

石英光纤束损监测系统在 SXFEL 上的应用

吴亚龙^{1,2} 夏晓彬¹ 王光宏³ 许文贞³ 李哲夫³ 张斌团³

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院上海高等研究院 上海 200120)

摘要 上海软 X 射线自由电子激光装置(Soft X-ray Free-Electron Laser facility, SXFEL)是我国第一台 X 射线相干光源,为了对其波荡器线束流损失进行监测,设计安装了一套基于切伦科夫辐射理论的石英光纤束损监测系统。由于石英光纤对高能 γ 射线不敏感,适应在 SXFEL 高辐射场环境中安装使用。该束损监测系统响应速度极快,覆盖整个波荡器线约 180 m 长区域,能够对整个波荡器沿线束流损失进行实时连续监测。本文介绍了该光纤束损监测系统原理与组成,按应用需求进行了系统位置标定与光纤衰减系数测量等实验,并在实际调束过程中考察了该系统的应用情况。结果表明:该系统具有良好的位置分辨能力,在上游位置分辨能力约为 0.2 m,能够满足工作人员调束需求。

关键词 SXFEL, 束流损失监测, 光纤, YAG, 位置标定, 衰减系数

中图分类号 TL506

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.050203

Application of quartz fiber beam loss monitoring system in SXFEL

WU Yalong^{1,2} XIA Xiaobin¹ WANG Guanghong³ XU Wenzhen³ LI Zhefu³ ZHANG Bintuan³

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200120, China)

Abstract [Background] The SXFEL (Soft X-ray Free-Electron Laser facility) is the first X-ray coherent light source in China. To monitor the beam loss in its undulator beamline, a quartz fiber beam loss monitoring system based on the Cherenkov radiation principle was designed and installed. The quartz fiber is insensitive to high-energy gamma rays, making it suitable for a strong SXFEL radiation field environment. [Purpose] This study aims to apply quartz fiber beam loss monitoring (BLM) system to the undulator beamline of SXFEL, and carry out position calibration experiment to measure the fiber attenuation coefficient, and performance of the system in the beam tuning period. [Methods] First, two pure quartz composition fibers with 400 μm inner diameter of core and high concentration of hydroxide ions were employed. The beam loss signal was generated by falling YAG (Ce:Y₃Al₅O₁₂, target film) of the beam profile monitor at a fixed position and adjusting the trigger time delay to make the position of the beam loss signal the same as that of the beam profile monitor for position calibration experiment. Second, to measure the fiber attenuation coefficient, the coefficient was fitted by bringing the peak value of the beam loss signal generated by the falling YAG at different positions of the SBP (Shanghai-XFEL Beamline Project) beamline and the corresponding fiber position into the signal attenuation formula. [Results] The fiber BLM can accurately reflect the position of the beam loss with upstream position resolution

上海软 X 射线自由电子激光装置项目资助

第一作者: 吴亚龙, 男, 1994 年出生, 2017 年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 研究方向为粒子加速器辐射安全

通信作者: 夏晓彬, E-mail: xi Xiaobin@sinap.ac.cn

收稿日期: 2022-12-02, 修回日期: 2023-01-20

Support by Shanghai Soft X-ray Free Electron Laser facility Project

First author: WU Yalong, male, born in 1994, graduated from University of South China in 2017, master student, focusing on radiation safety of particle accelerator

Corresponding author: XIA Xiaobin, E-mail: xi Xiaobin@sinap.ac.cn

Received date: 2022-12-02, revised date: 2023-01-20

of approximate 0.2 m in the experiment test, as well as in the period of beam tuning. The refractive index of quartz fiber core is approximately 1.5, hence the relationship between the beam loss position and signal arrival to upstream PMT time interval is $0.12 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$. The measured fiber attenuation coefficient is around $74 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$, which is consistent with the calculation result and similar to the measurement result of SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA) using the same type of optical fiber. **[Conclusions]** The fiber beam loss monitoring system has a good position resolution and has the potential to meet the requirements of SXFEL beam tuning.

