射、透射、吸收、散射或以较长波长的荧光辐射。弱光检测由于信噪比的降低而与强光检测有所不同,因为当光的功率弱到一定程度时,光成为具有一定能量的光子组成的光子流。如光的功率为 10^{-17} W时,光子流为100光子/s。检测的主要方法首先要有一个光电传感器,让光子流射到一个足够大的表面上以收集全部光子,然后用离散信息的处理方式来测量光强,以获得信噪比的改善与长时间测量的稳定性。或者采用光斩波完成实时的背景扣除以及光源强度起伏的有效补偿。由此可见,弱光测量已摆脱传统的连续概念,进入计数与统计范畴。由于热电偶或热电池等检测器虽然输出与光子功率成比例,但在弱光的低功率辐射时,灵敏度很低,因此需要采用光电(发射、传导或电压的)传感器,例如光电倍增管(PMT)可以给出与光子速率成比例的输出,与光子能量无关,灵敏度与量子效率高,响应速度快以及渡越时间较小。这种PMT经过选择或特殊加工与降噪措施之后,才是理想的弱光传感器。它要求有一个明显的单光子——电子的响应峰(峰宽与打拿极增益的标准偏差成正比)。对PMT的高压偏置应选择计数速率出现坪区的开始,以便获得系统的长期稳定性。由于光子计数可以消除PMT的直流漏电流,以及测量数据可以与计算机兼容的优点,所以在弱光测量中得到了广泛的应用。

不论光子计数系统如何复杂,其基本原理框图如图4所示。当每个光子以足够的时间与其前后光子分开的话,每个光子最多只能激发一个电子,通过电子倍增给出一个脉冲,脉冲经过放大,进入脉冲高度甄别器。甄别器具有可调节的窗口(阈值),它只对落在阈值范围内的

光子峰(响应峰附近)的脉冲计数,籍以排除PMT的二次电子发射、光阴极热激发与表面泄漏电流引起的噪声,以及宇宙线、正离子反馈等高能粒子的干扰。图4的虚线部分表示利用光斩波实现(信号+背景)-背景=信号的自动背景扣除。例如,设计数时间为10秒,得到 A 为 10^6 , B 为 4.4×10^5 。被测信号($A - B$)为 5.6×10^5 。对于泊松统计,标准偏差为 $\sqrt{A+B} = 1.2 \times 10^5$ 。则其信噪比为 $(A-B)/\sqrt{A+B} = 467$,其测量精度则为 $1/SNR = 0.2\%$ 。

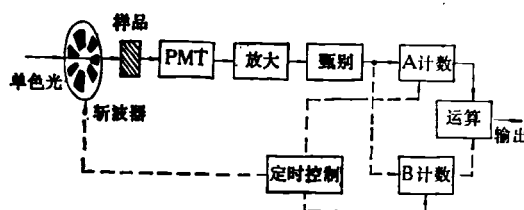


图4 光子计数器的基本原理与自动背景扣除

弱光检测的另一个主要方面是测量极短时间内引起的光的过渡变化,从而开拓了微微秒光谱学,利用它可以直接观测和研究物质中各种超高速现象。对于高速的振动或发光现象的探测,企图用长时间测量改善信噪比的方法是有困难的。若信号是重复的,则可利用类似于取样示波器的原理将信号在时域范围内展宽并加以平均。若信号只有一次,不再重复,而且时间极快,目前最有效的办法是采用象增强的变换存贮及处理。

重复信号的取样测光法乃是根据测量的具体要求而设计的实验装置,取样可在传感器的内部或外部,内部取样包括PMT的门控,变象管与光快门等,它的选择要针对实验的目的而定,如提高检测效率,降低噪声,阻抗匹配,瞬时极限偏差或避免饱和等。但这些方法并不是普适的,它仍然受到传感器本身的限制。外部取样则更为灵活。

由于光电图象检测器(OID)和电视检测(TVD)的日益成熟,迅速应用于多谱线的快速分析和时间分辨光谱的领域,发展了诸如光学多通道分析器(OMA)这样一类微光检测系统。TVD和OID包括超正析象管,分流直象管,

