

文章编号: 1001-4322(2011)01-0179-06

上海光源同步辐射空间干涉仪研制^{*}

陈 杰, 叶恺容, 冷用斌

(中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘 要: 研制了上海光源同步辐射空间干涉仪,用于储存环束团横向截面尺寸及发射度的精确测量。对干涉仪工艺设计中的光路参数、关键设备选型、数据处理方法及数据采集处理软件结构进行了分析讨论。结合束流实验完成了系统调试及运行参数优化,结果表明,CCD 增益系数与曝光时间设置对测量精度有显著影响,增益系数设为 0 dB,曝光时间设为 200 ms 时,随机测量误差可控制在 μm 量级。对上海光源储存环横向束斑尺寸进行了精确测量,结果表明:空间相干度曲线近似为高斯分布,可以采用单一空间频率的相干度测量值进行快速束斑尺寸计算;水平束斑尺寸实测值为 $52.4 \mu\text{m}$,与理论值预期值 $53.0 \mu\text{m}$ 相比,差异小于 2%;系统测量误差约为 5.5%,主要误差来源为相干度随机测量误差。

关键词: 空间干涉仪; 束团尺寸测量; 束流诊断; 同步辐射; 上海光源

中图分类号: TL594; TL506 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20112301.0179

束流发射度是同步辐射光源中电子储存环最重要的参数之一,可以通过测定束团横向截面尺寸后结合该点的 twiss 参数计算得到,为了不影响光源的运行,采用束团发出的同步辐射作为诊断信号是最为理想的选择^[1]。可见光成像法优点在于结构简单、易于实现,但受曲轨成像误差、景深成像误差、衍射误差的影响,在 550 nm 波段的空间分辨力极限为数十 μm ,适用于一、二代同步辐射光源^[2];X 射线聚焦成像法因工作波长较短引入的衍射误差较小,空间分辨力可优化至 μm 量级,但成本较高^[3];X 射线小孔成像法同样具有结构简单、易于实现的优点,受小孔几何投影尺寸以及小孔衍射光斑尺寸的限制,目前技术条件下可以达到的最优空间分辨力在 10 μm 左右^[4-5];空间干涉仪法直接在空间频率域测量束团发出同步光的相干度,具有结构简单、易于实现、分辨力高的特点,在 KEK ATF 装置上实验的结果表明,该方法可测出小至 5 μm 的束斑尺寸^[6-7],但对信号强度要求相对较高、数据处理分析相对复杂,数据刷新率不易做高,较适合用于电子储存环束斑平均尺寸的测量。

上海光源(SSRF)是第三代专用同步辐射光源,水平方向设计发射度为 $3.9 \text{ nm} \cdot \text{rad}$,弯铁处的水平束斑尺寸在几十 μm 量级,综合考虑测量分辨力、流强动态范围和性价比等因素,上海光源束测组确定同时研制安装 X 射线针孔相机和可见光空间干涉仪,以满足机器研究和发射度精确测量的需求^[8]。本文详细介绍上海光源同步辐射空间干涉仪的光路设计、数据处理算法及数据采集处理系统软硬件结构,对系统调试过程中的主要问题及解决方法进行讨论及总结,并给出在上海光源储存环中的部分应用实例。

1 基本原理

根据 Van Citterut-Zernike 理论,非点光源的有限尺寸发光区域其复空间相干度 $\gamma(\nu)$ 为发光尺度 $f(x)$ 的傅里叶变换,即

$$\gamma(\nu) = \int f(x) \exp[-2\pi i(x\nu)] dx \quad (1)$$

式中: ν 为空间频率。

而电子储存环中的电子束流空间尺度通常在数十 μm 量级,在弯转时均会沿切线方向发出同步辐射光,可以看作是在有限尺寸发光区域内发光的非点光源。因此只要测出同步辐射光的空间相干度,即可做反傅氏变换求得电子束团的截面尺寸。

