



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112067130 B

(45) 授权公告日 2023.06.27

(21) 申请号 202010934297.4

(22) 申请日 2020.09.08

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112067130 A

(43) 申请公布日 2020.12.11

(73) 专利权人 合肥工业大学  
地址 230009 安徽省合肥市包河区屯溪路  
193号  
专利权人 中国科学院合肥物质科学研究院

(72) 发明人 杨星河 刘冬梅 符佳 吕波  
刘良成

(74) 专利代理机构 安徽省合肥新安专利代理有  
限责任公司 34101  
专利代理师 陆丽莉 何梅生

(51) Int.Cl.

G01J 4/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109946512 A, 2019.06.28

CN 109900959 A, 2019.06.18

US 2002126778 A1, 2002.09.12

刘冬梅 等.EAST运动斯塔克效应诊断的信  
号处理分析系统设计.《核电子学与探测技术》  
.2019,第39卷(第03期),

智玉琴 等.EAST运动斯塔克效应诊断数据  
处理中GPU并行化加速算法的研究.《核聚变与等  
离子体物理》.2020,第40卷(第01期),

智玉琴 等.EAST运动斯塔克效应诊断数据  
处理中GPU并行化加速算法的研究.《核聚变与等  
离子体物理》.2020,第40卷(第01期),

审查员 朱磊

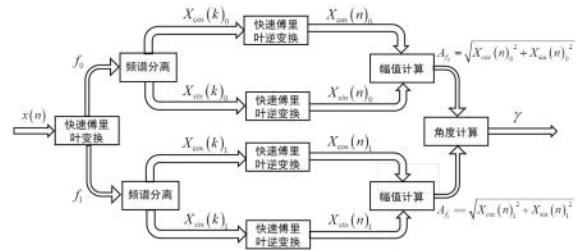
权利要求书2页 说明书6页 附图1页

(54) 发明名称

一种多频率分量的幅值提取方法及其系统

(57) 摘要

本发明公开了一种多频率分量的幅值提取方法及其系统,该方法能同时提取分析待测信号中的多个频率分量的幅值,同时提取两个不同频率 $f_0$ 和 $f_1$ 分量的幅值时:对采样后的待测信号进行快速傅里叶变换以获取信号频谱,通过频谱分离同步提取两个频率的局部频谱。对局部频谱进行快速傅立叶逆变换,得到频率 $f_0$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 以及频率 $f_1$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_1$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_1$ 。对余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 的平方和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 的平方进行求和处理后再求开方,得到频率 $f_0$ 对应分量的幅值 $A_{f_0}$ ;同理得到,频率 $f_1$ 对应分量的幅值 $A_{f_1}$ 。本发明能够准确实时的提取待测信号中不同频率分量幅值,从而可以计算得到幅值的相关量信息。



1. 一种光弹调制器的多频率分量的幅值提取方法,其特征是按如下步骤进行:

步骤1:对待测信号采样得到采样信号 $x(n)$ ,对采样信号 $x(n)$ 进行 $N$ 个点的快速傅里叶变换得到对应的频谱 $X(k)$ ;

步骤2:利用式(1)在频谱 $X(k)$ 上分别确定频率 $f_0$ 对应的谱线 $x(k_0)$ 所在的位置 $k_0$ 和频率 $f_1$ 对应的谱线 $x(k_1)$ 所在的位置 $k_1$ :

$$\begin{cases} k_0 = \frac{f_0 N}{f_s} \\ k_1 = \frac{f_1 N}{f_s} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, $f_s$ 是对信号的采样频率;

步骤3:应用带宽为 $B$ 的矩形窗 $[k_0 - \frac{B}{2}, k_0 + \frac{B}{2}]$ 、 $[N - k_0 - \frac{B}{2}, N + k_0 + \frac{B}{2}]$ 和 $[k_1 - \frac{B}{2}, k_1 + \frac{B}{2}]$ 、 $[N - k_1 - \frac{B}{2}, N + k_1 + \frac{B}{2}]$ 对所述频谱 $X(k)$ 进行频谱分离,获得包含频率信息的四个局部频谱,包括,如式(2)所示的频率 $f_0$ 的余弦频谱 $X_{\cos}(k)_0$ 、如式(3)所示的频率 $f_0$ 的正弦频谱 $X_{\sin}(k)_0$ 、如式(4)所示的频率 $f_1$ 的余弦频谱 $X_{\cos}(k)_1$ 、如式(5)所示的频率 $f_1$ 的正弦频谱 $X_{\sin}(k)_1$ :

$$X_{\cos}(k)_0 = \begin{cases} X(k) \times 1; & k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_0 + \frac{B}{2} \cup N - k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$X_{\sin}(k)_0 = \begin{cases} X(k) \times (-j); & k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times j; & N - k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$X_{\cos}(k)_1 = \begin{cases} X(k) \times 1; & k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_1 + \frac{B}{2} \cup N - k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$X_{\sin}(k)_1 = \begin{cases} X(k) \times (-j); & k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times j; & N - k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

