



·粒子束及加速器技术·

# 同步辐射束流尺寸测量干涉仪的设计与仿真\*

孙良伟, 罗 箐

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 合肥 230029)

**摘 要:** 基于同步光的干涉法, 是一种非拦截高精度的束流截面测量手段。相比传统成像法, 干涉法可以测量更小的束团尺寸、分辨率更好, 较短测量波长下有望获得亚  $\mu\text{m}$  级的分辨率, 因此在同步辐射光源中得到广泛应用。对合肥光源 HLS II 的原有同步光干涉装置, 提出了将原有的干涉光路中第一面聚焦透镜换成 RC 结构聚焦反射镜, 第二面单透镜换成双胶合透镜, 以达到在不改变光路光轴情况下减小色散和几何像差, 从而提高光路成像质量的目的。采用几何光路设计方法对成像质量进行评价, 并进行物理光学仿真计算, 得到测量系统的干涉条纹。仿真结果表明: 光学系统成像的艾里斑半径减小约 35%, 点列图的均方根半径减小了约 99%, 波前差也减小了约 75%, 调制传递函数 (MTF) 的截止频率提高了约 65%, 采用聚焦反射镜代替原有的聚焦透镜可大幅提升光路成像质量。

**关键词:** 同步辐射; 干涉仪; RC 聚焦反射镜; 束流横向尺寸; 光路设计

中图分类号: TL506

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210236

## Design and simulation of interferometer for synchrotron radiation beam size measurement

Sun Liangwei, Luo Qing

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

**Abstract:** The interferometric measurement of the transverse beam size based on synchrotron radiation is a non-intercepting high precision measurement method. Compared with the imaging method, the interferometric method can measure smaller beam size and get better resolution. It is expected to obtain submicron resolution at shorter measurement wavelength, so it is widely used in synchrotron radiation sources. The upgraded scheme of current interference device in Hefei Light Source HLS-II is presented in this paper. It is proposed to replace the first focusing lens in the original interference light path with an RC structure focusing mirror, and the second single lens with a doublet lens. The design goal of this paper is to reduce dispersion and geometric aberration without changing the optical axis of the optical path, so as to improve the imaging quality of the optical path. The geometrical optical path design is used to evaluate the imaging quality of the optical path, and physical optical simulation is performed to obtain the interference fringes of the measurement system. The simulation results show that the radius of Airy spot is reduced by about 35%, the root mean square radius of dot array is reduced by about 99%, the wavefront difference is reduced by about 75%, and the cutoff frequency of MTF function is increased by about 65%, using a focusing mirror to replace the original focusing lens can greatly improve the image quality of the optical path.

**Key words:** synchrotron radiation; interferometer; RC focusing mirror; transverse beam size; optical design

束流横向尺寸是粒子加速器和运输线的基本束流参数之一, 国内外加速器都非常重视束流横向截面尺寸的测量。最常见的有基于光学、基于扫描丝的束流横向尺寸测量方法。基于同步光的光学测量方法是非拦截测量手段, 运用最为广泛, 相应的方法包括同步光成像法、同步光投影法和同步光干涉法。其中, 同步光干涉法结构简单、装置成本适中, 以及测量分辨率高而被广泛应用, 美国 JLab<sup>[1]</sup>, SLAC 的 PEP-II<sup>[2]</sup> 和 SPEAR-3<sup>[3]</sup>、德国 BESSY

\* 收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-08-08

基金项目: 国家自然科学基金大科学装置联合基金培育项目 (U1832169); 中国科学技术大学“双一流”建设项目

作者简介: 孙良伟 (1997—), 男, 硕士, 从事加速器束流诊断研究。

通信作者: 罗 箐 (1984—), 男, 副教授, 博士, 从事束流物理与加速器技术研究。

II<sup>[4]</sup>及日本 SPring-8<sup>[5]</sup>等都进行了相关的实验研究;国内北京光源 BEPC II<sup>[6]</sup>、上海光源 SSRF<sup>[7]</sup>以及国家同步辐射实验室 HLS II<sup>[8-9]</sup>均利用同步光干涉法测量束流横向尺寸。

为了进一步减小色差对成像的影响、从而提高测量分辨率,并且保证在低流强的情况下仍能准确测量束流尺寸,上海光源 SSRF<sup>[10]</sup>、KEK ATF<sup>[11]</sup>和 SPEAR-3<sup>[12]</sup>等的同步光干涉测量装置中第一面物镜均采用聚焦反射镜进行成像。这样虽然减小了色散,但是由于单面聚焦反射镜的加入,使光路光轴发生偏转,明显增加了光路准直、调试的难度,也可能引入更多的误差。针对这种情况,本文提出了一种新型干涉光路,采用天文观测领域常用的 RC 聚焦反射镜,减小色散的同时不改变光轴,利用光学设计软件进行建模和仿真,利用 SRW(Synchrotron Radiation Workshop)进行物理光学传播模拟,模拟仿真证明成像系统能显著降低几何像差和色差,得到符合预期的干涉条纹。