双缝强度干涉仪正是测量这一空间相干度的有效手段,其原理如图 1 所示。

^{*} 收稿日期:2009-12-14; 修订日期:2010-06-10

基金项目:国家大科学工程“上海光源工程”项目

作者简介:陈 杰(1981—),男,博士研究生,主要从事束流诊断技术研究; chenjieisme@sinap. ac. cn。

通信作者:冷用斌(1972—),男,研究员,主要从事加速器束流测控技术研究; leng@sinap. ac. cn。

同步辐射光经双狭缝后通过透镜聚焦至屏幕(CCD)形成干涉图像,对于单色光而言,干涉条纹的强度分布为

$$I(y,D) = (I_1 + I_2) \text{sinc} \left[\frac{\pi a y \chi(D)}{\lambda f} \right]^2 \times \{1 + \gamma \cos [kD (\frac{y}{f} + \phi)]\}$$

(2)

式中: I_1 为第一狭缝出射光强; I_2 为第二狭缝出射光强; λ 为光波长; f 为像方主点至屏幕的距离(薄透镜近似下即为透镜焦距); a 为狭缝半宽; D 为双缝中心间距; ϕ 为干涉条纹初始相位, $k, \chi(D)$ 为测量仪器相关的两个标定系数(常数,可在数据采集处理中标定); γ 为待测的空间相干度。在此配置下,光源点处的空间频率定义为

$$\nu = \frac{2\pi D}{\lambda R}$$

(3)

式中: R 为光源点至双缝的距离。

所以只需要从 CCD 获取干涉条纹强度分布曲线,采用式(2)作为拟合目标函数进行曲线拟合可获得空间相干度 γ 的测量值,选择不同的双缝间距 D (也即选择不同的空间频率值)测得相应的空间相干度,即可进行反傅氏变换得到原始束斑的截面分布曲线。

实际应用中改变狭缝间距完成多点相干度的测量耗时过长,数据刷新率过低,仅在特别精细的束斑尺寸测量(例如发射度精确测量)中需要,而日常的束斑尺寸监测可以考虑采用更为简化的公式。因电子储存环中电子束团的截面分布近似高斯分布,以高斯分布函数代入相干度计算式(1)中可以推导出束团高斯分布尺寸 σ 与空间相干度 γ 间的关系

$$\sigma = \frac{\lambda R}{\pi D} \sqrt{-\frac{\ln \gamma}{2}}$$

(4)

所以常用的束斑尺寸监测系统采用固定狭缝间距,测定单一空间频率的相干度数据后再根据式(4)计算得到束斑尺寸。

2 上海光源同步光空间干涉仪设计

为了实现对电子束流发射度、束团长度等参数的精确测量,上海光源束测组以第一单元第二块弯铁的 3° 线作为引出光源点建立了专用的同步光(可见光波段)电子束流诊断线站^[9],其中束斑尺寸的测量采用空间干涉仪的方法实现。

2.1 工艺设计

光源点同步光经隧道内光学前端引出至实验室光学平台后,其桌面的干涉仪光路布局如图 2 所示,主要的系统参数及设备选型确定如下:

(1)引出光经半透半反镜后,分为两条光路分别构成垂直、水平方向两个干涉仪,水平方向光源点至双缝的距离为 18.77 m,垂直方向光源点至双缝的距离为 18.47 m;

(2)光路中插入带通滤波片及水平方向偏振片,以获得水平方向偏振的准单色光,综合考虑信号强度、光学器件的市场化程度、待测束斑尺寸大小(数十 μm 量级)等因素后确定工作中心波长为 550 nm,带宽 40 nm;

(3)双缝后的聚焦成像光路采用反射式聚焦系统,以降低色差的影响,同时可增大成像系统焦距以使得 CCD 获取到的干涉条纹图像较大,反射镜焦距为 2 m;