步骤4:对包含频率信息的四个局部频谱 $X_{\cos}(k)_0$ 、 $X_{\sin}(k)_0$ 和 $X_{\cos}(k)_1$ 、 $X_{\sin}(k)_1$ 分别做快速傅立叶逆变换,从而得到频率 $f_0$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 以及频率 $f_1$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_1$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_1$ ;

步骤5:利用式(6)计算频率 $f_0$ 和 $f_1$ 的幅值 $A_{f_0}$ 和 $A_{f_1}$ ,

$$\begin{cases} A_{f_0} = \sqrt{X_{\cos}(n)_0^2 + X_{\sin}(n)_0^2} \\ A_{f_1} = \sqrt{X_{\cos}(n)_1^2 + X_{\sin}(n)_1^2} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, $n=0,1,2,\dots,N-1$ 。

2.一种基于FPGA的光弹调制器的幅值提取系统,其特征包括:ADC模块、FPGA模块、DAC模块;

FPGA模块包括:ADC时序控制模块、快速傅里叶变换模块、频谱分离模块、快速傅里叶逆变换模块、幅值计算模块和DAC时序控制模块;

所述ADC模块在所述ADC时序控制模块的控制下,将待测信号转换为数字化信号 $x(n)$ 后传送给快速傅里叶变换模块;

所述快速傅里叶变换模块对所述数字化信号 $x(n)$ 进行快速傅里叶变换得到频谱 $X(k)$ ;

所述频谱分离模块根据频率 $f_0$ 和 $f_1$ ,选取矩形窗口对所述频谱 $X(k)$ 进行频谱分离,得到对应频率 $f_0$ 的局部频谱 $X_{\cos}(k)_0$ 、 $X_{\sin}(k)_0$ 以及频率 $f_1$ 的局部频谱 $X_{\cos}(k)_1$ 、 $X_{\sin}(k)_1$ ;

所述快速傅里叶逆变换模块对四个局部频谱分别进行快速傅立叶逆变换,并相应得到频率 $f_0$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 以及频率 $f_1$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_1$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_1$ ;

所述幅值计算模块对余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 的平方和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 的平方进行求和处理后再求开方,得到频率 $f_0$ 对应分量的幅值 $A_{f_0}$ ;同理得到,频率 $f_1$ 对应分量的幅值 $A_{f_1}$ ;对所述幅值 $A_{f_0}$ 和 $A_{f_1}$ 求取比值后再进行反正切运算,从而获得幅值相关量 $\gamma$ ;

所述DAC模块在所述DAC时序控制模块的控制下,将相关量 $\gamma$ 转化成电压信号并实时输出。

## 一种多频率分量的幅值提取方法及其系统

### 技术领域

[0001] 本发明属于电气工程技术领域,具体的说是一种多频率分量的幅值提取方法及其系统。

### 背景技术

[0002] 电流密度分布是EAST装置实现长脉冲、高性能等离子体的关键分布参数之一。目前,电流密度分布测量的诊断为远红外激光偏振干涉仪(FIRPOINTsystem)和运动斯塔克效应(MSE)诊断。MSE诊断通过测量高速中性粒子在穿越强磁场时产生的Stark分裂谱的偏振方向,结合等离子体平衡反演获得可靠的电流密度分布,具有空间局域性较好、精度高、时间响应快等优点,在世界各大装置上获得了广泛的应用。

[0003] 目前,EAST已建成了基于偏振测量的MSE诊断系统,该系统采用两块本振频率(42kHz、47kHz)略有差异的光弹调制器(PEM)相互偏置 $45^\circ$ ,再加一片偏置 $22.5^\circ$ 的检偏器组成测量光路。依据调制技术,偏振光经过相位周期变化的光弹调制器后,经检偏器与光电转化输出包含多组谐频信号的时变信号,偏振光的偏振方向可由二倍频信号(84kHz、94kHz)的幅值之比得到。

