

一种处理等离子体密度的软件方法

齐娜¹, 王亚丽¹, 高翔², 罗家融^{2,3}

(1. 河南师范大学 计算机与信息技术学院, 河南 新乡 453007;

2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031;

3. 东华大学, 上海 200051)

摘要:介绍了一种软件计算远红外激光干涉仪相位差的方法。对比了软件程序与硬件相位计在 HT-7 实验中的处理结果, 总结了软件处理所得相位差的特征, 并在此基础上求出了真实的等离子体密度。最后, 对实验结果进行了细节分析、误差分析, 对软件处理时间进行了分析, 得出软件方法可以获得更好的时间分辨率且具有进行实时处理的可行性。

关键词:远红外干涉仪; 软件程序; 等离子体密度

中图分类号:TP311

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2007)10-0181-03

A Method of Software Program for Plasma Density Processing

QI Na¹, WANG Ya-li¹, GAO Xiang², LUO Jia-rong^{2,3}

(1. College of Computer and Information Science, Henan Normal University, Xinxian 453007, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

3. Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: A software method for computing the phase difference of FIR interferometer was presented in this article. Compared the experimental results processed by software program and the one processed by hardware phasemeter in the HT-7 tokamak, and summarized the characteristics of the phase difference calculated by software, and then derived the true plasma density. In the end, done the detail analysis and error analysis of the experimental results and analyzed the processed time of software program, and concluded that software method has a better temporal resolution, has the feasibility of real time processing.

Key words: FIR interferometer; software program; plasma density

0 引言

电子密度是核聚变等离子体的重要参数之一。随着高温等离子体物理和诊断研究的不断深入, 远红外激光诊断及其相关技术的进一步发展, 在 TOKAMAK 和其它一些聚变装置的诊断中, 用远红外激光干涉仪测量等离子体电子密度时空分布已成为一种常规而不可缺少的重要手段。HT-7 超导托卡马克装置上的密度测量采用五道 HCN 激光干涉仪^[1~3]。远红外激光干涉仪测量密度的原理是: 探测光束通过等离子体产生相移, 参考光束不通过等离子体, 两道信号由 TGS 热释电探测器分别接收, 两者的相位差就是被测物理量, 它与线电子密度成正比^[2,4]。目前, 国内外此

类干涉仪都用模拟或数字电路的相位计过零比较信号的相位差。文中采用了一种软件方法, 与硬件相位计相比, 该方法提高了密度信号的时间分辨率。

1 软件计算相位差原理

探测器测到的信号记为 $p(t) = P \sin[\omega t - \varphi(t)]$, P 是信号振幅, ω 是转动光栅产生的多普勒频移, $\varphi(t)$ 是相移函数即被求物理量。在周期 $(-T/2 + t_0, T/2 + t_0)$ 中把 $\varphi(t)$ 泰勒展开:

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_1(t - t_0) + \frac{1}{2}\varphi_2(t - t_0)^2 + R(t) \quad (1)$$

对大量实验数据进行分析, 得到 $|\varphi_1| \leq 600$, $|\varphi_2| \leq 2 \times 10^8$ 。当 $T = 10^{-4}$ s 时, 估算的余项 $|R(t)| \leq 3 \times 10^{-7}$, 它与试验误差比是小量, 可略去。对 $p(t)$ 作积分变换, 令

$$A = \int_{-\frac{T}{2}+t_0}^{\frac{T}{2}+t_0} p(t) \sin[\omega(t - t_0)] dt \quad (2)$$

收稿日期: 2006-12-30

基金项目: 河南师范大学新引进硕士科研启动项目(052211)

作者简介: 齐娜(1979-), 女, 河南南阳人, 硕士研究生, 研究方向为数据处理; 高翔, 研究员, 博导, 研究方向为等离子体边界测量; 罗家融, 研究员, 博导, 研究方向为数据采集、计算机控制。

将 $p(t)$ 表达式和式(1)代入式(2),并令

$$\omega_1 = \omega - \psi_1, \Phi_0 = \omega t_0 - \varphi_0 \quad (3)$$

则式(2)可化简为:

$$A \approx P \cos \Phi_0 \cos\left(\frac{\psi_2}{8} T^2\right) \frac{2\omega}{\psi_1(\omega_1 + \omega)} \sin \frac{\psi_1 T}{2} \quad (4)$$