## 1 原 理

图 1 为干涉仪的示意图。带有双狭缝的同步辐射光干涉仪是一种波前分隔型双光束干涉仪,利用准单色偏振光进行干涉,通过测量一阶相干度,获得弯铁中发光的电子束团截面的水平和垂直尺寸<sup>[13]</sup>。双缝对入射波前进行采样,得到沿纵轴或横轴的一维干涉图样。

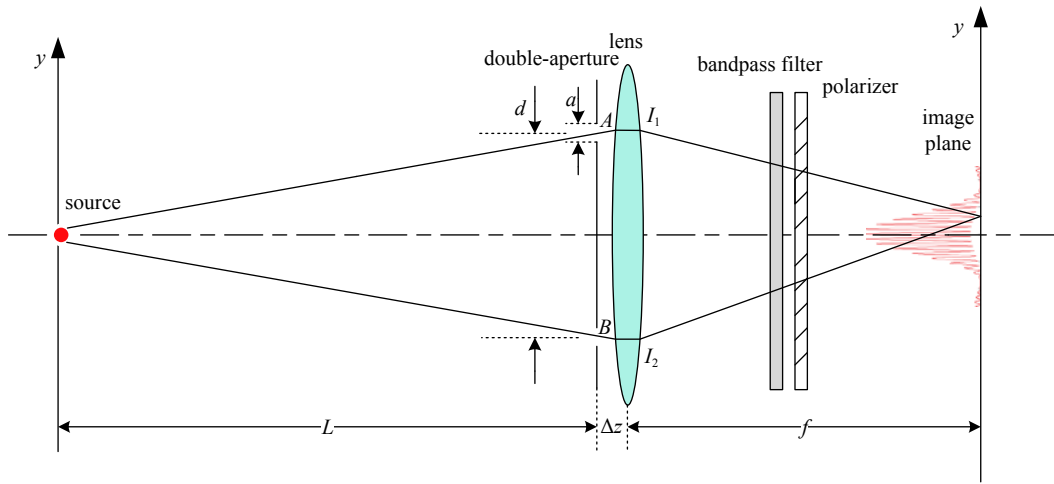


Fig. 1 Schematic diagram of interferometer  
图 1 干涉仪示意图

图 1 所示为沿纵轴即垂直方向干涉,在探测器平面上得到的干涉图样强度为<sup>[14-16]</sup>

$$I(y) = (I_1 + I_2) \left[ \text{sinc} \left( \frac{\pi a}{\lambda f} y \right) \right]^2 \left[ 1 + V \cos \left( \frac{2\pi d}{\lambda f} y + \varphi \right) \right] \quad (1)$$

式中:  $y$  是探测器上位置坐标;  $a$  是狭缝的宽度(垂直方向尺寸);  $d$  为双缝的间距;  $f$  为干涉条纹图到聚焦透镜组的像方主点的距离;  $\lambda$  是同步光波长;  $\varphi$  是干涉条纹的相位;  $I_1$  和  $I_2$  分别是双缝处的光强;  $V$  是干涉图样的可见度,由干涉条纹的最大最小光强决定,即

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma| \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  是双缝处的空间复相干度。若双缝处的光强相等时,空间复相干度的绝对值  $|\gamma|$  等于干涉条纹可见度  $V$ 。

根据 Van Cittert-Zernike 理论,若非点光源发出的光在空间上不完全相干,则在某平面上光源发出的所有分别经过平面上  $A$  和  $B$  两点的光在  $A$  和  $B$  两点的相干度  $\gamma(v)$  由光源的空间截面  $f(y)$  的傅里叶变换得到<sup>[13]</sup>

$$\gamma(v) = \int f(y) e^{-i2\pi v y} dy \quad (3)$$

式中:  $v$  为空间频率,  $v = 2\pi d / \lambda L$ ,  $\lambda$  为光波长,  $d$  是两狭缝的中心距离,  $L$  为光源点到狭缝的距离。对于高斯分布的同步光强

$$f(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad (4)$$

于是相干度  $\gamma(v)$  的计算公式可以简化为

$$|\gamma(v)| = V = \exp \left[ -2 \left( \frac{\pi \sigma_y d}{\lambda L} \right)^2 \right] \quad (5)$$

其中 $\sigma_y$ 是同步光横向垂直尺寸,假设双缝处光强相等,则可得到垂直方向截面尺寸表达式

$$\sigma_y = \frac{\lambda L}{\pi d} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{|\gamma|} \right)} = \frac{\lambda L}{\pi d} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{V} \right)} \quad (6)$$

同理可得束流水平方向截面尺寸

$$\sigma_x = \frac{\lambda L}{\pi d} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{V_x} \right)} \quad (7)$$