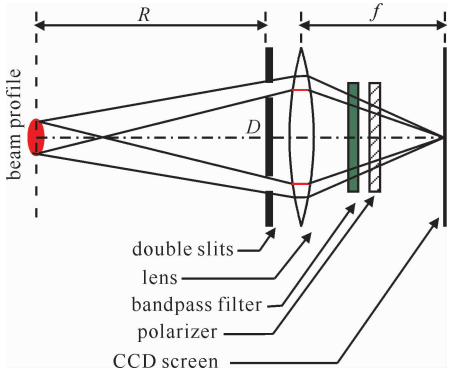


Fig. 1 Conceptual diagram of spatial interferometer

图 1 空间干涉仪原理示意图

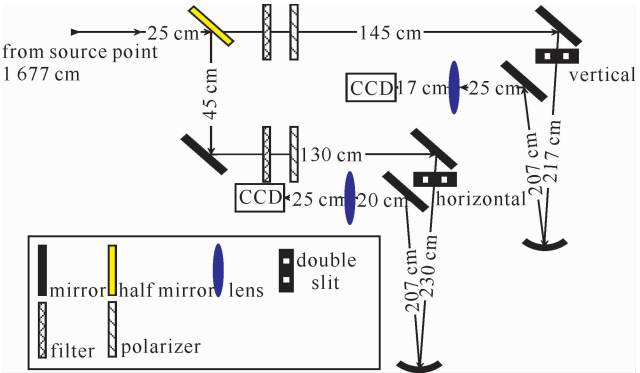


Fig. 2 Optical layout of SSRF interferometers

图 2 上海光源空间干涉仪光路布局

(4) CCD 前成像用目镜选用 SMC PENTAX XP-14 型镜片组, 焦距 14 mm, 通光孔径 12 mm;

(5) 根据待测束斑尺寸的大小(水平方向设计值 $53.0 \mu\text{m}$, 垂直方向设计值 $22.0 \mu\text{m}$), 确定日常监测用的双缝间距为 27.5 mm(水平方向)和 60.0 mm(垂直方向), 对应的空间相干度约为 0.7, 此时相干度的随机测量误差较小。参考 KEK 空间干涉仪调试运行的经验, 采用方孔替代狭缝获取到的干涉条纹图像更为理想, 故实测中采用 5 mm 见方的小孔作为空间频率滤波器;

(6) 图像采集选用了线性相对较好的 Point Grey 公司的 FL2-08S2 型 CCD, 光强分辨力为 8 位, 探测器 640×480 像素, 每像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m}$, 采用 1394 数字化接口, 便于控制及数据获取。

2.2 数据处理算法

实测得到的干涉条纹原始图像如图 3 所示, 因为采用方孔替代狭缝作为空间频率滤波器, 其干涉条纹的包络是一个 2 维的 sinc 函数, 所以选取中心区域的图像数据用于相干度分析可以得到较好的信噪比。具体处理中采用如下方法获得干涉条纹曲线: 首先沿干涉条纹的方向(图 3 中水平方向)对原始数据求和, 获得该方向强度分布曲线, 寻峰找到该曲线的极大值坐标作为干涉图像的中心位置, 以该坐标为中心选取垂直方向正负 5 行像素点的原始数据求和, 即可得到干涉条纹曲线, 如图 4 所示。