同理定义

$$B = \int_{-\frac{T}{2}+t_0}^{\frac{T}{2}+t_0} p(t) \cos[\omega(t-t_0)] dt \quad (5)$$

$$B \approx P \sin \Phi_0 \cos\left(\frac{\psi_2}{8} T^2\right) \frac{2(\omega - \psi_1)}{\psi_1(\omega_1 + \omega)} \sin \frac{\psi_1 T}{2} \quad (6)$$

在式(4),(6)近似处理中,取 $T = 10^{-4} \text{s}$, $\omega = 2\pi/T$, $|\psi_1| = 600$, $|\psi_2| = 2 \times 10^8$,作计算,略去了小量。

由式(4)和式(6)相除,则

$$B/A \approx \operatorname{tg} \Phi_0 [(\omega - \psi_1)/\omega] = \operatorname{tg} \Phi_0 (1 - \frac{\psi_1}{\omega}) \quad (7)$$

取 $1 - \frac{\psi_1}{\omega} \approx 1$ ($\frac{\psi_1}{\omega}$ 对数值计算精度的影响较小)

$$\Phi_0 \approx \operatorname{arctg} \frac{B}{A} \quad (8)$$

最后由式(3) $\varphi_0 = \omega t_0 - \Phi_0$,得到信号在每个时刻的相位,进而求出探测信号与参考信号的相位差。

2 密度处理

图1的两个分支分别代表软硬件处理密度的实验系统框图。软件利用第1节中介绍的计算方法代替了硬件相位计求相位差^[2]的功能,同时也综合了数据的分析处理功能。

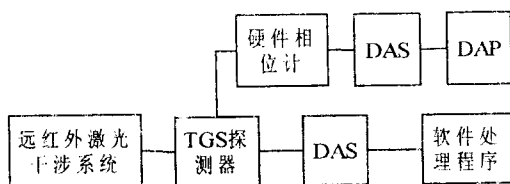


图1 软硬件处理密度实验系统框图

2.1 计算相位差

根据上述相位差计算原理,首先根据式(2)和式(5)求出每个采样点对应采样时刻 t_0 的 A 、 B 值。由于采样的离散性,在 $(-\frac{T}{2} + t_0, \frac{T}{2} + t_0)$ 积分区间里,根据探测信号的采样周期划分等分区间,分段对被积函数作梯形积分,用梯形面积的和近似作为积分值 A 、 B 。在实验中探测信号的周期 $T = 10^{-4} \text{s}$,采样周期为 $1 \mu\text{s}$,因而取等分区间 $\Delta t = T/100 = 1 \mu\text{s}$,与每个 t_0 的间隔相等,使得每段恰有一个采样值供分段求梯形面积。其次,由式(8)求出每个时刻的 Φ_0 ,再根据式(3) $\varphi_0 = \omega t_0 - \Phi_0$,得到每个时刻的相位。分别对探测信号和参考信号作如上处理,求其相位差,其中相位差的值域定义在 $[0, 2\pi]$ 区间。在处理过程中,由于 $\Phi_0 = \operatorname{arctg}$

$\frac{B}{A}$,则根据梯形积分公式分别求 A 、 B 时,两式中的相

同项 $\frac{\Delta t}{2}$ 可略去不计,因此减少了大量的计算。同理探测信号和参考信号根据式(3)求同一时刻的相位时 ωt_0 项是相同的,因此该步骤也可省去,直接将参考信号和探测信号由式(8)求出的 Φ_0 相减即可。

软件计算所得相位差如图2中 NE3S1 所示,HCN3 则是硬件相位计处理的结果。硬件相位计对探测信号 $p(t) = P \sin[\omega t - \varphi(t)]$ 和参考信号 $r(t) = R \sin \omega t$ 的相位比较时,在每个周期 $T = 2\pi/\omega = 10^{-4} \text{s}$ 做一次比较,输出一个相位差,相位差的时间分辨率为 $100 \mu\text{s}$ 。而软件求得 A 、 B 的时间分辨率与探测信号一致为 $1 \mu\text{s}$,从而相位差的时间分辨率也为 $1 \mu\text{s}$ 。由此可见软件处理提高了相位差的时间分辨率。

