

托卡马克微波干涉信号的实时处理

郑少白 杨宜宗 刘铁群 崔滨生

(中国科学院物理研究所)

微波条纹移动干涉仪可用来测量等离子体电子密度及其分布,是一种相当有用的高温等离子体诊断工具^[1]。通常用干涉条纹的斑马图来直观地显示等离子体电子密度的变化,但它不能直接给出电子密度的值,因此无法用斑马图信号直接进行如密度反馈控制等物理实验。也无法将这信号经通用模数转换器用计算机采集和处理。为此有必要研制能把斑马图信号实时转化为密度值的直读式处理系统。

实验中发现,由于各种原因造成微波干涉信号具有无法用模拟实验可以获得的相当复杂的扰动结构。为此我们先设计了一个专用的计算机采集系统,这样不仅能采集斑马信号,搞清干涉信号的扰动结构,而且为设计实时处理系统提供逻辑思想和动态测试条件。在计算机处理实验数据的基础上,设计了实时处理系统,在实验中得到了满意的结果。

一、干涉信号的计算机采集和处理

干涉仪的微波源用锯齿波扫描信号来调制、产生,并输出一个频率周期性线性变化的微波束。它通过一个定向耦合器分成两路,主路作为探测波通过待测的等离子体,副路作为参考波通过可变衰减器和相移器,最后这两路波束再通过定向耦合器相混合,输出的合成波经检波,放大送至示波器显示。当主路中有等离子体时,随着电子密度的变化,使两臂固有相位差中叠加了附加的相位差的变化,从而使明暗干涉条纹的位置产生相应的移动。因此,只要把在每个锯齿周期里干涉信号出现时刻相对于锯齿波中某个基准时刻的时间差采集到,则通过对一固定频率时钟脉冲的计数,相

移的变化变成了脉冲数目的改变,这一数据即可存贮在读写存储器中。图1给出了APPLE-II微型机采集斑马图的采集系统。从采集到的结果可以看到,干涉条纹在移动过程中存在着相当复杂的扰动。表现在采集到的数相对于平均值的差可达 $\pm(1/4)$ 个条纹移动数,而且在相当多的锯齿波扫描周期内没有出现正常的干涉信号,即采集到的数大于采集门的满门值。一般情况下,把采集门的宽度调整得比两条静态干涉条纹之间的宽度要大些。

干涉数据的计算机模拟处理原则如下:

(1) 对应两条静态干涉条纹之间宽度的数称为满门值,记作 P 。每个周期内采集到的数记作 y ,数据平均处理后记作 \bar{Y} ,上次扫描周期内数的平均值记作 \bar{Y}_0 。由于干涉信号是以 2π 为周期重复出现的,因此对于

$$|y - \bar{Y}_0| < (1/2)P \quad (1)$$

的结果,我们认为是同一组干涉信号的正常相移结果。反之,我们认为这两个数据不是同一组的干涉信号,对此我们作如下的处理:

$$\begin{cases} Y = y - P & (y - \bar{Y}_0 \geq \frac{1}{2}P), \\ Y = y + P & (y - \bar{Y}_0 \leq -\frac{1}{2}P), \\ Y = y & (-\frac{1}{2}P < y - \bar{Y}_0 < \frac{1}{2}P). \end{cases} \quad (2)$$

(2) 正常的相移结果必须满足

$$y \leq P. \quad (3)$$

对于比 P 大的数据,不参与本次平均,并令

$$\bar{Y} = \bar{Y}_0. \quad (4)$$

(3) 由于存在扰动,采用滤波平均方法对数据进行适当处理:

$$\bar{Y} = \bar{Y}_0 + (Y - \bar{Y}_0)/N, \quad (5)$$

$$N = \tau/T, \quad (6)$$

其中 τ 为滤波时间常数, T 为锯齿波扫描周期。

(4) 由积累起来的 \bar{Y} 值决定条纹移动。当 \bar{Y} 增加 P 值时,条纹移动数增加1;当 \bar{Y} 值减少 P 值时,条纹移动数减少1。