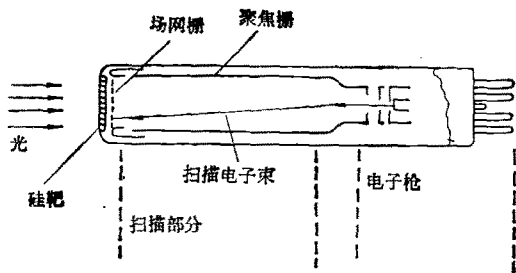


图5 硅靶摄像管的剖面示意图

硅靶、光导摄像，以及各种固体图象器。这些自扫描的光二极管阵列，CCD等都是多通道板光子检测器。它们能将光图象精确地转换成相应的电子图象。以硅靶摄像管为例，它是在硅片上制备了大量光电二极管阵列，当光子射到光电二极管上使二极管产生电子-空穴对，引起二极管上存储电荷的减少，光强与电荷的减少成比例。电子束在硅片的后表面扫描，目的是补偿电荷的损失，测量补偿电子束的电流与靶面位置的关系即可获得平面位置上的光强。图5表示硅靶摄像管的剖面示意图，它表达了靶的电子束扫描部分。硅靶摄像管还是一种初级形式，目前已发展了SIT管(硅加强靶)，它在靶前端部位增加一个图象加强级，使光子通过光纤面板打到光电阴极，形同PMT。在SIT前端再加一个增强级(P₂₀磷光体)，构成了增强型硅加强靶(ISIT)，由于两级增强均可加入聚焦电极，所以为检测快速弱光脉冲提供了方便。

在硅靶摄像管的基础上配备必要的控制电路，微型计算机与相应的软件构成了完整的OMA系统，简单的原理框图如图6所示。它是属于一种积分型光电检测器和弱信号检测技术相结合的典型实例，适应多种用途的不同需要。由于OMA系统是在多通道中同时采集信号，

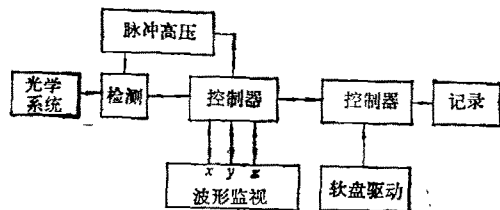


图6 OMA系统简易框图

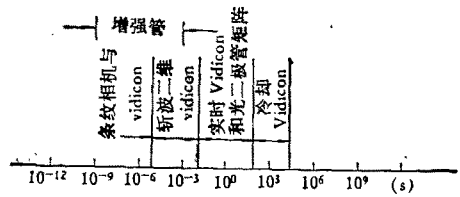


图7 OMA用于各种时域的光学现象研究

因此信噪比改善是 \sqrt{N} ，或对时间节约因子而言，则提高了 N 倍。 N 为通道数。OMA的另一个重要特点是可作超短脉冲的时间分辨测量。它能从秒到微微秒的不同时间过程中测定瞬态光谱，如图7所示。它为开展动力学研究提供良好的设备条件。

另一种图象变换器——微通道板(PCM)它是呈圆盘形连续打拿极的电子图象倍增器。将千万条微型放大器集成几何排列，每个放大器是直径为15 μ m的管(通道)，如同象增强器，可不破坏输入信号的空间信息而使弱象增强10⁴倍(80dB)，达到连个别光子都能检测的程度。不仅如此，在与适当的电子学与光学系统的配合下，还可将电磁波谱的近红外或紫外的二维信息转变为可见图象。由于PCM可作辐射输入的传感器，因此将给物理学与天文学的有关工作带来很有意义的进展。当然，PCM并不是十全十美的。它的动态范围远不够大，存在离子反馈，空间电荷密度限制了级流的增大，以及通道阵列的不连续影响效率的提高等，这些问题正在进一步解决中。

最后需要说明的是，虽然这里阐述的均是弱光检测，但用这些光信息的变换与数据处理系统，不仅可测光子，同样能测非光子形式的粒子流和高速脉冲序列。因此具有更为广泛的意义。