Key words SXFEL, Beam loss monitoring, Optical fiber, YAG, Position calibration, Attenuation coefficient

上海软 X 射线自由电子激光装置 (Soft X-ray Free-Electron Laser facility, SXFEL) 是中国第一台 X 射线相干光源, 其光谱覆盖范围为 2~10 nm, 主要包括: 一条可将电子束加速至 1.5 GeV 的高梯度直线加速器、两条波荡器线 (外种子型波荡器线 (Seeding Undulator line, SUD) 和活细胞结构与功能成像等线站工程波荡器线 (Shanghai-XFEL Beamline Project, SBP))、两条光束线以及 5 个实验站^[1]。整个装置分两阶段进行, 目前已将第一阶段的试验装置升级为用户装置, 通过增加电子束能量、提升束流流强和升级种子激光波荡器线实现 3 nm 出光, 同时还增加一条基于自放大自发辐射运行模式的波荡器线以实现 2 nm 出光^[2]。

自由电子激光放大器段由连续波荡器组成, 电子束被送入连续波荡器使得其和辐射波的相互作用增强了辐射的纵向相干性^[3]。波荡器段核心部件是永磁铁, 目前已广泛应用于储存环与自由电子激光装置, 而加速器辐射场对永磁铁的影响是一个需要重点考虑的问题。世界范围内许多自由电子激光装置都出现过因辐射照射造成永磁铁退磁情况^[4], 而束流损失正是其中需要重点考虑的一个辐射安全问题。

光纤作为辐射探测器应用于束流损失监测领域已有二十多年研究历史。1990 年代有相关学者对基于切伦科夫原理的石英光纤展开理论研究^[5], 2000 年在德国电子同步加速器 (Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY) 得以工程实现^[6], 之后普遍应用于同步辐射光源^[7-8], 近十年来强 X 射线光源——自由电子激光的快速发展进一步推动石英

光纤在束损监测领域的应用^[9]。

由于石英光纤对高能 γ 射线不敏感^[10], 十分适合应用在 SXFEL 高辐射场环境中; 同时从调束角度来说, 光纤对整个波荡器沿线进行实时连续的束流损失监测, 能够第一时间确定束损位置反馈给调束人员, 起到早期束流诊断作用; 而且光纤还有占用空间小、抗辐射、价格合理等优点, 因此在 SXFEL 波荡器线设计安装了一套石英光纤束损监测系统。本文介绍了该系统工作原理与组成, 同时出于实际应用需求进行了系统位置标定实验用于确定束损位置, 以及实验测量了光纤衰减系数用于对束损信号的衰减补偿, 并最终在调束过程中考察该系统应用情况。

1 系统工作原理

加速器运行中丢失的电子束不可避免最终会在真空室内壁上, 经过与真空室簇射作用最终在壁外产生二次粒子, 二次粒子主要成分为光子和正负电子。其中超过切伦科夫阈能的正负电子在光纤芯部产生切伦科夫光, 再在纤芯和包层之间通过全反射原理往光纤末端传输, 最终一小部分光子被光纤末端的光电探测器 (通常是光电倍增管 (PhotoMultiplier Tube, PMT)) 捕获输出电信号^[11]。一般情况下 PMT 会选择安装在光纤上游末端, 这是因为上游收集到的信号提供的位置分辨能力比下游要好^[12], 所以 SXFEL 也选择在上游末端安装 PMT。通过记录信号到达时间就可以推算出束损信号产生的位置, 时间和位置换算关系为 $0.12 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ 。图 1 为光纤束损监测系统工作原理示意图。

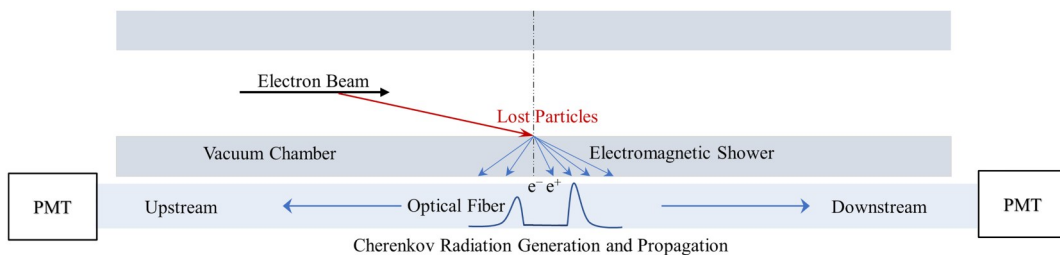


图 1 光纤束损监测系统工作原理
Fig.1 Principle of fiber beam loss monitoring system

2 系统组成

SXFEL 在波荡器大厅从束流输运线到波荡器末端共两条束线安装了4根光纤,出于冗余目的,每条束线都是布置了一左一右两根光纤,长度分别为130 m和180 m,型号为Fujikura SC400/440,属多模阶跃型光纤。纤芯内径为400 μm,纯石英成分,且含有高浓度的氢氧根离子以提高抗辐射性,纤芯折射率 $n=1.46$,数值孔径 $NA=0.22$;纤芯包层为20 μm厚度的掺氟石英,其折射率略小于石英纤芯,目的是光信号在传输时能够在纤芯与包层之间满足全反射