用 CCD 摄像机测量干涉条纹强度分布,并利用公式(1)进行拟合,结合公式(2)就可以得到干涉条纹相干度 $|\gamma|$ ,将拟合得到的相干度数值代入公式(6)或(7)中得到束流横向尺寸。

## 2 光路设计

### 2.1 光路布局

HLSII 在耦合度为 10% 情况下,理论上计算得到的 B8 光源点处束流截面水平方向和垂直方向的尺寸分别为 0.218 mm 和 0.1595 mm。本文设计的利用卡塞格林式 RC 聚焦反射镜干涉仪光学系统示意图如图 2 所示。

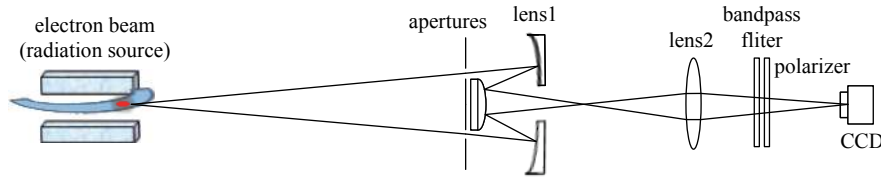


Fig. 2 Schematic of the optical system of the interferometer

图 2 干涉仪光学系统示意图

干涉仪利用偏振准单色光进行干涉,中心波长为 $\lambda$ ;同步光经隧道内光学前端引出至实验室光学平台后,通过双狭缝,单个狭缝尺寸为 $w_x \times w_y$ ;双狭缝间距为 $d$ ;狭缝后紧贴的是 RC 聚焦反射镜(lens1),组合焦距为 $f_1$ ,起到压缩干涉发生的区域,使干涉条纹更亮,便于 CCD 采集图像及处理的作用;第二块透镜是一块双胶合透镜,焦距为 $f_2$ ,起到调节干涉条纹大小,方便 CCD 探测的目的;滤波片的带宽为 $\Delta\lambda$ ;利用偏振片选取水平方向偏振光。

反射镜成像没有色差,所以有些研究机构利用凹面聚焦反射镜代替第一块物镜,希望提高成像分辨率<sup>[10-12]</sup>。但使用单面聚焦反射镜会改变光路原有前进方向,这将增加光路准直与调节的难度,因此本文改为采用经典的卡塞格林系统。根据初级像差理论,消除球差和彗差的 RC 结构聚焦反射镜,在相对口径较小时,成像质量非常高。RC 结构与传统的凹面聚焦反射镜相比,增加了一块副镜反射镜,把第一面主镜反射镜的焦点加以翻折,引出到主镜背后,整个系统光路经过翻折,使得结构非常紧凑,可以在很小的体积内实现很长的焦距,而且观测视线和光路光轴方向一致,便于光路调节。

### 2.2 狭缝的间距

狭缝的间距设置需要考虑以下因素:对相干度的影响、同步光的张角和 RC 镜的副镜限制。干涉图样的光强分布( $y$ 方向, $I_1 = I_2$ )

$$I(y) = I_0 \left[ \text{sinc} \left( \frac{\pi a}{\lambda f} y \right) \right]^2 \left[ 1 + V \cos \left( \frac{2\pi d}{\lambda f} y + \varphi \right) \right] \quad (8)$$

式中: $I_0$ 是双缝处光强之和; $a$ 是狭缝宽度; $f$ 为干涉条纹图到聚焦透镜组的像方主点的距离; $d$ 是狭缝间距; $\varphi$ 是干涉条纹相位差。对于高斯型光束

$$|\gamma| = V = e^{-2 \left( \frac{\pi \sigma_y d}{\lambda L} \right)^2} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8)得

$$I(y) = I_0 \left[ \text{sinc} \left( \frac{\pi a}{\lambda f} y \right) \right]^2 \left[ 1 + e^{-2 \left( \frac{\pi \sigma_y d}{\lambda L} \right)^2} \cos \left( \frac{2\pi d}{\lambda f} y + \varphi \right) \right] \quad (10)$$

令

$$I_{av} = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} = \frac{\left(I_0 \text{sinc}^2\left(\frac{\pi a}{\lambda f} y\right)(1 + |\gamma|)\right) + \left(I_0 \text{sinc}^2\left(\frac{\pi a}{\lambda f} y\right)(1 - |\gamma|)\right)}{2} = I_0 \text{sinc}^2\left(\frac{\pi a}{\lambda f} y\right) \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)得

$$I(y) = I_{av} \left[ 1 + e^{-2\left(\frac{\pi \sigma_y d}{\lambda L}\right)^2} \cos\left(\frac{2\pi d}{\lambda f} + \varphi\right) \right] \quad (12)$$

在干涉图样强度最大值处, 则式(12)简化为

$$I(y) = I_{av} \left[ 1 + e^{-2\left(\frac{\pi \sigma_y d}{\lambda L}\right)^2} \right] \quad (13)$$