五、计算机处理方法

随着计算机的普及与发展，有些原来需要用硬件来完成的检测系统，可用软件来实现。因此被噪声掩盖的弱信号，利用计算机进行曲线拟合、平滑、数字滤波、快速富里叶变换(FFT)

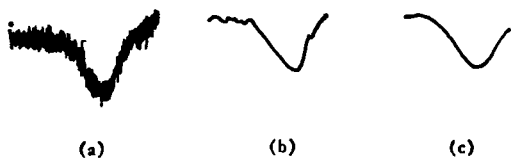


图8 远红外吸收谱的计算机平滑处理结果

及谱估计等方法处理,提高了信噪比。

一个确定的物理量,其测量值由于伴有随机变量的存在而有误差。当被测信号为确定值(或由经验所得的特殊形式)时,拟合的任务是寻求参数的最佳估计。或当函数关系为未知值时,拟合则由测量值确定函数关系,所以拟合实质上是数据的平滑,其中最小二乘式准则是拟合的有效方式。局部的平滑可视为分段拟合。

平滑的方法主要是消除高频噪声,对超低频噪声是无能为力的,需要采取平均。图8是用大型计算机对远红外吸收谱的平滑处理结果。(a)为原始数据,(b)为最佳处理,(c)为参数选择不当的过平滑处理。由于计算时间短,用 FORTRAN 语言只占容量 1—2K,可用小型机或微型机作实时处理,即 A-D 转换后组成逐次计算,25 点移动平均,每次平均的运算时间为 2ms,软件需 30 ms,故实时处理的最高数据率为 500Hz。利用数字滤波的平滑处理较之模拟的 RC 滤波更为优越。图9表示两者的处理信噪比改善相同,对 Gauss 波形的峰值误差比较,可见 RC 滤波的峰值误差大。

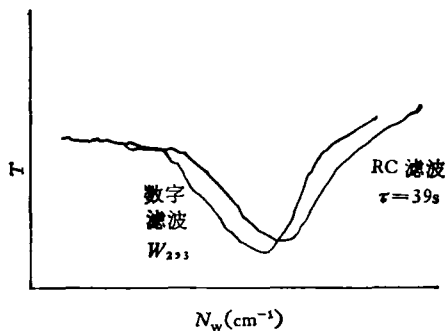


图9 信噪比改善相同的两种滤波器的比较

上述的方法是时域的直接处理,傅里叶(Fourier)变换则是时域变换成频域的处理方

法,对于这两种变换,信息量都不变。若函数 $f(t)$ 是周期性的,则频谱离散。若 $f(t)$ 是非周期性的,则取极限。时域和频域可互相表达,叫 Fourier 变换对,用符号表示为

$$F(\omega) \triangleq f(t).$$

为了适应于计算机计算,应将 Fourier 积分式改造为离散 Fourier 形式:

$$S(f_k) = \sum_{i=0}^N S(t_i) e^{-j2\pi f_k t_i} (t_{i+1} - t_i)$$

$$K = 0, 1, 2, \dots, N-1.$$

若 $S(t_i)$ 有 N 个数据,则需做 N^2 次乘法,特别是数据点较多时,计算时间加长。1965 年,Cooley-Tukey 发表了 FFT 算法,使计算时间正比于 $N \log_2 N$,大大提高了计算速度。

若被测信号是连续而无限的,则需对时间间隔 T 作逐点测量,也就是波形的取样问题,表示取样后的 Fourier 变换等于取样前两个函数的 Fourier 变换的卷积:

$$h(t) \Delta t \triangleq H(f) * \Delta f.$$

在满足取样定理的情况下,取样后的样本点的组合重构原来完全相同的连续波形。但不同取样将丢失或附加信息,故当取样的频谱出现混叠时,需选择更小的取样间隔,使卷积后消除混叠。

另一个问题是当 $h(t)$ 有无限多样本值,而计算机只能允许有限的取样时,则要对取样波形进行截断,仅取 N 个点。数字滤波器的本身也可看作是一种截断方式,不过需要注意泄漏现象,出现这种情况时,应改造截断函数或避开频谱的突跳。