原理。同时,出于位置灵敏考虑只选择了在光纤上游末端的支架下方安装了PMT,利用支架的屏蔽来保护PMT。PMT型号为Hamamatsu H10721-01,探测波长范围为230~870 nm,上升时间为0.57 ns。PMT输出信号通过高速采集卡PXIe-5162完成4路触发采集,每通道采集率为1.25 GHz,再由PXI高速背板实时将采集数据传输到输入输出控制器(Input/Output Controller, IOC)完成波形处理,最终所有数据通过EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)存档并上传到OPI显示供用户查看。图2是光纤束损监测数据采集系统示意图。

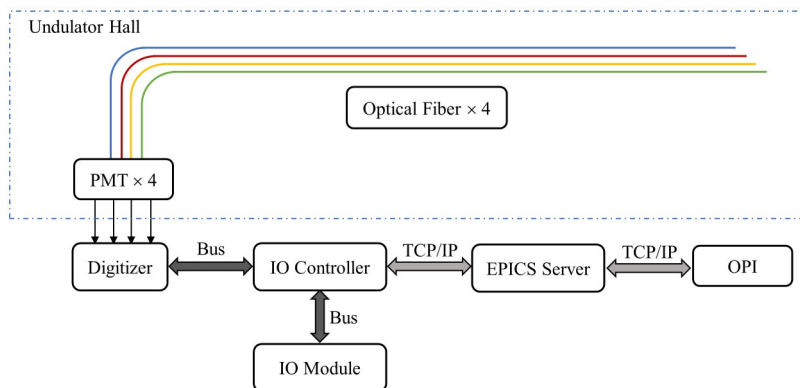


图2 SXFEL 光纤束损监测数据采集系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of data acquisition system for fiber beam loss monitoring

3 束损系统位置标定

如果同一电子束团在不同位置发生束损,其产生的束损信号到达上游PMT时间间隔表达如下:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L}{c} + \frac{L}{c/n} = \frac{L}{c}(n + 1) \quad (1)$$

式中: L 为两处束损位置间距, m ; n 为光纤芯部折射率; c 为光速; t_2 为下游信号到达PMT时间; t_1 为上游

信号到达PMT时间, s 。

考虑石英折射率近似为1.5,则束损间距与信号到达上游PMT时间间隔关系为: $0.12 m \cdot ns^{-1}$ 。若 $t_1=0$,对应数据采集系统开始工作时刻,也对应光纤覆盖的波荡器线上游起始位置,则仅需记录后续光纤信号到达时间 T, ns ,通过 $0.12 m \cdot ns^{-1}$ 关系转换成位置即可完成整个束损系统位置标定。图3是系统位置标定原理示意图。

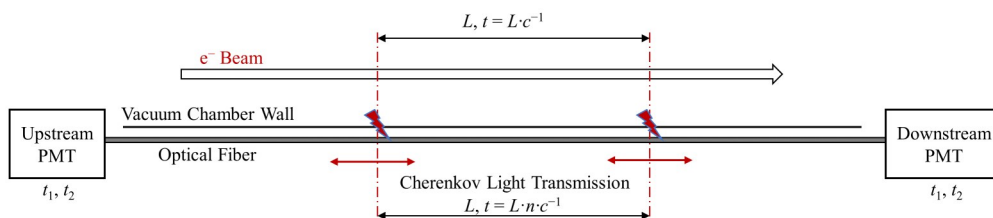


图3 光纤束损监测系统位置标定原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of fiber beam loss monitoring system position calibration

SXFEL 在电子束团产生时会向光纤束损监测系统发出信号,束损系统接收到信号后经过一段时间延迟待该束团到达波荡器隧道时数据采集卡才开始工作,这段延迟时间叫作数据采集卡的触发延迟时间。在位置标定实验过程中一般选择在固定位置