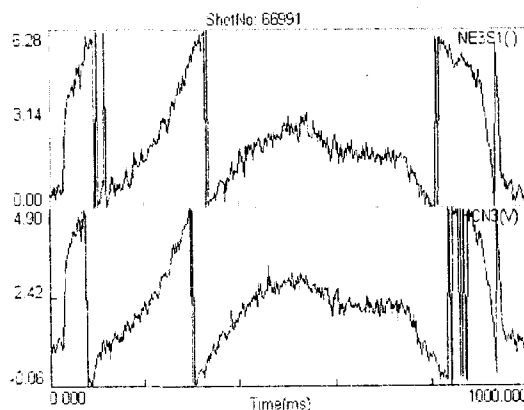


图2 软硬件求出的相位差

2.2 翻转处理

硬件相位计输出 $0 \sim 5 \text{V}$ 的电信号,对应于 $0 \sim 2\pi$ 的相位差^[2,3]。当相位差超过 2π 时,信号从 5V 翻转到 0V ,也就是硬件相位计存在着过 2 就翻转的缺点^[2],实际的翻转阈值略小于该理论值。由于软件处理的相位差在 0 到 2π 范围内,所以同样存在翻转问题,当信号大于 2π 时,则从 2π 翻转到 0 。图2显示的软硬件处理信号中的翻转并未发生在相同时刻,这是由于硬件相位计信号基线经过调整的缘故。

由于翻转的出现,经过上述处理的信号仍不能反映真实的密度波形,需进一步作翻转处理。理论上发生翻转时直接将当前值加上翻转阈值,但在实际处理过程中,信号中经常有类似翻转的干扰出现,使得翻转处理变得复杂。经过对大量密度信号进行分析,影响翻转判断的干扰可归纳为以下几种:

- (1)跳变的前沿出现缓慢上升或下降的情况;
- (2)跳变的后沿出现缓慢上升或下降的情况;
- (3)跳变的前后沿同时出现缓慢上升或下降的情况。

上述几种干扰如图 3 所示。硬件处理有类似情况,且干扰情况更加复杂。因此无论软硬件处理,要想获取正确的密度信号,干扰处理都是必不可少的。

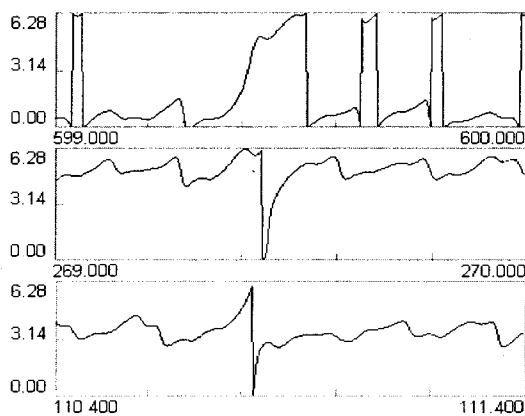


图 3 影响翻转判断的几种干扰

属于上述几种干扰的跳变,非常接近翻转,因此在进行翻转处理时首先应根据干扰的特征判断每次跳变为干扰还是真实的翻转,进而做出相应的处理。图 4 中的 NE3 是经过上述软件方法处理的结果,NNE3 则是同一道信号由硬件处理所得。所求信号为中心道密度,弧度 2π 对应真实密度 $1.25(+19\text{e}/\text{m}^3)$,由于采集时可能存在零点漂移,处理时需扣除零漂^[5]。