FFT 具有多种功能,如瞬时记录、功率谱、线性谱、相位谱、平均、概率密度谱、三维谱、连续存储谱、频谱的微分和积分等,为弱信号检测提供了良好的信号处理工具。

除数字滤波和 FFT 以外,信号处理的第三种有效形式是对随机信号的最大熵谱估计。这是 Burg 将有限自相关函数按照最大熵的原理外推,从而得到一种新的非线性谱估计方法。这种方法最早用于地质学,现在推广至雷达技术。与微弱信号检测的结合将会开拓新的领域。

六、结 语

1. 微弱信号检测这一技术分支学科的发展,推动了物理学、化学、生物学的进步。例如当电子(离子或电磁波)与物质的交互作用,产生很多的信息与背景,这些信息表征了该物质的表面结构,组分、能量损失与吸收等特性,但这些信息可以是电子谱(二次电子、弹性散射、非弹性散射、背射电子等),X射线谱,也可以是阴极发光谱(荧光、磷光),也有诸如韧致辐射等背景。任何一种信息的检测都伴有噪声,而其他不被检测的信息对被检测信息而言,也是一种干扰背景。所有这些信息谱的测量都需要弱检测技术。因此,仅锁相放大器一项的使用范围就超过常规的示波器,成为实验室的基本设备。

2. 物理学的进展也促使检测水平的提高。首先,弱检测水平的每一个进步都与半导体器件的性能完善有关。另外,非电转换的传感器是弱检测技术的关键。这类光电、磁电、磁热、磁声、压电、磁光、电介质、放射性(X线→电子等)、化学、光阻等等的性能都与物理学有密切的关系。又如低温超导现象的利用,为低噪声检测器开辟了新的途径。如超导斩波放大器和SQUID等用于电压检测,灵敏度可提高 10^2 — 10^7 。同时低温条件也为降低噪声提供了良好环境,以利于低噪声因子的测量。

3. 弱信号检测在国际上发展十分迅速,很多研究所,高等学校的设想、方案与成果在有关的专业生产厂(公司)得到实现。如英国的

Reading 大学与 Brookdeal 公司在学术与技术上有密切的关系,该公司是在 Reading 大学的教授 Falkner 建议下于 1963 年成立的。美国 PAR 与 Princeton 大学有关系。法国的 TA 公司成立于 1960 年,Boalogne 技术中心直接给与了指导。日本的 NF 公司也是在噪声研究所的支持、帮助与指导下发展新的弱信号检测设备的,这充分说明了通过研究所、高校与工业企业的联合有可能不断研制新的设备。

国内的发展情况较国际上落后一个阶段,但作为一个分支学科,它已得到国内有关单位的重视和支持。1978 年中国物理学会庐山年会的总结中提出了它的重要性并建议加强学术交流。自 1979 年起,学术交流不断扩大,在国内已形成一支小的专业队伍。上述各种检测设备,有的已批量生产,有的正在研制,取得了可喜的成绩,应用范围也在不断扩大,希望通过我们的努力,逐步赶上世界先进水平。

参 考 文 献

- [1] 陈佳圭,物理,6-6(1977),335;7-1(1978),45;9-3(1980),236;11-5(1982),278.
- [2] 陈佳圭,仪器仪表学报 1-2(1980),108.
- [3] 陈一询,物理,8-2(1979),154.
- [4] 陈佳圭,中国仪器仪表学会第二届学术年会论文集,中国仪器仪表学会出版,(1982),398.
- [5] M. L. Meade, *J. Phys. E*, 15 (1982), 395.
- [6] Donald M. Munroe, PARC Seminar Notes, V. P. PAR, New Jersey.
- [7] J. C. L., Van Peppen, *Modern Electronic Measuring Systems*. Dleft University Press. (1978), 119.
- [8] C. R. Trimble, *Hewlett-Packard Journal*, May (1968), 2.
- [9] Y. Talmi, *Multichannel Image Detectors (ACS Symposium 102)*, 3, Washington, D. C. 1979.