[0004] 目前,应用于MSE诊断的PEM信号处理方案包含软件与硬件两种类型。软件方面,KSTAR装置的MSE诊断系统将PEM信号利用数据采集系统记录可利用基于FFT算法的数据分析程序对数据进行处理,但该方法计算量大,耗时长,多用于离线数据分析。硬件方面,EAST中的采用锁相放大器获得PEM信号谐波分量的幅值,具有延迟小,动态范围大的优点,。但一道锁相只能获取一个二倍频分量的幅值,一个观测道需配置两台锁相放大器,硬件投资较大,且不能直接输出偏振角度。

### 发明内容

[0005] 本发明是为了解决上述现有技术存在的不足之处,提出一种多频率分量的幅值提取方法及其系统,准确实时的提取出PEM信号中两个光弹调制器的调制频率的二倍频分量幅值,直接计算出入射光的偏振角度,从而完成对MSE诊断的偏振检测。

[0006] 本发明为达到上述发明目的,采用如下技术方案:

[0007] 本发明一种多频率分量的幅值提取方法的特点是按如下步骤进行:

[0008] 步骤1:对待测信号采样得到采样信号 $x(n)$ ,对采样信号 $x(n)$ 进行N个点的快速傅里叶变换得到对应的频谱 $X(k)$ ;

[0009] 步骤2:利用式(1)在频谱 $X(k)$ 上分别确定频率 $f_0$ 对应的谱线 $x(k_0)$ 所在的位置 $k_0$ 和频率 $f_1$ 对应的谱线 $x(k_1)$ 所在的位置 $k_1$ :

$$[0010] \quad \begin{cases} k_0 = \frac{f_0 N}{f_s} \\ k_1 = \frac{f_1 N}{f_s} \end{cases} \quad (1)$$

[0011] 式(1)中,  $f_s$  是对信号的采样频率;

[0012] 步骤3:应用带宽为B的矩形窗  $[k_0 - \frac{B}{2}, k_0 + \frac{B}{2}]$ 、 $[N - k_0 - \frac{B}{2}, N + k_0 + \frac{B}{2}]$  和  $[k_1 - \frac{B}{2}, k_1 + \frac{B}{2}]$ 、

$[N - k_1 - \frac{B}{2}, N + k_1 + \frac{B}{2}]$  对所述频谱  $X(k)$  进行频谱分离, 获得包含频率信息的四个局部频谱,

包括, 如式(2)所示的频率  $f_0$  的余弦频谱  $X_{\cos}(k)_0$ 、如式(3)所示的频率  $f_0$  的正弦频谱  $X_{\sin}(k)_0$ 、如式(4)所示的频率  $f_1$  的余弦频谱  $X_{\cos}(k)_1$ 、如式(5)所示的频率  $f_1$  的正弦频谱  $X_{\sin}(k)_1$ :

$$[0013] \quad X_{\cos}(k)_0 = \begin{cases} X(k) \times 1; & k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_0 + \frac{B}{2} \cup N - k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$[0014] \quad X_{\sin}(k)_0 = \begin{cases} X(k) \times (-j); & k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times j; & N - k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$[0015] \quad X_{\cos}(k)_1 = \begin{cases} X(k) \times 1; & k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_1 + \frac{B}{2} \cup N - k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$[0016] \quad X_{\sin}(k)_1 = \begin{cases} X(k) \times (-j); & k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times j; & N - k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

[0017] 步骤4:对包含频率信息的四个局部频谱  $X_{\cos}(k)_0$ 、 $X_{\sin}(k)_0$  和  $X_{\cos}(k)_1$ 、 $X_{\sin}(k)_1$  分别做快速傅立叶逆变换, 从而得到频率  $f_0$  对应的余弦序列  $X_{\cos}(n)_0$  和正弦序列  $X_{\sin}(n)_0$  以及频率  $f_1$  对应的余弦序列  $X_{\cos}(n)_1$  和正弦序列  $X_{\sin}(n)_1$ ;

[0018] 步骤5:利用式(6)计算频率  $f_0$  和  $f_1$  的幅值  $A_{f_0}$  和  $A_{f_1}$ ,

$$[0019] \quad \begin{cases} A_{f_0} = \sqrt{X_{\cos}(n)_0^2 + X_{\sin}(n)_0^2} \\ A_{f_1} = \sqrt{X_{\cos}(n)_1^2 + X_{\sin}(n)_1^2} \end{cases} \quad (6)$$