对式(13)进行微分

$$\frac{dI}{d\sigma_y} = I_{av} e^{-2\left(\frac{\pi \sigma_y d}{\lambda L}\right)^2} \left( -4 \frac{\pi \sigma_y d}{\lambda L} \frac{\pi d}{\lambda L} \right) \quad (14)$$

由式(9)两边取对数得

$$\frac{\pi \sigma_y d}{\lambda L} = \sqrt{\frac{\ln|\gamma|}{-2}} \quad (15)$$

将式(9), 式(15)代入式(14)得

$$\frac{dI}{d\sigma_y} = \frac{-2I_{av} |\gamma| \ln|\gamma|}{\sigma_y} = \frac{-2I_{av} V \ln V}{\sigma_y} \quad (16)$$

$$\frac{d\sigma_y}{\sigma_y} \bigg/ \frac{dI}{I_{av}} = \frac{1}{-2V \ln V} \quad (17)$$

式中:  $dI/I_{av}$  是探测器可以监测到的最小相对变化, 假设为 0.01, 则图 3 纵轴的值可以看成是百分比。选择相干度在 0.1~0.7 的范围内, 相对误差可控制在 15% 以内<sup>[17-18]</sup>。

根据式(5), 给出束流尺寸  $\sigma$ , 测量波长  $\lambda=500 \text{ nm}$ , 假设光源到狭缝距离  $L=10.8 \text{ m}$  (HLS II 现有测量光路设计值), 绘制出干涉条纹相干度随狭缝间距的关系图, 如图 4 所示。可以看出, 选择相干度在 0.1~0.7 的范围内, 狭缝间距越大, 越适合测量更小尺寸的束流。

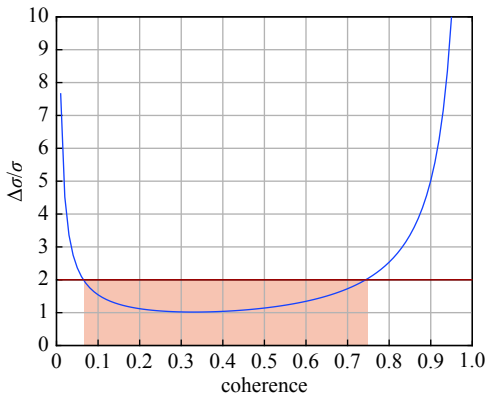


Fig. 3 Change of beam size measurement error with coherence

图 3 束流尺寸测量误差随相干度的变化

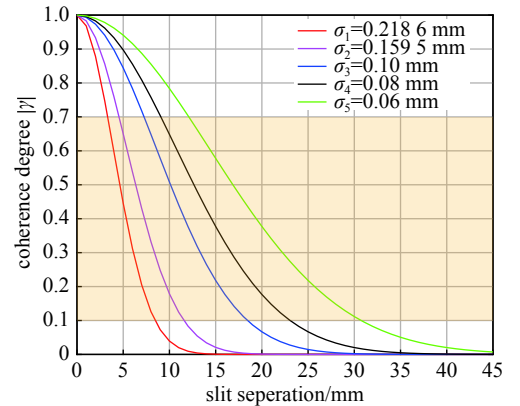


Fig. 4 Change of coherence with the slit separation

图 4 相干度随狭缝间距的变化

合肥光源在 B8 光束真空腔内反射铜镜的有效张角为  $4.7 \text{ mrad}$ <sup>[9]</sup>, 假设狭缝距光源  $10 \text{ m}$ , 则狭缝的最大间距可设置约为  $47 \text{ mm}$ 。RC 聚焦反射镜如图 5 所示, 双缝的间距不能小于副镜的口径, 否则会阻挡光路的传播。设计的副镜直径为  $14 \text{ mm}$ , 测量束流横向尺寸时, 狭缝间距应尽量选择  $14 \text{ mm}$  以上, 设置水平干涉仪狭缝间距为  $18 \text{ mm}$ , 垂直干涉仪狭缝间距为  $16 \text{ mm}$ 。但是从图 4 可知, 当缝间距为  $14 \text{ mm}$  以上时, 对于 HLS II 的光源尺寸, 相干度几乎为零, 所以对原光路设计值中, 光源到狭缝距离  $L=10.8 \text{ m}$  进行修正。