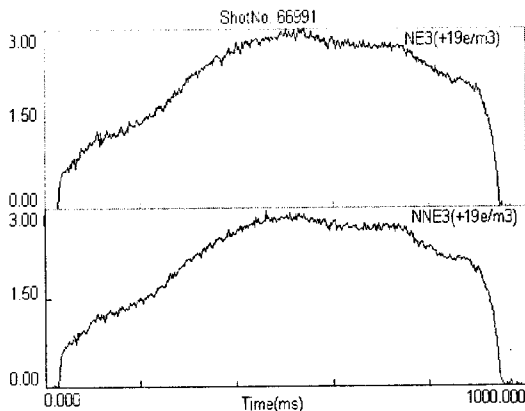


图 4 软硬件所求密度

3 实验分析

3.1 细节分析

图 5 是采样周期为 $16\mu\text{s}$ 的硬件处理密度 NNE3 与采样周期为 $1\mu\text{s}$ 的软件处理密度 NE3 在 2ms 内的细节展开。目前 HT-7 托卡马克采用的是 10kHz 调制频率的激光干涉仪^[2],因为硬件相位计的相位差时间分辨率取决于信号的调制周期,因而虽然信号的采样周期为 $16\mu\text{s}$,处理所得密度的时间分辨率仍为 $100\mu\text{s}$,而软件处理密度时间分辨率与信号采样周期一致为 $1\mu\text{s}$ 。两者时间分辨率的差别,在图中得到很好的体现,信号 NNE3 明显呈现较大的落差,而 NE3 的

波形则非常平滑,更利于诊断人员进行深入分析。

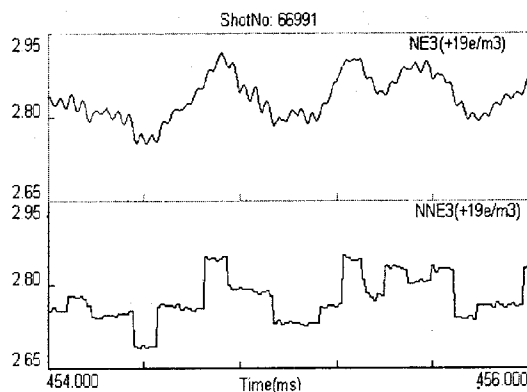


图 5 软硬件处理所得密度细节对比

3.2 标准误差分析

软件处理求出的密度波形与硬件处理基本上相同,但两者的幅值仍有细微的差别,而且降低软件处理信号的采样频率,这个差距也随之逐渐增大。根据标准误差公式

$$\sigma = \left(\frac{\sum_{i=1}^N [ne(i) - nne(i)]^2}{N} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ne 和 nne}$$

分别为软硬件处理所得密度,得到软件处理的不同采样频率的同一道密度信号与硬件处理结果的标准误差曲线如图 6 所示,标准误差随着采样频率的增大而减小。

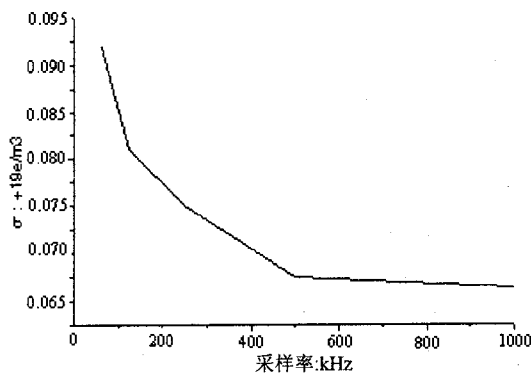


图 6 标准误差曲线

3.3 时间分析

由于软件处理的计算量较大,在获得高时间分辨率的同时,处理时间也明显增加。表 1 是在操作系统为 Windows2000、CPU 为 PIII、内存为 256M 的个人计算机上所测采样周期与处理一个采样点所需平均时间的关系。处理时间包括计算相位差及翻转处理的时间,即为求出真实密度的总时间。由表 1 可以看出,当采样周期大于 $6\mu\text{s}$ 时,一个采样点的计算时间已经小于采样间隔,软件方法在理论上可用于实时密度处理,此时可获得的时间分辨率已远大于硬件方法的最大时间分辨率 $100\mu\text{s}$ 。

(下转第 188 页)

2.5 系统设计的特色

本系统与传统的在线测试系统相比,系统体系结构设计比较合理,并采用当前比较先进的方法和技术实施开发,使该系统具有更高的自动化水平,也具有一定的智能性,例如出卷、改卷及知识库的维护等都是由相应的 Agent 自动完成,一定程度上减轻了教师的负担;在多人同时测试时,由于本系统各 Agent 之间使用的是一种高层 Agent 通信语言,即 KQML 通信语言,不需传递原始数据,因此减少了通信流量;扩展性得到了提高,可以容易地引入新 Agent 完成新的任务。