[0020] 式(6)中,  $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

[0021] 本发明一种基于FPGA的幅值提取系统的特点包括:ADC模块、FPGA模块、DAC模块;

[0022] FPGA模块包括:ADC时序控制模块、快速傅里叶变换模块、频谱分离模块、快速傅里叶逆变换模块、幅值计算模块和DAC时序控制模块;

[0023] 所述ADC模块在所述ADC时序控制模块的控制下,将待测信号转换为数字化信号  $x(n)$  后传送给快速傅里叶变换模块;

[0024] 所述快速傅里叶变换模块对所述数字化信号  $x(n)$  进行快速傅里叶变换得到频谱  $X$

(k) ;

[0025] 所述频谱分离模块根据频率 $f_0$ 和 $f_1$ ,选取矩形窗口对所述频谱 $X(k)$ 进行频谱分离,得到对应频率 $f_0$ 的局部频谱 $X_{\cos}(k)_0$ 、 $X_{\sin}(k)_0$ 以及频率 $f_1$ 的局部频谱 $X_{\cos}(k)_1$ 、 $X_{\sin}(k)_1$ ;

[0026] 所述快速傅里叶逆变换模块对四个局部频谱分别进行快速傅立叶逆变换,并相应得到频率 $f_0$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 以及频率 $f_1$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_1$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_1$ ;

[0027] 所述幅值计算模块对余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 的平方和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 的平方进行求和处理后再求开方,得到频率 $f_0$ 对应分量的幅值 $A_{f_0}$ ;同理得到,频率 $f_1$ 对应分量的幅值 $A_{f_1}$ ;对所述幅值 $A_{f_0}$ 和 $A_{f_1}$ 求取比值后再进行反正切运算,从而获得幅值相关量 $\gamma$ ;

[0028] 所述DAC模块在所述DAC时序控制模块的控制下,将相关量 $\gamma$ 转化成电压信号并实时输出。

[0029] 与现有技术相比,本发明的有益效果在于:

[0030] 1,本发明通过幅值提取方法,能够同时提取两个调制频率二倍频分量的幅值,并且直接计算的到入射光的偏振角度,解决的上述采用锁相放大器处理PEM信号时一个观测道需配置两台锁相放大器,且不能直接输出偏振角度的问题。

[0031] 2,本发明通过ADC模块、FPGA模块、DAC模块能够高速的采集PEM信号,将复杂的角度计算固化至FPGA逻辑电路中,实时的完成对PEM信号的处理和角度信息的输出,解决了上述利用基于FFT算法的数据分析程序对PEM信号数据无法实时处理的问题。

## 附图说明

[0032] 图1为本发明多频率分量的幅值提取方法的流程图;

[0033] 图2为本发明基于FPGA的实时信号处理系统。

## 具体实施方式

[0034] 本实施例中,一种多频率分量的幅值提取方法,在基于FPGA的实时信号处理系统中实现,并可以同时提取分析待测信号中多个频率分量的幅值,同时提取两个不同频率 $f_0$ 和 $f_1$ 分量的幅值时,如图1所示,具体的说,是按如下步骤进行:

[0035] 步骤1:对外部输入的PEM信号 $x(n)$ 进行 $N$ 个点的快速傅里叶变换并得到频谱

$$X(k) = \sum_0^{N-1} x(n) e^{-j \frac{2\pi n k}{N}}, \text{其中 } k=0,1,2,\dots,N-1, \text{具体实施中,取 } N \text{ 为 } 4096;$$

[0036] 步骤2:利用式(1)在频谱 $X(k)$ 上分别确定频率 $f_0$ 对应的谱线 $x(k_0)$ 所在的位置 $k_0$ 和频率 $f_1$ 对应的谱线 $x(k_1)$ 所在的位置 $k_1$ :

$$[0037] \quad \begin{cases} k_0 = \frac{f_0 N}{f_s} \\ k_1 = \frac{f_1 N}{f_s} \end{cases} \quad (1)$$

[0038] 式(1)中, $f_0$ 和 $f_1$ 是PEM调制频率的二倍频,具体实施中, $f_0=84\text{kHz}$ , $f_1=94\text{kHz}$ , $f_s$ 是ADC模块的采样频率,具体实施中, $f_s=1\text{MHz}$ ;