### 2.3 光源到狭缝的距离

为了在较大缝距的情况下仍能得到较好的干涉相干度,利用式(5),将光源到狭缝间距 $L$ 设置为自变量,假定狭缝间距为16 mm,得到如图6所示。

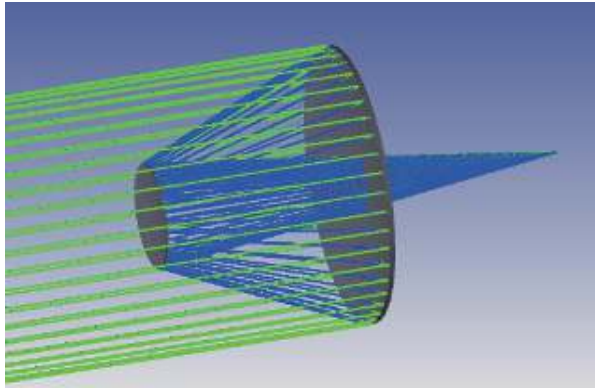


Fig. 5 Schematic of RC focusing mirror  
图5 RC聚焦反射镜示意图

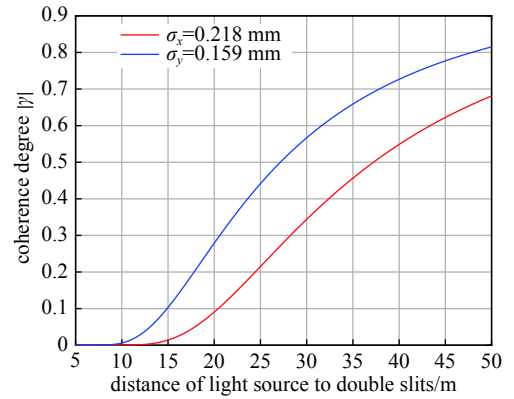


Fig. 6 Relationship between the distance between the light source and the slit and the degree of coherence  
图6 光源到狭缝间距与相干度的关系

考虑到干涉条纹相干度取值范围尽可能在0.1~0.7的范围内,所以垂直干涉仪和水平干涉仪光源到狭缝间的间距分别为30 m和40 m。

### 3 模拟仿真

波长选择500 nm、带宽10 nm的准单色偏振光,干涉仪的部分参数如表1所示。

表1 干涉仪光路结构参数

Table 1 Structure parameters of interferometer

$L_x/m$	$L_y/m$	$\lambda/nm$	$\Delta\lambda/nm$	$w_x \times w_y$		$d_y/mm$	$d_x/mm$	$f_1/mm$	$f_2/mm$
				vertical	horizontal				
40	30	500	10	2 mm × 1 mm	1 mm × 2 mm	16	18	1000	100

图7为干涉仪的仿真模拟图。将模拟得到的光路质量评价结果与HLS II的原设计结果进行比较,如表2所示,光路质量有了显著提升:光学系统成像的艾里斑半径减小约35%,点列图的均方根半径减小了约99%,波前差也减小了约75%,MTF函数的截至频率提高了约65%,可以看出新结构干涉仪光路比原光路在成像质量上有了显著的提升。

进一步地,研究者利用SRW对光路进行了模拟,垂直干涉仪和水平干涉仪得到的模拟结果如图8、图9所示。

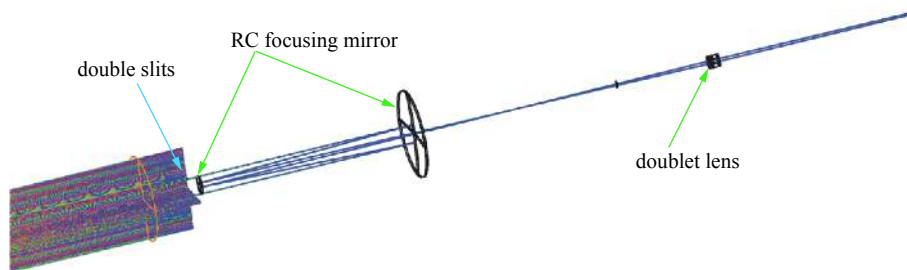


Fig. 7 Simulation diagram of interferometer  
图7 干涉仪仿真模拟图

表2 干涉仪光路质量评价结果对比

Table 2 Comparison of the results of interferometer optical path quality evaluation

	Airy disk radius/ $\mu m$	RMS radius of spot diagram/ $\mu m$	wave front error/ $\lambda$	cut-off frequency of MTF/(lp·mm <sup>-1</sup> )
original design	56.55	24.25	0.207	20.2
new design	36.48	0.05	0.050	33.5

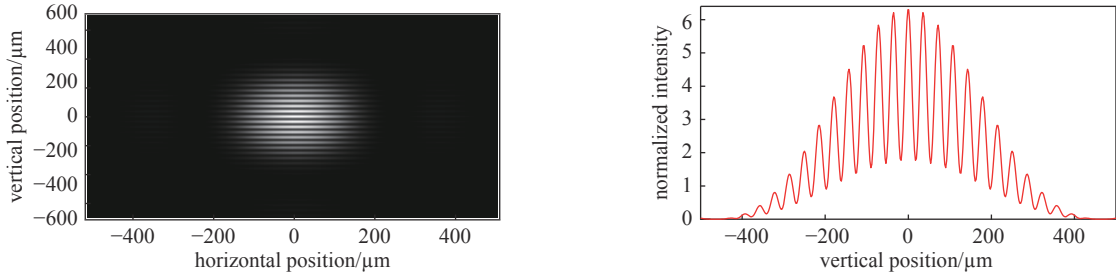


Fig. 8 Vertical interference fringes and fitting graph ( $L=30\text{ m}$ ,  $d=16\text{ mm}$ )