图2给出了计算机把采集到的斑马信息转变为电子密度值的处理程序框图,此时令 $P = 16$ 。

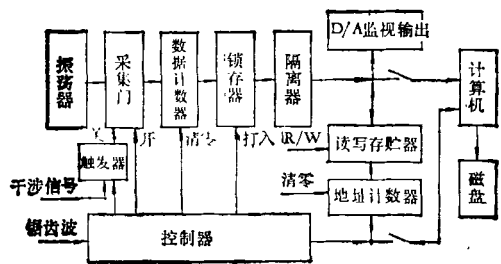


图1 计算机采集系统

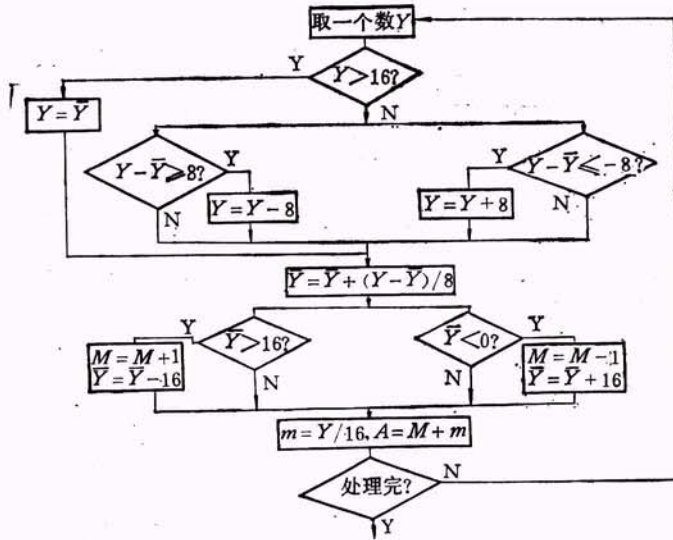


图2 计算机处理程序框图

二、干涉信号的实时处理线路

图2的处理程序可以在放电结束后给出满意的结果。根据这一处理原则,采用适当的组件来模拟计算机处理过程,可以在放电过程中,对干涉信号进行实时处理。为了数字处理电路的方便,我们选择 P 为16。这样把(2)式,(5)式结合起来,就有:

$$\bar{Y} = \bar{Y}_0 + (y - \bar{Y}_0 + \Delta)/N, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \Delta = -16 & (\text{当 } y - \bar{Y}_0 \geq 8), \\ \Delta = +16 & (\text{当 } y - \bar{Y}_0 \leq -8), \\ \Delta = 0 & (\text{当 } -8 < y - \bar{Y}_0 < 8). \end{cases} \quad (8)$$

按(7)式,我们采用加法器、数据锁存器、数模转换器等固体组件设计了干涉信号直读式实时处理线路。振荡器的频率连续可调,从而保证对不同静态干涉条纹, P 值总为16。此处理线路能给出的最大条纹移动数为32,最小分辨率为 $1/16$ 个条纹移动数。

图3给出了CT-6B托卡马克^[2]放电时的实验结果,它包括微波干涉仪给出的斑马图、等离子体电流波形和补充送气时压电晶体阀上的脉冲电压波形,以及实时处理线路给出的干涉条纹移动数(即等离子体平均电子密度波形)。放电时

$$\begin{cases} B_T = 0.9T, \\ f = 93\text{GHz}, \\ L = 20\text{cm}, \end{cases} \quad (9)$$

其中 B_T 为纵向磁场强度, f 为微波源工作频率, L 为等离子体弦长。干涉条纹每移动一条,对应等离子体电子密度变化为 $3.4 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ 。

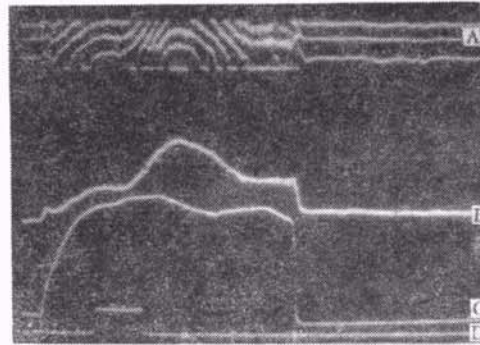


图3 斑马图和实时处理结果(时标为5ms/每格)
A—微波干涉斑马图($f = 93 \text{ GHz}$);
B—平均电子密度($1.7 \times 10^{13}/\text{cm}^3$ /每格);
C—等离子体电流(10 kA/每格);
D—PV-10 阀上电压(50 V/每格)

从图3可以看到处理线路给出了与斑马图一致的直读式结果。由于补充送气的结果,电子密度较高及变化较快时,干涉条纹会变得不清晰,此时处理线路也无法给出正确的电子密度变化曲线,并造成放电结束后波形有时不回零的缺点。

目前处理线路的实际响应时间优于 $200 \mu\text{s}$ 。

参 考 文 献

- [1] 项志遵等,高温等离子体诊断技术,上海科学技术出版社,(1982).
- [2] 物理研究所托卡马克实验组,科学通报, No. 8(1984), 459.