[0039] 推导1:

[0040]  $X(k)$  与  $X(N-k)$  互为共轭;

$$[0041] \quad X[N-k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)(N-k)n} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{j(-2n\pi + \frac{2\pi}{N}kn)} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{j\frac{2\pi}{N}kn} = X^*[k];$$

[0042]  $X[0]$  没有虚部, 叫做直流分量。当  $N$  是偶数的时候:

$$[0043] \quad X\left[\frac{N}{2}\right] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)\frac{N}{2}n} = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-jn\pi}, \text{ 虚部是 } 0, \text{ 也是直流分量。}$$

[0044] 对于  $x[n]$  (假设  $N$  是偶数):

$$[0045] \quad N \times X[n] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn} = X[0] + X[1]e^{j\frac{2\pi}{N}} + X[2]e^{j2\frac{2\pi}{N}} + \dots + X\left[\frac{N}{2}-1\right]e^{j\frac{2\pi}{N}\left(\frac{N}{2}-1\right)} \\ + X\left[\frac{N}{2}\right] + X\left[\frac{N}{2}+1\right]e^{j\frac{2\pi}{N}\left(\frac{N}{2}+1\right)} + \dots + X[N-2]e^{j\frac{2\pi}{N}(N-2)} + X[N-1]e^{j\frac{2\pi}{N}(N-1)}$$

[0046] 假设  $X[k_c] = a_k + jb_k$ , 那么由上面的共轭特性可知  $X[N-k_c] = a_k - jb_k$ 。

[0047] 那么  $X[k_c]$  与  $X[N-k_c]$  这两项分量之和就是:

$$[0048] \quad X[k_c] + X[N-k_c] = (a_k + jb_k)e^{j\frac{2n\pi}{N}k_c} + (a_k - jb_k)e^{j\frac{2n\pi}{N}(N-k_c)} = a_k \left( e^{j\frac{2n\pi}{N}k_c} + e^{-j\frac{2n\pi}{N}k_c} \right) \\ + jb_k \left( e^{j\frac{2n\pi}{N}k_c} - e^{-j\frac{2n\pi}{N}k_c} \right) = 2a_k \cos\left(\frac{2k_c n\pi}{N}\right) - 2b_k \sin\left(\frac{2k_c n\pi}{N}\right) = 2\sqrt{a_k^2 + b_k^2} \cos\left(\frac{2k_c n\pi}{N} + \phi\right),$$

[0049] 其中  $A_k = 2\sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ ,  $\tan \phi_k = \frac{b_k}{a_k}$ 。

[0050] 对  $X[k_c]$  乘以  $j$ ,  $X[N-k_c]$  乘以  $-j$ , 则:

$$[0051] \quad jX[k_c] + (-j)X[N-k_c] = ja_k \left( e^{j\frac{2n\pi}{N}k_c} - e^{-j\frac{2n\pi}{N}k_c} \right) - b_k \left( e^{j\frac{2n\pi}{N}k_c} - e^{-j\frac{2n\pi}{N}k_c} \right) = \\ 2a_k \sin\left(\frac{2n\pi}{N}k_c\right) + 2b_k \cos\left(\frac{2n\pi}{N}k_c\right) = 2\sqrt{a_k^2 + b_k^2} \sin\left(\frac{2k_c n\pi}{N} + \phi_k\right)$$

[0052] 步骤3: 根据推导1, 应用带宽为  $B$  的矩形窗  $\left[k_0 - \frac{B}{2}, k_0 + \frac{B}{2}\right]$ 、 $\left[N - k_0 - \frac{B}{2}, N + k_0 + \frac{B}{2}\right]$

和  $\left[k_1 - \frac{B}{2}, k_1 + \frac{B}{2}\right]$ 、 $\left[N - k_1 - \frac{B}{2}, N + k_1 + \frac{B}{2}\right]$  对频谱  $X(k)$  进行频谱分离, 获得包含频率信息的