图 8 垂直方向干涉条纹和拟合图 ( $L=30\text{ m}$ ,  $d=16\text{ mm}$ )

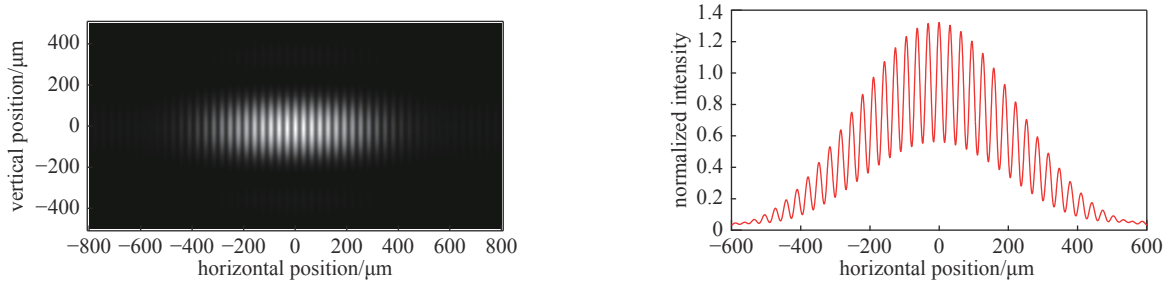


Fig. 9 Horizontal interference fringes and fitting graph ( $L=40\text{ m}$ ,  $d=18\text{ mm}$ )

图 9 水平方向干涉条纹和拟合图 ( $L=40\text{ m}$ ,  $d=18\text{ mm}$ )

对式(1)进行变形

$$I(y) = a_1 [\text{sinc}(a_2(y - a_3))]^2 [1 + a_4 \cos(a_5 y + a_6)] + a_7 y + a_8 \quad (18)$$

如图 10 所示, 利用式(18)对图 10 的曲线进行拟合, 就可以得到特定空间频率下的相干度  $|\gamma(\nu)|$ , 将拟合得到的相干度数值代入公式(6), (7)就可以算出束流截面尺寸  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ 。

对于垂直和水平干涉仪, 改变狭缝之间的间距, 得到相应的相干度和束流截面尺寸。仿真结果下表 3 所示, 垂直方向狭缝间距设置了 16, 18, 20 mm 三组, 仿真计算得到束流尺寸为  $161\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$ ; 水平方向狭缝间距设置了 16, 18, 20 mm 三组, 仿真计算得到束流尺寸为  $220\ \mu\text{m} \pm 10\ \mu\text{m}$ 。仿真计算结果与垂直和水平截面尺寸理论值  $159.5\ \mu\text{m}$  和  $218.6\ \mu\text{m}$  符合较好, 验证了此光路的可行性。

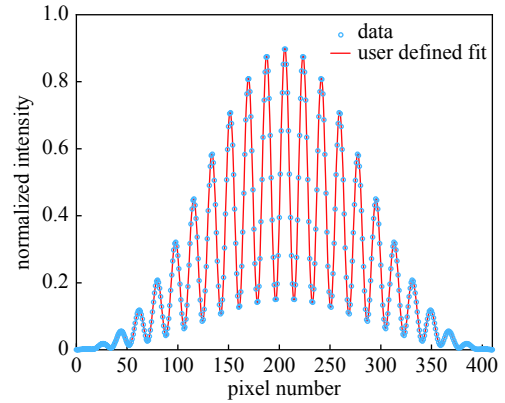


Fig. 10 Data points and fitted curve

图 10 数据点和拟合曲线

表 3 仿真结果

Table 3 Results of simulation

	$L/\text{m}$	$d/\text{mm}$	$ \gamma $	$\sigma/\mu\text{m}$
vertical profile	30	16	0.56	160.7
	30	18	0.47	162.9
	30	20	0.40	161.5
horizontal profile	40	16	0.52	227.5
	40	18	0.40	239.4
	40	20	0.42	209.6

## 4 测量误差和分辨率

### 4.1 光强的不平衡

在前面的推导过程中, 我们假设双缝处光强  $I_1 = I_2$ , 因为如果把每个电子产生的辐射看作一个球面波, 那么光的强度在所有方向上都是均匀分布的。如果因为光路等原因导致双缝处光强不相等, 假设光强不平衡因子

$\rho = I_1/I_2$ , 利用式(19)对相干度进行纠正。

$$|\gamma| = \frac{1+\rho}{2\sqrt{\rho}}V \quad (19)$$

如果实际测试中没有分别探测双缝处的光强, 没有进行校正, 需要研究光强不平衡对测量结果的影响大小。以垂直干涉仪为例, 理论上可以计算光强不平衡对相干度和光束尺寸测量的影响, 如表4所示。