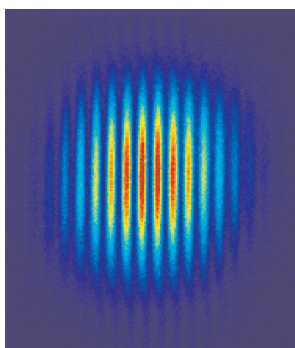


Fig. 3 Acquired interference image

图 3 实测得到干涉条纹原始图像

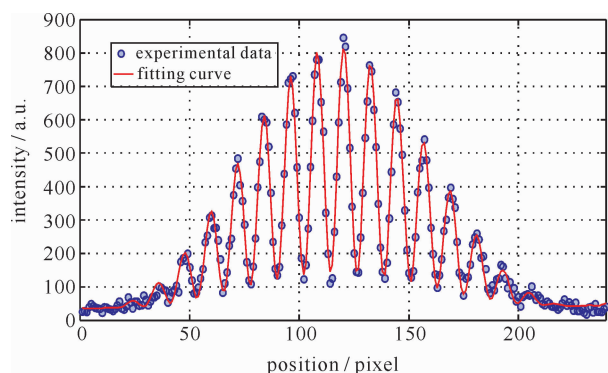


Fig. 4 Profile of interference fringes

图 4 原始图像投影得到干涉条纹曲线

从工艺设计结果可知, 实测得到的干涉条纹由准单色光形成, 必须在通带范围内对式(2)进行积分才能得到更为精确的干涉条纹强度表达式, 再加入整个图像采集系统中可能存在的本底噪声影响, 因此最终用于干涉条纹拟合的目标函数定义为

$$I(y) = a_1 + a_2 y + \sum_{i=1}^n f_i(\lambda_i) a_3 \left\{ \text{sinc} \left[\frac{\lambda_0}{\lambda_i} a_4 (y - a_5) \right] \right\}^2 \left\{ 1 + a_6 \cos \left[\frac{\lambda_0}{\lambda_i} a_7 (y - a_8) \right] \right\} \quad (5)$$

数据处理时需要完成 $a_1 \sim a_8$ 这 8 个系数的拟合, 其中 a_1 为所获取图像中的随机本底噪声, a_2 为因 CCD 芯片量化时间差异而引入的一个像素点位置相关的信号畸变误差, a_3 为由同步光光强确定的一个常数, a_4 为由狭缝点扩散函数宽度确定的一个常数, a_5 为狭缝点扩散函数中心位置(初始相位), a_6 为待测的空间相干度, a_7 为由干涉条纹周期确定的一个常数, a_8 为干涉条纹中心位置(初始相位); $f_i(\lambda_i)$ 为带通滤波片频幅响应函数; λ_0 为带通滤波片中心波长; λ_i 为通带内数值积分时第 i 个波段的平均波长。

完成上述数据拟合后, 即可将拟合出的 a_6 代入式(4)中计算得到束斑尺寸。

2.3 数据采集处理软件设计

空间干涉仪数据采集处理软件需要实现原始图像数据回读、干涉条纹曲线拟合、束斑尺寸计算等功能, 并在 EPICS 框架内实现与控制系统的接口, 向加速器物理学家和中控室的操作人员提供束斑尺寸数据。根据这一要求, 空间干涉仪数据采集处理软件在 Windows 平台上采用 LabVIEW 图形化编程语言进行开发, 通过 Shared Memory IOCcore 技术来实现 EPICS 的数据接口, 完成 LabVIEW 应用程序和控制系统之间的数据交换。其结构如图 5 所示。

其中在 LabVIEW 平台上运行的 1394 接口驱动程序(1394 driver)完成硬件的初始化及原始数据的采集, 主控程序完成干涉条纹曲线拟合、束斑尺寸计算。作为 Windows 应用程序运行的 EPICS Shared Memory IOC 生成一个运行数据库同控制系统的接口。主控程序和运行数据库之间则通过调用共享内存动态连接库(Shared Memory DLL)访问同一个共享内存区域来实现数据交换。

3 系统调试及束流试验

上海光源空间干涉仪自 2007 年 12 月完成现场安装,经过半年时间的调试,于 2008 年 6 月投入在线运行,之后在上海光源试运行的过程中不断对系统参数进行优化,目前已基本冻结所有系统配置参数,将系统随机测量误差控制在了亚 μm 量级。

3.1 光路稳定性

系统调试的初期发现获取到的干涉条纹中心位置(初始相位)晃动较严重,对不同环境条件下的带束测量数据进行分析后,确定这一晃动不是束流轨道的变化,而是来自于干涉仪光路中的不稳定因素,采取以下手段对干涉仪工作环境进行优化后,问题得到解决:

- (1)传输光路所用的连接储存环隧道与同步光实验室的管道两端加装玻璃密封窗(平面度好于 $\lambda/10$ 以避免引入较大波前畸变),防止因两端温差产生的气流扰动;
- (2)桌面光路在测量过程中采用屏蔽罩遮盖,防止实验室内环境气流扰动及周围杂散光对原始图像数据的影响;
- (3)光路中的所有遥控部件(主要是遥控反射镜)在测量过程中全部关闭电源,避免因驱动设备的待机噪声(主要是步进电机带电状态的微小振动)对原始图像数据的影响。

3.2 CCD 参数配置

图像数据采集所用的 CCD 有两个配置参数可用于调整量化前的输入信号强度,分别是放大器的增益和曝光时间,在确定的光强条件下可以通过不同的放大器的增益和曝光时间组合获得基本相近的输入信号强度,但不同配置条件下的图像数据信噪比不同,由此进行束斑尺寸测量的随机误差也不同。为确定系统最佳的配置,在 100 mA 流强条件下采用不同的参数配置组合进行了测试,结果如图 6 所示,分析测试结果可得如下推论:当 CCD 放大器增益越高(同时需要减小曝光时间以避免饱和),电子学的本底热噪声越大,测量数据的方差越大;在同一增益条件下,测量数据方差与曝光时间近似为线性关系,曝光时间越长方差越小;但当 CCD 曝光时间设置过长(超过 200 ms)时,方差反而增大,其原因有可能是过长的数据采集时间将束流位置的慢变化耦合到束斑尺寸测量当中。

根据上述分析确定最优化的运行参数配置为系统增益 0 dB,曝光时间 200 ms。

3.3 储存环束斑尺寸测量

上海光源储存环电子束流的发射度必须通过束斑尺寸的测量来确认,为提高束斑尺寸测量的精度,采用不同间距的双缝对整个相干度曲线进行了测定,根据相干度曲线的拟合结果来计算束斑尺寸。水平方向相干度曲线实测数据及拟合结果如图 7 所示。