四个局部频谱, 包括, 如式 (2) 所示的二倍频率  $f_0$  的余弦频谱  $X_{\cos}(k)_0$ 、如式 (3) 所示的二倍频率  $f_0$  的正弦频谱  $X_{\sin}(k)_0$ 、如式 (4) 所示的二倍频率  $f_1$  的余弦频谱  $X_{\cos}(k)_1$ 、如式 (5) 所示的二倍频率  $f_1$  的正弦频谱  $X_{\sin}(k)_1$ :

$$[0053] \quad X_{\cos}(k)_0 = \begin{cases} X(k) \times 1; & k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_0 + \frac{B}{2} \cup N - k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

$$[0054] \quad X_{\sin}(k)_0 = \begin{cases} X(k) \times (-j); & k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times j; & N - k_0 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_0 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (3)$$

$$[0055] \quad X_{\cos}(k)_1 = \begin{cases} X(k) \times 1; & k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_1 + \frac{B}{2} \cup N - k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (4)$$

$$[0056] \quad X_{\sin}(k)_1 = \begin{cases} X(k) \times (-j); & k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times j; & N - k_1 - \frac{B}{2} \leq k \leq N + k_1 + \frac{B}{2} \\ X(k) \times 0; & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

[0057] 步骤4:对包含频率信息的四个局部频谱 $X_{\cos}(k)_0$ 、 $X_{\sin}(k)_0$ 和 $X_{\cos}(k)_1$ 、 $X_{\sin}(k)_1$ 分别做快速傅里叶逆变换,从而能得到到二倍频率 $f_0$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 以及二倍频率 $f_1$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_1$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_1$ ;

[0058] 步骤5:利用式(6)计算频率 $f_0$ 和 $f_1$ 的幅值 $A_{f_0}$ 和 $A_{f_1}$ ,

$$[0059] \quad \begin{cases} A_{f_0} = \sqrt{X_{\cos}(n)_0^2 + X_{\sin}(n)_0^2} \\ A_{f_1} = \sqrt{X_{\cos}(n)_1^2 + X_{\sin}(n)_1^2} \end{cases} \quad (6)$$

[0060] 式(6)中, $n=0,1,2,\dots,N-1$ ;

[0061] 步骤6:利用式(7)得到入射光的偏振角度 $\gamma$ :

$$[0062] \quad \gamma = \frac{1}{2} \arctan \frac{A_{f_0}}{A_{f_1}} \quad (7)。$$

[0063] 本实施例中,一种基于FPGA的实时信号处理系统,是应用于EAST装置中运动斯达克效应MSE的诊断系统中,如图2所示,包括:ADC模块、FPGA模块、DAC模块;

[0064] ADC模块与DAC模块集成在AD-DA电路板上,通过HSMC连接器与FPGA模块连接,能够充分利用和发挥FPGA开发板中的高性能I/O功能。并且根据不同的电路功能分块布局,能够有效的减少ADC、DAC与FPGA开发板之间的电磁干扰,提高系统的电磁兼容性。

[0065] 如图1所示,FPGA模块包括:ADC时序控制模块、快速傅里叶变换模块、频谱分离模块、快速傅里叶逆变换模块、幅值计算模块、角度计算模块和DAC时序控制模块;

[0066] 根据多频率分量的幅值提取方法,ADC模块在ADC时序控制模块的控制下,将诊断系统输出的PEM信号转换为PEM数字化信号 $x(n)$ 后传送给FFT模块;

[0067] 具体实施中,系统各个模块的功能如下;

[0068] 如图2所示,快速傅里叶变换模块对PEM数字化信号 $x(n)$ 进行快速傅里叶变换变换得到频谱 $X(k)$ ;



[0069] 频谱分离模块根据诊断系统中两个光弹调制器的调制频率的二倍频率 $f_0$ 和 $f_1$ ,选取矩形窗口对频谱 $X(k)$ 进行频谱分离,得到对应的二倍频率 $f_0$ 的局部频谱 $X_{\cos}(k)_0$ 、 $X_{\sin}(k)_0$ 以及二倍频率 $f_1$ 的局部频谱 $X_{\cos}(k)_1$ 、 $X_{\sin}(k)_1$ ;

[0070] 快速傅里叶逆变换模块对四个局部频谱分别进行快速傅立叶逆变换,并相应得到二倍频率 $f_0$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 以及二倍频率 $f_1$ 对应的余弦序列 $X_{\cos}(n)_1$ 和正弦序列 $X_{\sin}(n)_1$

[0071] 幅值计算模块对余弦序列 $X_{\cos}(n)_0$ 的平方和正弦序列 $X_{\sin}(n)_0$ 的平方进行求和处理后再求开方,得到二倍频率 $f_0$ 对应分量的幅值 $A_{f_0}$ ;同理得到,二倍频率 $f_1$ 对应分量的幅值 $A_{f_1}$ ;