表4 误差计算表

Table 4 Error calculation table

fitting value of visibility	true value of the degree of coherence	absolute error of visibility $u_{ \gamma }$	relative error of visibility $\delta_{ \gamma }$
$V_y = \frac{2\sqrt{\rho}}{1+\rho} \gamma_y $	$ \gamma_y $	$\frac{2\sqrt{\rho}}{1+\rho} \gamma_y  -  \gamma_y $	$\left(\frac{2\sqrt{\rho}}{1+\rho} \gamma_y  -  \gamma_y \right)/ \gamma_y $

相干度测量的相对误差为  $u_{|\gamma|} = \left(1 - \frac{2\sqrt{\rho}}{1+\rho}\right)$ , 以强度不平衡因子为自变量, 相对误差为因变量(此处取绝对值), 绘制如图11蓝色曲线所示。

根据误差传递<sup>[9]</sup>, 双缝光强不相等对束流尺寸的影响为(以垂直干涉仪为例)

$$u_\sigma = \frac{\sqrt{\left(\frac{\partial\sigma}{\partial|\gamma|}u_{|\gamma|}\right)^2}}{\sigma} = \frac{1}{-2\ln|\gamma|} \left(1 - \frac{2\sqrt{\rho}}{1+\rho}\right) \quad (20)$$

取相干度  $|\gamma| = 0.6$ , 束流尺寸测量的相对误差  $u_\sigma = 0.9788 \times \left(1 - \frac{2\sqrt{\rho}}{1+\rho}\right)$ , 如图11红色曲线所示, 当光强不平衡达18%时, 相干度和光束尺寸相对误差小于0.5%。可见光强不平衡对束流尺寸测量的影响相对较小, 但是随着所测量的束流尺寸的减小, 双缝处光强不平衡的影响也是不可忽略的。

#### 4.2 测量误差和分辨率

由于测量误差的存在, 被测量值的真值难以确定, 测量结果带有不确定性。束流截面尺寸计算公式为

$$\sigma = \frac{\lambda L}{\pi d} \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{|\gamma|}\right)} \quad (21)$$

假设参数  $\lambda, L, d, |\gamma|$  的测量标准差通过贝塞尔法计算分别为  $u_\lambda, u_L, u_d, u_{|\gamma|}$ 。假定在修正系统误差后, 忽略未定系统误差, 测量结果的误差合成为

$$u_\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\lambda}u_\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial L}u_L\right)^2 + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial d}u_d\right)^2 + \left(\frac{\partial\sigma}{\partial|\gamma|}u_{|\gamma|}\right)^2} \quad (22)$$

将式(21)代入式(22)得

$$u_\sigma = \sqrt{\left[\frac{L}{\pi d} \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{|\gamma|}\right)} u_\lambda\right]^2 + \left[\frac{\lambda}{\pi d} \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{|\gamma|}\right)} u_L\right]^2 + \left[\frac{-\lambda L}{\pi d^2} \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{|\gamma|}\right)} u_d\right]^2 + \left[\frac{-\lambda L}{\pi d} \frac{1}{V \sqrt{8 \ln\left(\frac{1}{|\gamma|}\right)}} u_{|\gamma|}\right]^2} \quad (23)$$

将表5数据代入式(23)中, 得到测量理论误差  $u_\sigma = 3.15 \mu\text{m}$ 。由于测量的最小分辨率间隔不能小于这个误差, 故将理论误差的2倍视为最小分辨率, 约为  $7 \mu\text{m}$ 。当系统设备参数设置完成, 只需代入各个参数误差, 便可求出束流尺寸误差。故最后的测量结果可以表示为

表5 垂直干涉仪光路参数和测量标准差

Table 5 Parameters of vertical interferometer and measurement standard deviation

$L/\text{mm}$	$\lambda/\text{nm}$	$d/\text{mm}$	$ \gamma $
$30000 \pm 10$	$500 \pm 10$	$16 \pm 0.01$	$0.6 \pm 0.06$

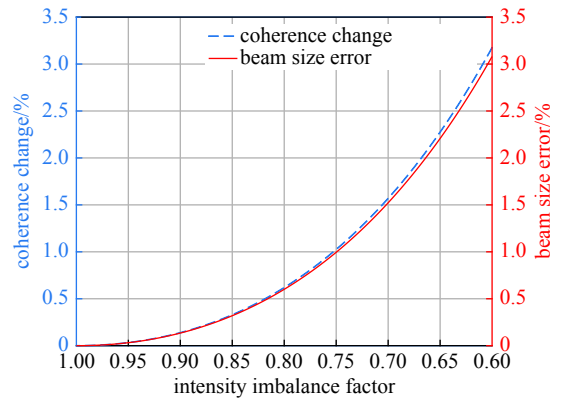


Fig. 11 Effect of intensity imbalance factor on coherence and beam size

图11 光强不平衡对相干度测量和束流尺寸测量的影响

$$\sigma_x = \sigma_{\text{mea}} \pm u_\sigma \quad (24)$$

其他因素对测量结果的影响还包括:波前误差,主要由光路系统中的反射镜和透镜引起,在进行光路设计和加工的时候需考虑并优化;滤波片带宽和偏振片极化方向误差带来的影响;光学平台的振动,以及 CCD 的线性度等带来的影响等。

