

# 一个用微机实现的 Boxcar 积分器

谭日珊

(中山大学无线电电子学系)

## 一、问题的提出

在弱信号检测中,常常是通过取样来采集信号,依赖相关来消除噪声.沿用的 Boxcar 积分器就是这类检测的一种有力工具<sup>[1]</sup>.

我们知道,要无失真地恢复信号的频谱,取样脉冲应该满足取样定理的要求,且脉宽足够窄;而要有效地消除噪声,则必须注意到互相关函数的关系.

如果输入信号  $S(t)$  带有随机的背景噪声  $n(t)$ ,加权函数选用与  $S(t)$  同周期且脉宽为  $T_g$  的取样脉冲串来实现时,可以得出时不变系统的互相关函数如下:

$$\begin{aligned} R_{12}(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T \delta'(t) S(t + \tau) dt \\ &+ \frac{1}{T} \int_0^T \delta'(t) n(t + \tau) dt \\ &= \overline{S(T_g)} + \overline{n(T)}, \end{aligned} \quad (1)$$

这里  $\delta'(t)$  定义为

$$\int_0^T \delta'(t) dt = \begin{cases} 1 & \tau \leq t \leq \tau + T_g, \\ 0 & t < \tau, t > \tau + T_g. \end{cases}$$

显然(1)式第一项  $\overline{S(T_g)}$  是要采集的信号,它是信号中某  $\tau$  点在  $T_g$  内积分的平均值,随着  $\tau$  的改变,通过相关就可再现信号的波形.反映随机噪声的第二项  $\overline{n(T)}$  则是我们所不希望的.只要平均时间  $T$  足够长,这一项就趋于零.问题在于,对沿用的 Boxcar 积分器,如果平均时间过大就必然导致高频信号幅度难以建立.换句话说,消除噪声和恢复信号是有一定矛盾的.

## 二、Boxcar 的间断积分与取样平均

为了改善沿用的 Boxcar 积分器,有必要简单分析一下该电路的特点.其实这种积分器的核心只不过是取样门加低通滤波器<sup>[2]</sup>.电路引入取样门后,积分时间是不连续的,门闭合时间间隔为  $T_g$  时积分,门打开时间间隔为  $T_h$  时保持.对背景噪声带宽为  $0 \sim \omega_{\max}$  的信号,可以求得间断积分 Boxcar 积分器的输出和输入信噪比的比值为

$$\frac{(S/N)_{\text{out}}}{(S/N)_{\text{in}}} = \frac{2(T_g + T_h)}{\pi T_g} RC \omega_{\max}. \quad (2)$$

由上式不难看出,沿用 Boxcar 积分器正是通过取样门使低通滤波器的等效噪声带宽变窄.如果取样门常闭,即  $T_h = 0$  时,(2)式就退化为一般  $RC$  低通滤波电路的关系,相关检测性能就不存在了.(2)式还告诉我们,Boxcar 积分器信噪比的提高仍与噪声性质有关.在相同噪声功率的条件下,对宽带噪声的抑制是大于对窄带噪声的抑制的.这一点与 K. Neelakantan 等人<sup>[3]</sup>的工作结果是一致的.

这里必须注意到,(2)式是在假定输出信号幅度在间断积分过程中已达到峰值的条件下得出的.若近似取所需的充电时间为  $4RC$ ,则取样次数

$$N \approx 4RC/T_g. \quad (3)$$

也就是说,对一定的  $RC$  滤波电路,在一定的取样时间  $T_g$  下,必须选足够多的取样次数  $N$ ,才能在滤除噪声的同时,较好地恢复信号波形.当然,选取过大的  $N$  对信号的检测就没有什么作用了.若近似认为(3)式是取样次数的最佳值,将它代入(2)式,并改为电压形式,可得

$$\frac{(S/N)_{\text{out}}}{(S/N)_{\text{in}}} = \sqrt{N} \left( \frac{\omega_{\max}}{\omega_s} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

式中  $\omega_s = 2\pi/(T_g + T_h)$ .从(4)式的形式看来,信噪比的提高是遵循  $\sqrt{N}$  法则的,但必须指出,这个  $N$  是针对已定比值  $RC/T_g$  而选取的,比值  $RC/T_g$  一经确定,超过(3)式所确定的  $N$  值再去增加取样次数就没有意义了.用间断积分法消除噪声,归根到底还是因为采用了低通滤波器.所以,与其说是用增加  $N$  来提高信噪比,不如说是用增加  $N$  来建立快速变化信号的幅度.  $N$  的增加是为选用大的  $RC$  常数创造条件.