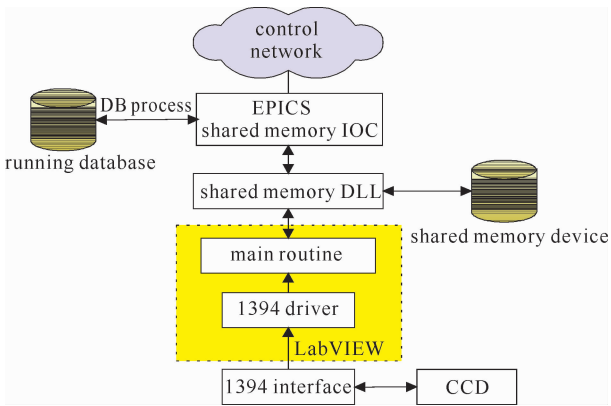


Fig. 5 Software architecture of SSRF interferometer
图 5 上海光源空间干涉仪软件结构

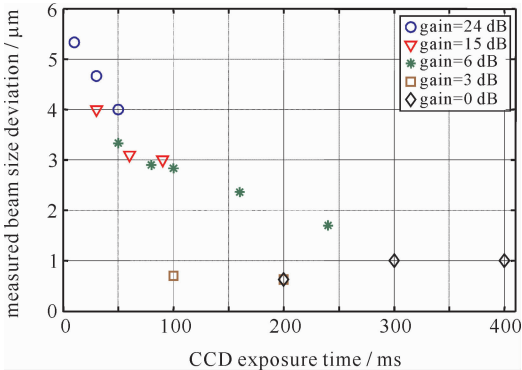


Fig. 6 CCD configuration test
图 6 CCD 参数配置测试

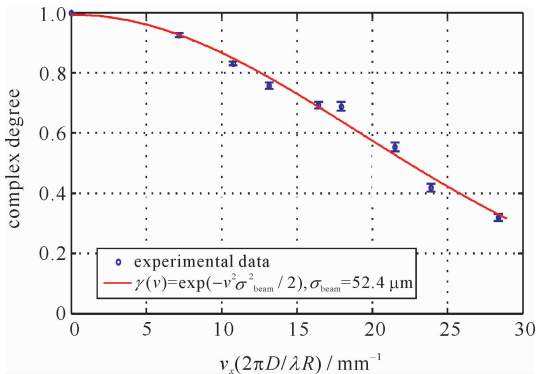


Fig. 7 Measured horizontal complex-degree-of-coherence curve
图 7 实测水平方向空间相干度曲线

从以上测量结果可知,上海光源储存环束斑水平方向的空间相干度曲线近似高斯分布,与理论预期相符,根据高斯拟合的相干度曲线计算得到的束斑水平方向尺寸为 $52.4 \mu\text{m}$,与理论设计值 $53.0 \mu\text{m}$ 吻合。

采用单一固定狭缝从简化式(4)计算得到的束斑尺寸如表 1 所示。从表中结果可知,因不同缝间距对应的反射镜热形变不一致,由此引入的系统误差也大小不一,本次实验中与理论预期值偏差最大的是狭缝间距为 30 mm 的测量点,偏差约 10%。在线运行的空间干涉仪采用 27.5 mm 间距的双缝,对应的空间相干度约为 0.7,此时因反射镜热形变引入的系统测量误差和空间相干度测量的随机误差都比较小,是一个较为优化的配置。

表 1 不同缝间距时采用简化公式测得束斑尺寸

Table 1 Measured beam sizes with various slits separations using simplified formula

slits separation/mm	beam size/ μm	measurement uncertainty/ μm
12.0	54.8	1.3
18.0	56.5	0.6
22.0	56.6	0.6
27.5	52.1	0.5
30.0	48.3	0.6
36.0	50.5	0.7
40.0	55.2	0.2
47.5	53.2	0.4

3.4 误差分析

在线运行的空间干涉仪采用固定间距双缝,因此误差分析将主要针对式(4)进行,根据这一公式推导出的测量系统误差传递公式为

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \sqrt{(\frac{\Delta\lambda}{\lambda})^2 + (\frac{\Delta R}{R})^2 + (\frac{\Delta D}{D})^2 + (\frac{\Delta\gamma}{2\gamma\ln\gamma})^2}$$

(6)

实测中, λ,R,D 均采用离线测量数据,而 γ 为在线实时测量值,因此 λ,R,D 的测量误差在此处的贡献为系统测量误差,而 γ 值的贡献为随机测量误差。代入系统参数的典型值($\lambda=550\text{ nm},\Delta\lambda=5\text{ nm},R=18.77\text{ m},\Delta R=0.01\text{ m},D=27.5\text{ mm},\Delta D=0.5\text{ mm},\gamma=0.70,\Delta\gamma=0.01$)计算得到总的测量误差约为 5.5%,其中最主要的误差来源是 γ 值的随机测量误差。

4 结 论

根据上海光源储存环束流发射度及束斑尺寸测量的需求,上海光源束测组设计研制了同步光空间干涉仪用于在线监测束斑尺寸。束流实验结果证明上海光源储存环电子束斑同步辐射光满足空间相干度测量条件,可以采用空间干涉仪进行束斑尺寸测量。经过多次带束实验的测试和优化,目前干涉仪系统的配置参数已基本固定并投入在线运行,可以对水平方向束斑尺寸进行精确测量,对水平、垂直两个方向束斑尺寸的动态变化情况进行实时监测。根据水平方向空间相干度曲线的测量结果计算得到的束斑尺寸为 52.4 μm ,与理论设计值 53.0 μm 相比差异小于 2%。空间干涉仪测量误差的主要来源为相干度的随机测量误差,在现有配置条件下,总的测量误差约为 5.5%。