## 5 结 论

本文将常用在天文观测方面的 RC 聚焦反射镜应用到同步光束流测量领域,在不改变光路光轴、方便光路安装调节的前提下,减小了光路色散对测量结果的影响。通过模拟仿真表明,该光路可以减小几何像差、波前差和色散,可以减小测量误差、提高测量分辨率;利用 SRW 进行物理光学仿真,进一步验证了此结构光路的可行性,为下一步实物测试提供了可靠的依据。下一步将对后续数据处理做进一步优化,并着手展开实验测量。并探索利用更短波长的同步辐射光进行光路设计。

## 参考文献:

- [1] Chevtsov P, Freyberger A, Hicks R, et al. Synchrotron light interferometer at Jefferson Lab[C]//Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. 2003: 2560-2562.
- [2] Fisher A S, Holtzapple R L, Petree M, et al. Beam-size measurements on PEP-II using synchrotron-light interferometry[C]//Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference. 2001: 547-549.
- [3] Corbett J, Cheng W, Fisher A S, et al. Interferometer beam size measurements in SPEAR3[C]//Proceedings of PAC09. 2009: 4018-4020.
- [4] Koopmans M, Goslawski P, Hwang J G, et al. Status of a double slit interferometer for transverse beam size measurements at BESSY II[C]//Proceedings of IPAC2017. 2017: 149-152.
- [5] Masaki M, Takano S. Beam size measurement of the Spring-8 storage ring by two-dimensional interferometer[C]//Proceedings DIPAC 2001. 2001: 142-144.
- [6] 王理, 赵敬霞, 曹建社, 等. 同步光干涉方法对 BEPCII 储存环束流的测量[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(9): 2512-2514. (Wang Li, Zhao Jingxia, Cao Jianshe, et al. Beam size measurement of BEPC II storage ring by using visible synchrotron light interferometry[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(9): 2512-2514)
- [7] 高波. 上海光源诊断线站升级中的若干关键技术研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2018: 73-91. (Gao Bo. Study on several key techniques in upgrading of the diagnostic beam line at Shanghai Synchrotron Radiation Facility[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018: 73-91)
- [8] 唐凯. HLSII 基于光学的测量系统及其相关研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 83-94. (Tang Kai. The related research of the measurement system based on optics of HLS II [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 83-94)
- [9] 唐雷雷. HLS II 束流横向截面测量系统的研制及相关研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 55-76. (Tang Leilei. Development and study of beam profile measurement system for HLS II [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013: 55-76)
- [10] 陈杰. 干涉仪测量电子储存环束流截面的研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2012: 36-56. (Chen Jie. The research of measuring beam size of electron storage ring with interferometer[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 36-56)
- [11] Naito T, Mitsuhashi T. Very small beam-size measurement by a reflective synchrotron radiation interferometer[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2006, 9: 122802.
- [12] Li C L, Xu Y H, Boland M J, et al. Double-slit interferometer measurements at SPEAR3[C]//Proceedings of IPAC2016. 2016.
- [13] 孙葆根. 加速器中的束流诊断技术讲义, 第五章: 束流横向尺寸发射度测量[M]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008. (Sun Baogen. Beam diagnostics in accelerators—Chapter 5: measurement of beam transverse size emittance[M]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008)
- [14] Mitsuhashi T. Spatial coherency of the synchrotron radiation at the visible light region and its application for the electron beam profile measurement[C]//Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference. 1997: 766-768.
- [15] Mitsuhashi T. Beam profile and size measurement by SR interferometers[C]//Proceedings of the Joint US-CERN-Russia-Japan School on Particle Accelerators. 1999: 399-427.
- [16] Garg A D, Modi M H, Puntambekar T A. Design of synchrotron radiation interferometer (SRI) for beam size measurement at visible diagnostics beamline in Indus-2 SRS[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 902: 164-172.
- [17] Koopmans M, Goslawski P, Hwang J G, et al. Applications of the interferometric beam size monitor at BESSY II[C]//Proceedings of the 9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 2103-2106.
- [18] Butti D. Synchrotron radiation interferometry for beam size measurement in the Large Hadron Collider[D]. Milan: Polytechnic University of Milan, 2019: 29-44.
- [19] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 7版. 北京: 机械工业出版社, 2015: 83-89. (Fei Yetai. Error theory and data processing[M]. 7th ed. Beijing: China Machine Press, 2015: 83-89)