要进一步改善 Boxcar 积分器的性能,我们认为可用微型计算机技术,采用取样线性平均的方法,即把  $N$  个取样直接相加后再除以  $N$ .此时,取样平均值  $\bar{x}$  为<sup>[4]</sup>

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N F_1(t_j - \tau) F_2(t_j),$$

式中  $t_j$  的选择在本方法中是随信号的周期而定.由于噪声的取样不相关,其统计平均的方差将随样本容量的增大而迅速减小.因此,取样次数  $N$  的作用便由恢

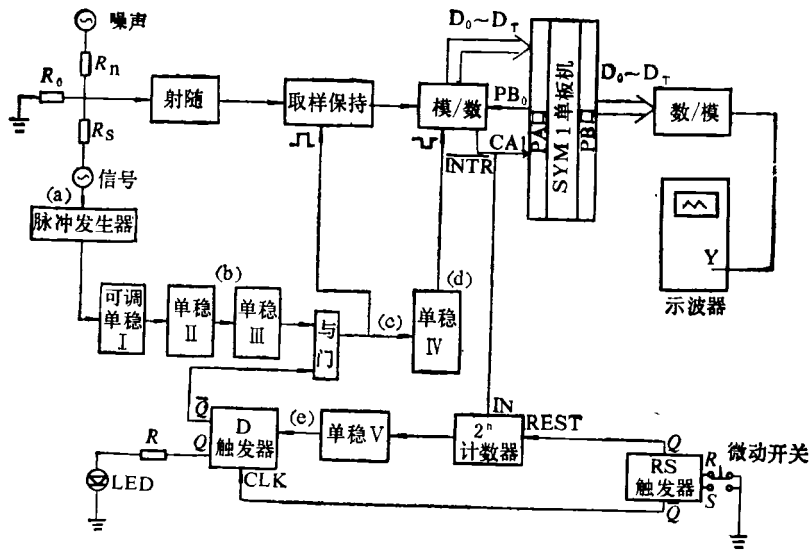


图 1

复信号波形转为克服背景噪声，并且此时的  $N$  是独立存在的。

我们知道，对具有噪声功率密度谱  $W_n(\omega)$  的信号，若参加积累样点间的噪声是独立的话，按概率论定理<sup>[3]</sup>可以求得输出输入信噪比的比值为

$$\frac{(S/N)_{out}}{(S/N)_{in}} = \left[ \frac{D(x)}{D(\bar{x})} \right]^{\frac{1}{2}} = \sqrt{N}, \quad (5)$$

式中  $D(\bar{x})$  是噪声统计平均的方差， $D(x)$  是输入信号的方差。这是使用取样线性平均法所得的提高信噪比的公式，即同步积累  $\sqrt{N}$  法则。

比较(4)式和(5)式，间断积分法对信噪比的改善能力劣于取样平均法，尤其是当信号频率较高而噪声带宽又较窄时，间断积分法的效果就较差。

### 三、实验结果

我们所用的取样平均法的具体做法是：依次对被测的波形上任一点重复取样  $N$  次，然后引入计算机作积累，平均和贮存之后，移至下一点重作上述过程，利用改变门延时的方法达到对整个波形的扫描。所用的实验电路如图 1 所示。相应的电路工作波形见图 2。

为了验证信噪比与平均次数的依赖关系，我们取平均次数分别为 2, 16, 128，输入信号幅度峰峰值为 0.5V，噪声<sup>[1]</sup> 幅度有效值为 5V，然后对输出进行测量。表 1 列出了实验结果及按(5)式计算的理论值。

考虑到实验所用的不是理想的噪声源和 A/D 转换器的非线性以及最低分辨率误差和平均过程的全项误差等情况，我们认为表 1 中的理论值和实验值是吻合的。从表 1 可以知道，样本容量越大，信噪比提高就越大。这是近似符合  $\sqrt{N}$  法则的。

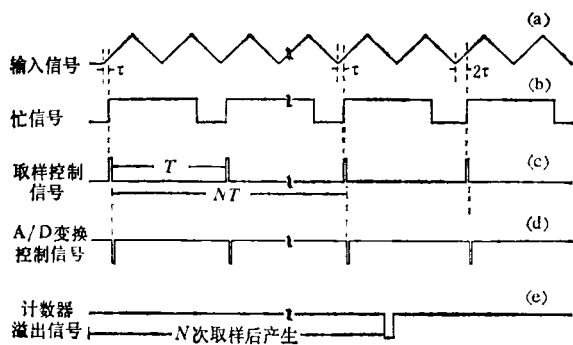


图 2

表 1

平均次数	输入 $S/N$	输出 $S/N$	
		理论值	实验值
2	0.1	0.14	0.15
16	0.1	0.40	0.39
128	0.1	1.13	1.14

应该注意到，上述实验实际上是通过样本对总体特性进行估计，即用取样平均值  $\bar{x}$  估计期望值  $E(x)$ 。为了知道  $\bar{x}$  与  $E(x)$  相差多少， $\bar{x}$  是否稳定，我们求解了期望  $E(x)$  的置信区间。实验表明，平均次数越多，误差就越小且稳定性越高。对容量为 128 的样本值，若置信度取 90%，则均值  $\bar{x}$  落在区间  $[0.39, 0.82]$  范围内。  
(下转第 391 页)