落靶产生束损方式来确定触发延迟时间。本次实验在SBP波荡器线踢束器(Kicker)下游第一个靶件SBP-PRF1位置落靶,由于实际中该靶件位置据波荡器线上游起点距离确定,通过调整触发延迟时间使得光纤束损监测系统反馈的束损位置离起点位置间

距正好等于实际间距即可,位置标定过程完成。数据采集卡单通道采集率为1.25 GHz,两次数据采集时间间隔为0.8 ns,对应0.096 m的间距,光纤覆盖波荡器线184 m长区域,因此,每次数据采集卡开始工作采集1 918个点位信息后停止工作,待下一次电子束团产生触发第二次工作。图4是标定过程中使用

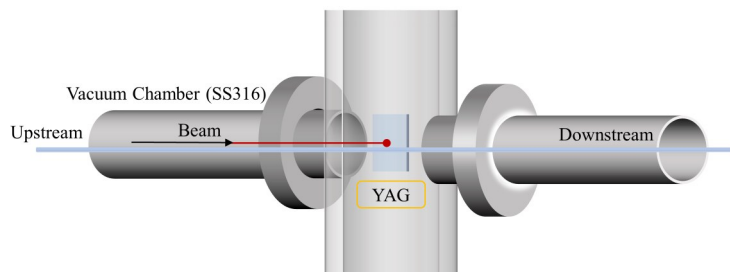


图4 BPM落靶产生束损示意图

Fig.4 Diagram of beam loss generated by BPM falling YAG target

4 光纤衰减系数

束损信号的大小反应束损水平,有许多因素会导致光信号在光纤中传输时发生损耗,主要包括材料的吸收和散射、光纤弯曲、泄漏损失,还有连接处接头的损耗等^[13]。PMT输出信号是经过光纤输运损耗后的剩余信号,并非直接探测到的真实信号,需要将其进行衰减恢复来如实反映束损信号的大小。

4.1 光纤衰减系数测量

光信号在光纤内传播时,由于吸收和散射的影响,光信号的功率随着传播距离增加呈指数关系下降。相关的衰减系数通常用 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$ 为单位,用 A 表示:

$$P(L) = P_0 \times 10^{-\frac{AL}{10}} \quad (2)$$

式中: P_0 为光纤的输入功率; $P(L)$ 为信号在光纤内传播长度 L (单位km)后的输出功率。

实验中通常采用的方法是:改变同一位置束损信号到PMT之间光纤长度,再将测量出的束损信号代入式(2),拟合出衰减系数。而实际上在SXFEL调束期间频繁进出波荡器隧道调整光纤长度不太现实,因此采用了沿SBP线不同位置落靶的方法,将落靶束损信号峰值及对应的光纤位置代入拟合出衰减系数 A 。此方法可行性在于所有的靶件结构相同、材料相同、SBP线为直线且除波荡器以外管道结构也近似一致。

图5为SBP线光纤覆盖区域所有靶件(YAG)落靶产生的束损信号波形图,除去中间100~150 m的波荡器区域,其他都是相同的管道结构和布局。选择其中有完整峰值结构的束损波形峰值与对应的光

束流截面监测器(Beam Profile Monitor, BPM)落靶产生束损的示意图,通过将BPM中的闪烁体靶片YAG($\text{Ce:Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$,掺铈铝石榴石)落下截断束流产生束损,YAG靶厚0.1 mm,与束流方向夹角为 45° 。

纤位置(距离PMT距离)代入式(2)拟合,结果如图6所示,100 m长光纤拟合衰减系数为 $(74.98 \pm 4.7) \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$,180 m长光纤拟合衰减系数为 $(74.32 \pm 2.99) \text{ dB}\cdot\text{km}^{-1}$,二者十分近似。