第一面反射镜受到同步光照射后的热形变,是空间干涉仪在强流工作条件下的主要瓶颈,采用小孔阵列投影方法的离线镜面形变标定^[10],或是采用激光测距方法的原位镜面形变测量及补偿,将是系统进一步优化的方向。

致 谢 束流实验得到了上海光源束测组、运行组及物理组其他同事的大力支持,日本 KEK 的三桥利行博士在系统设计研制中给予了指导和帮助,在此表示感谢!

参考文献:

[1] Ferianis M. Optical techniques in beam diagnostics[C]//Proc of European Particle Accelerator Conference. 1998;159-163.

[2] Andersson A, Chubar O. Beam profile measurements with visible synchrotron light on MAX II[C]//Proc of European Particle Accelerator Conference. 1996;1689-1691.

[3] Nakamura N, Sakai H, Iida K, et al. Electron-beam size measurement with a beam profile monitor using Fresnel zone plates[C]//Proc of Particle Accelerator Conference. 2003;530-532.

[4] Thomas C, Rehm G. Pinhole camera resolution and emittance measurement[C]//Proc of European Particle Accelerator Conference. 2008;

1254-1256.

- [5] Tordeux M, Cassinari L, Chubar O, et al. Ultimate resolution of Soleil X-ray pinhole camera[C]//Proc of Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerator Conference. 2007;180-182.
- [6] Yamamoto Y, Sakaib I, Mitsuhashi T, et al. Interferometric measurement of the beam size in the compact storage ring[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 2001, **467-468**(2):921-924.
- [7] Naito T, Mitsuhashi T. Very small beam size measurement by reflective SR interferometer at KEK-ATF[C]//Proc of European Particle Accelerator Conference. 2006;1142-1144.
- [8] Leng Yongbin, Ye Kairong, Zhou Weimin, et al. SSRF beam diagnostics system commissioning[C]//Proc of Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerator Conference. 2009;24-26.
- [9] Ye Kairong, Leng Yongbin, Chen Jie. Synchrotron radiation monitor and mirror at SSRF[C]//Proc of Diagnostics and Instrumentation for Particle Accelerator Conference. 2009;381-383.
- [10] Takeuchi N, Mitsuhashi T, Itoh M, et al. Wavefront distortion measurement of a SR extraction mirror for the beam profile monitor using Shack-Hartmann method[C]//Proc of Particle Accelerator Conference. 1997;859-861.

Development of Shanghai Synchrotron Radiation Facility synchrotron radiation interferometer

Chen Jie, Ye Kairong, Leng Yongbin

(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 800-204, Shanghai 201800, China)

Abstract: Synchrotron radiation interferometers, based on Van Cittert-Zernike theorem, are developed to measure the electron transverse beam size and emittance in the Shanghai Synchrotron Radiation Facility(SSRF) storage ring. The major engineering considerations including the optical layout, key devices, signal processing method and software architecture of data acquisition are analyzed. The system commissioning and optimization of operation parameters have been done with beam experiments. The beam experimental results show that measurement accuracy depends significantly on CCD gain and exposure time setting. Random measurement uncertainty is minimized to micron level with CCD setting of 0 dB gain and 200 ms exposure time. The electron transverse beam size of SSRF storage ring is measured precisely. Measurements show that the visibility curve agrees with Gaussian distribution, which qualifies the simplified formula in easy beam size calculation using single slits separation datum. The deviation of the measured horizontal beam size $52.4\ \mu\text{m}$ from the designed value $53.0\ \mu\text{m}$ is less than 2%. The measurement error of the spatial interferometers is about 5.5%, which is mainly contributed to by the measurement uncertainty of interference visibility.

Key words: spatial interferometer; beam size measurement; beam diagnostics; synchrotron radiation; Shanghai Synchrotron Radiation Facility