1) 因实验室条件所限，我们是以收音机调频噪声作为噪声源的。

## 第三届全国 X 射线衍射学术会议简讯

第三届全国 X 射线衍射学术会议于 1985 年 11 月 3—8 日在四川省成都市举行。出席这次会议的代表来自除西藏和台湾省外的全国所有各省、市、自治区和各系统的科研单位、大专院校和工矿企业的科技人员和教师共 329 人, 分属 215 个单位。

会议期间, 中国科学院上海冶金研究所许顺生同志作了《同步辐射 X 射线在科学技术上的应用》的报告, 中国科学院金属研究所林树智同志介绍了 1984 年 10 月在沈阳召开的《电子计算机在 X 射线衍射中的应用》学术会议的情况。会议共收到论文 310 篇, 印发了论文摘要汇编(其中九篇因收到较迟而未编入), 绝大部分在五个分会场进行了交流发言, 并进行了热烈的讨论。通过交流表明, 从上届会议以来的三年中, 在 X 射线衍射所涉及的各个领域, 如定性和定量相分析、结构和线形分析、应力测定在工农业中的应用、电子计算

机的应用、晶体缺陷的观测、非晶态结构分析、X 射线谱学和晶体结构测定等等, 在理论、技术和应用上都取得了不少具有先进水平的成果, 充分反映了我国 X 射线衍射工作者在促进国民经济建设和提高学术水平方面所作的努力。会议期间, 本溪射线仪器厂和日本理学电机株式会社的代表也分别介绍了他们在研制 X 射线衍射仪器方面的新进展。

1895 年 11 月 8 日是伦琴发现 X 射线的日子。在闭幕式上, 会议专门组织了一次纪念伦琴发现 X 射线九十周年的报告会, 许顺生同志作了《伟大科学家伦琴的一生及其划时代的发现——X 射线》的报告。

第四届全国 X 射线衍射学术会议初步预定 1988 年秋季在武汉地区举行, 委托武汉大学和湖北省物理学会 X 射线衍射专业委员会负责筹备。

(姜小龙 麦振洪)

## 中美联合“微弱信号检测”实验室将在中国科学院物理研究所建立

中国科学院物理研究所与美国 EG&G Princeton Applied Research (PARC) 于 1985 年 11 月在北京签订协议, 决定在中国科学院物理研究所建立中、美联合“微弱信号检测”实验室 (WSD Lab.)。

中国科学院物理研究所最早从事这方面的研究, 十多年来取得不少成果。PARC 研究和生产国际最先进的弱检仪器。双方曾有广泛联系与合作, 该实验室的建立将使这种合作更加巩固和加强。

WSD Lab. 由 PARC 提供各种弱检测仪器和设备, 作为展示、教学和研究之用。中国科学院物理研究所

负责管理, 其宗旨是为全国服务, 对外开放, 承担咨询、人员培训和合作研究。因此, 它将为国内有关部门提供充分利用的先进的实验条件。WSD Lab. 将定期举办全国性的培训班, 同时利用 PARC 的仪器设备提供实验条件, 结业后发给中、美联合实验室签署的英文证书。

PARC 的全部仪器正在陆续运到并验收, 实验室还在建设中, 局部已开始工作, 不久即可正式开放。

(陈佳圭)

(上接第 368 页)

在上述实验中, 我们未对较高频的信号进行检测。对高频信号检测要使用自动扫描才能容易将取样平均次数提高到  $2^7$  以上, 这会使信噪比得到进一步改善。关于这个问题, 我们将在另一文中加以讨论。

### 四、结 论

综合上述, 可得如下结论:

1. 在不相关的噪声情况下, 取样平均法对信噪比的改善取决于取样次数  $N$ , 而间断积分法则仍与噪声性质有关。

2. 对取样平均法,  $N$  的大小可按需要任意设定, 并且信噪比的提高近似符合  $\sqrt{N}$  法则, 而间断积分法, 则在  $N$  大于最佳值时就没有意义了。

3. 使用取样平均法, 不需象间断积分法那样要选取最佳  $N$  值, 因而调整方便, 容易实现。

本文承华南工学院欧阳景正教授审阅并提出宝贵意见, 作者谨志谢意。

### 参 考 文 献

- [1] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组, 物理, 6-6 (1977), 335; 7-1 (1978), 45; 8-2 (1979), 154.
- [2] J.D.W. Abernethy, Wireless World, Dec. (1970), 1.
- [3] K. Neelakantan and S Dattagupta, Pramana, 11-3 (1978), 295.
- [4] B. M. 奥利弗, J. M. 卡奇编, 张伦等译, 电子测量和仪器, 科学出版社, (1980), 55.
- [5] 陈家鼎等编, 概率统计讲义, 人民教育出版社, (1980), 152.