[0072] 角度计算模块对幅值 $A_{f_0}$ 和 $A_{f_1}$ 求取比值后再进行反正切运算,从而获得偏振角度 $\gamma$ ;

[0073] DAC模块在DAC时序控制模块的控制下,将偏振角度信息 $\gamma$ 转化成电压信号并实时输出。

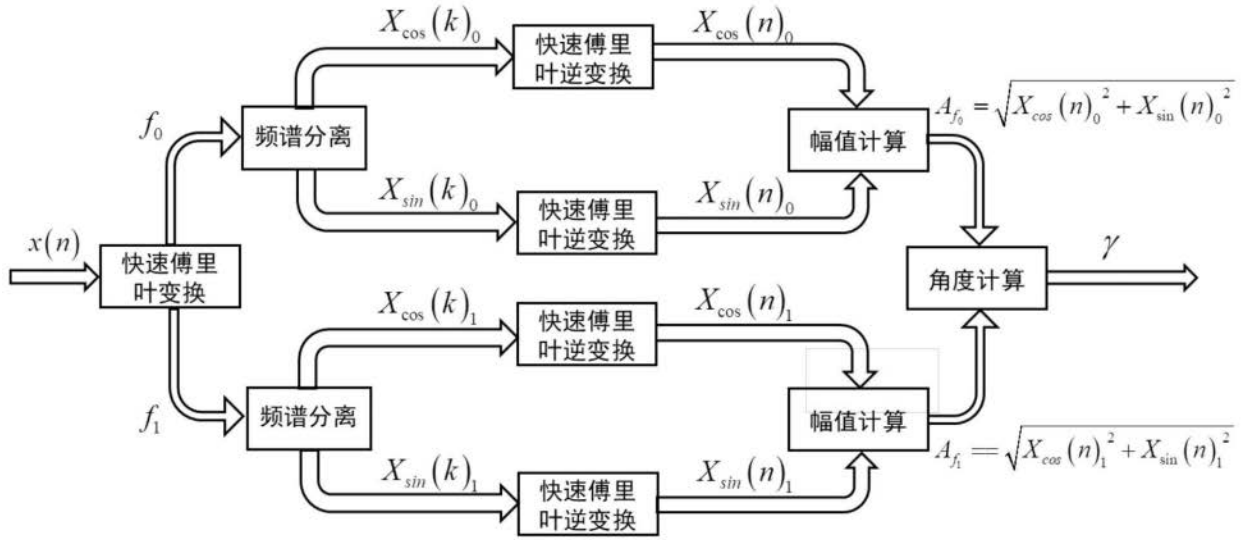


图1

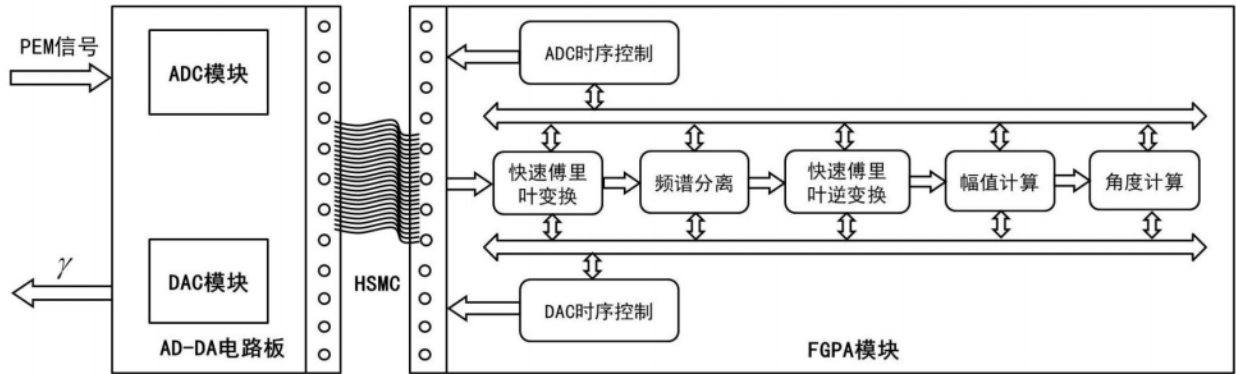


图2