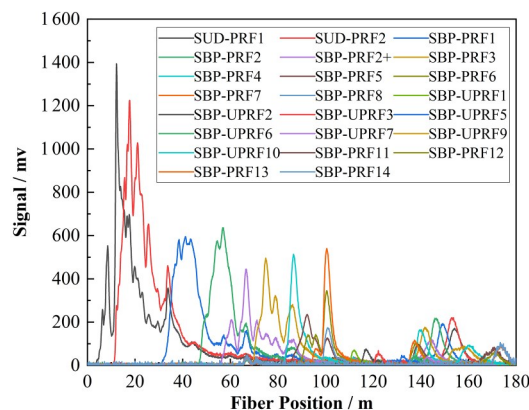


图5 SBP段所有位置YAG落靶束损波形图

Fig.5 Beam loss waveforms generated by YAGs falling on SBP beamline

因为束线结构差异缺失了中间100~150 m区域的测量结果,以及实际管道、光纤布局在不同位置处依旧存有一定的差异,不能完全控制变量,所以测量结果存在着一定的不确定性。为了评估测量结果是否可靠,后续研究了一种可以直接通过计算拟合出光纤衰减系数的方法来对测量结果进行评估。

4.2 光纤衰减系数计算方法

对于束损监测的石英光纤而言,束损信号从产生到PMT最终输出信号经历切伦科夫辐射的产生、光信号在光纤内的传播以及PMT光电转换三个过程。切伦科夫光辐射是连续的光谱,其产额与波

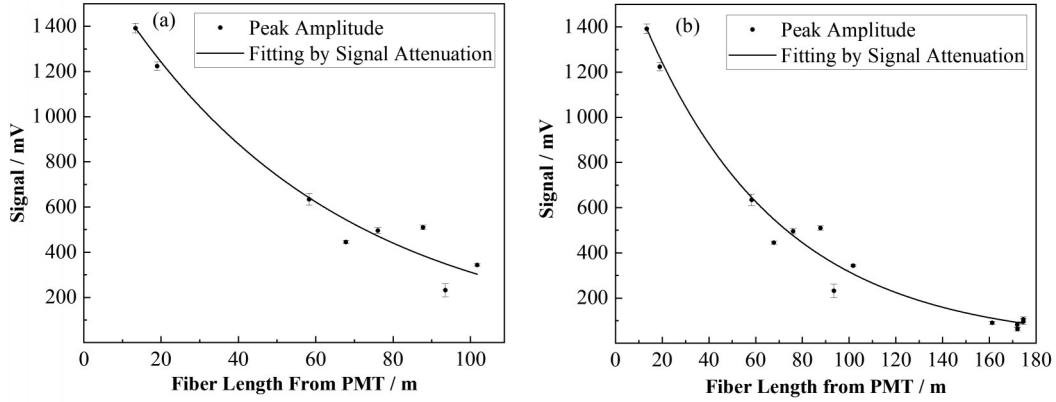


图6 落靶产生的束损信号峰值拟合光纤衰减系数 (a) 长度100 m, (b) 长度180 m
 Fig.6 Attenuation coefficient of optical fiber fitted by the peak values of beam loss signals generated by falling YAGs
 (a) 100 m fiber, (b) 180 m fiber

长 λ (单位nm)关系如下:

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{2\pi z^2}{137} \cdot \frac{\sin^2\theta}{\lambda^2} dl \quad (3)$$

式中: z 为入射带电粒子电荷量; θ 为切伦科夫半锥角; l 为带电粒子在切伦科夫辐射体中穿过的距离, cm。

切伦科夫辐射对应紫外至红外这段光谱,此波长范围内瑞利散射是造成信号衰减的主要因素,由折射率随机不均匀性造成的^[14],衰减系数用瑞利散

射系数 A_{Rayleigh} (单位 $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$)表示,对于纯石英材料光纤的衰减系数如下(λ 单位为 μm):

$$A_{\text{Rayleigh}} = \frac{0.75}{\lambda^4} \quad (4)$$

图7(a)是瑞利散射对切伦科夫光谱的衰减影响,分别展示了在5 m、50 m、100 m和200 m情况下光谱各成分受瑞利散射影响后的剩余部分,可见短波长部分受衰减影响最为明显,也进一步说明光纤长度越短,信号损耗程度越剧烈。