3 结束语

尽管 Agent 技术的理论与当前的实际应用仍存在着一定的差距,但是 Agent 技术应用到网络教学中的在线测试系统,在某种程度上,可以较好地克服原有网络教学中在线测试系统的缺陷。笔者尝试着利用面向 Agent 的开发方法,实现网络教学中的在线测试

系统,在一定程度上满足了学生和教师对在线测试系统智能性和动态性的需求。目前,在线测试是网络课程的重要组成部分,随着网络环境的不断完善、Agent 技术的逐渐成熟,基于 Agent 在线测试系统将成为未来数字教育服务领域中的重要研究课题之一。

参考文献:

[1] 伍尔德里奇.多 Agent 系统引论[M].石纯一译.北京:电子工业出版社,2003.
[2] 毛新军.面向主体的软件开发[M].北京:清华大学出版社,2005.
[3] 朱 萍,杨肖鸳.基于 Agent 技术的敏捷虚拟企业信息系统框架研究[D].昆明:昆明理工大学,2002.
[4] Agent - Oriented Software 公司. JACK™ Intelligent Agents WebBot Manual[EB/OL]. 2006 - 12 - 30. <http://www.agent-software.com/shared/resources/index.html>.
[5] 程 蕾,王泽兵.基于 Agent 技术的智能题库系统的研究与设计[D].杭州:浙江大学,2003.

(上接第 167 页)

研究与发展,1999,36(6):681 - 684.
[7] 陈湘晖,朱善君,吉吟东.基于熵和变精度粗糙集的规则不确定性量度[J].清华大学学报,2001,41(3):109 - 113.
[8] 刘振华,刘三阳,王 珏.基于信息量的一种属性约简算法[J].西安电子科技大学学报:自然科学版,2003,30(6):835 - 838.
[9] Pawlak Z. Rough sets, theoretical aspects of reasoning about data[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.

[10] 梁吉业,曲开社,徐宗本.信息系统的属性约简[J].系统工程理论与实践,2001,21(12):76 - 80.
[11] 王 珏,苗夺谦,周育健.关于 Rough Set 理论与应用的综述[J].模式识别与人工智能,1996,9(4):337 - 344.
[12] 曾黄麟.粗集理论及其应用——关于数据推理的新方法(修订版)[M].重庆:重庆大学出版社,1998:83 - 87.
[13] 常翠云,吴 渝.一种基于 Rough Set 理论的属性约简及规则提取方法[J].软件学报,1999,10(11):1206 - 1211.

(上接第 183 页)

表 1 采样周期与处理时间关系表

采样周期(μs)	计算一个采样点所需平均时间(μs)
1	16~17
2	9~10
4	5~6
6	4~5
8	2~4

4 结束语

硬件相位计性能指标不稳定,制作费用昂贵,存在使用寿命问题,软件方法节省了硬件必需的成本费和维修费,处理更加灵活方便。而且软件处理所得密度的时间分辨率取决于探测信号的采样频率,要想获得高时间分辨率的密度,提高信号采样频率即可,硬件相位计的时间分辨率则只取决于信号调制周期。近年来高响应频率的采集卡已非常普遍,计算机的处理能力

也一直在不断提高,给软件方法的应用提供了有利的条件。

参考文献:

[1] Gao Xiang, Jie Yinxian, Xia Chengyi, et al. High Density Operation on HT - 7 Superconducting tokamak[J]. Nuclear Fusion, 2000, 40(11):1875 - 1883.
[2] 揭银先. HT - 7 超导托卡马克上 HCN 激光干涉仪及等离子体密度行为的研究[D].合肥:中科院等离子体物理研究所,2002.
[3] Jie Y X, Gao X, Cheng Y F. Multi - channel FIR HCN Laser Interferometer on HT - 7 Tokamak[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2000, 21(9):1375 - 1380.
[4] 陈俊本,高 翔,郭其良,等.一种计算远红外干涉仪相位差的数值方法[J].核聚变与等离子体物理,1989,9(3):189 - 192.
[5] 张春飞,罗家融.软件去除零点漂移方法的讨论[J].计算机测量与控制,2004,12(7):684 - 686.