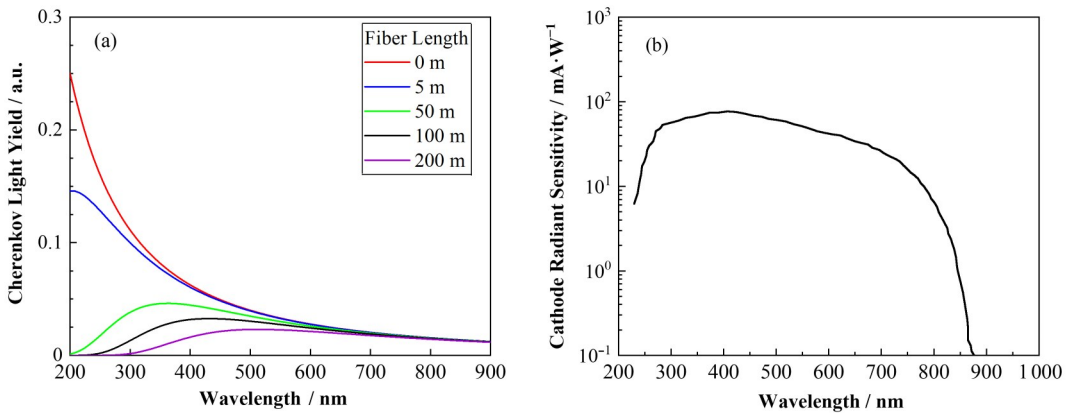


图7 衰减对切伦科夫光谱的影响(不同光纤长度下的光谱剩余部分)(a), Hamamatsu H10721-01 阴极辐射灵敏度(b)
 Fig.7 Effect of attenuation on Cherenkov light spectrum (remaining part of spectrum after propagation through different fiber lengths) (a), cathode radiation sensitivity of the Hamamatsu H10721-01 (b)

最终经光纤传输损耗后的光信号要再经过 PMT 光电转换完成信号输出。图7(b)是SXFEL 光纤束损监测系统使用的PMT阴极辐射灵敏度 S_k (单位 $\text{A}\cdot\text{W}^{-1}$),同样有很强的波长依赖性。PMT的光子探测效率 η_{PDE} (PDE)或者叫量子效率与阴极辐射灵敏度关系如下:

$$\eta_{\text{PDE}} = \frac{hc}{\lambda} S_k \times 100\% = \frac{1240}{\lambda} S_k \times 100\% \quad (5)$$

式中: h 为普朗克常数; c 为光速, $\lambda \in (230, 870)\text{nm}$ 。

根据这三者耦合关系可以得到不同波长光子在经过长度 L (单位km)光纤后产生的光电子数,简化为:

$$\frac{dN_e}{d\lambda} \sim \frac{1}{\lambda^2} \times 10^{-\frac{0.75 \times L}{10 \times \lambda^4}} \times \frac{1240}{\lambda} \times S_k \quad (6)$$

在不同长度光纤情况下将波长 $\lambda \in (230, 870)\text{nm}$ 范围内的光电子数相加就可以得到不同光纤长度下的信号值,代入式(2)进行拟合得到衰减系数 A 。图8分别是在光纤长度为100 m和180 m情况下根据

计算结果拟合出的衰减系数,与实验测量结果是吻合的。对比使用同种类型光纤的日本紧凑型自由电子激光(SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser, SACLA)实验测量结果^[15],如表1所示,在光

纤长度为120 m和150 m时,SACLA测量结果与计算结果相近,说明此计算方法可靠,继而说明SXFEL波荡器段光纤衰减系数实验测量结果也是可靠的。

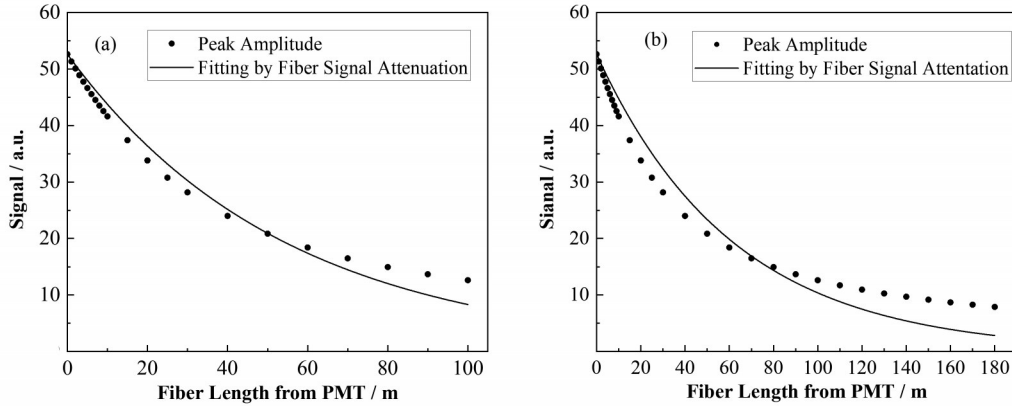


图8 不同光纤长度情况下通过计算拟合出的衰减系数 (a) 100 m长光纤,(b) 180 m长光纤
Fig.8 Attenuation coefficient fitted by calculation under different fiber lengths (a) 100-m-long fiber, (b) 180-m-long fiber

表1 SXFEL与SACLA光纤衰减系数
Table 1 Optical fiber attenuation of SXFEL and SACLA

	光纤长度 Fiber length / m	衰减系数	
		Attenuation coefficient / $\text{dB}\cdot\text{km}^{-1}$	
		测量值 Measured value	计算值 Calculated value
SXFEL	100	74.98 ± 4.7	80.1 ± 2.9
	120	—	76.9 ± 3.08
	150	—	73.24 ± 3.24
	180	74.32 ± 2.99	70.51 ± 3.34
SACLA	121	79	—
	151	70	—
	151	68	—

5 调束过程中的应用

在调束过程中,工作人员经常通过落靶方式来观测束斑特性,图9是在管道上游第一个BPM位置处落靶产生的束损信号,两条束线共4根光纤在此汇合到一条管道上,所以在此处落靶4根光纤都捕获到了类似的束损信号。束流条件为1.1 GeV、2 Hz,单束团脉冲。

由于在位置标定时使用的是落靶产生的束损信号起点作为靶的位置,因此,图中0时刻对应上游第一个靶件位置。第一个峰值对应靶后3.7 m位置处的准直器,信号的下降是因为准直器较厚的外壁阻碍了产生的次级正负电子穿过光纤。第二个峰值对应靶后5.7 m位置处的踢束器(Kicker),对应图中虚线A的位置。踢束器体积较大,阻碍了更多能够进

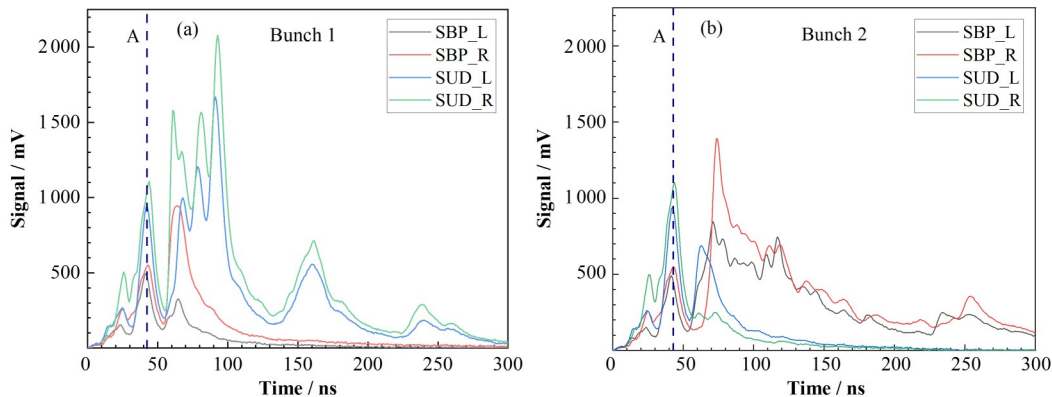


图9 上游第一个YAG落靶产生的束损信号 (a) 第一个束团产生的束损信号,(b) 第二个束团产生的束损信号
Fig.9 Beam loss signals generated by falling the upstream first YAG
(a) Signal generated by the first bunch, (b) Signal generated by the second bunch

入光纤的次级正负电子,因此峰后信号急剧下降,待光纤布局绕过踢束器后束损信号又迅速上升。经过踢束器的电子束团按两条波荡器线的需求以不同的比例进行分配,图中条件是第一个束团经踢束器分配到SUD线,第二个束团则保持原轨道进入SBP线。同一条束线上的两根光纤捕获的束损信号变化近似,主要差异是束损幅度的不同;而且刚经过Kicker踢束分开的两条束流管道距离很近,两条束线都对对方两根光纤中靠近自己一侧的那根产生更多的影响,如图9所示,去往SUD线的束团1产生的束损在SBP线SBP-R(右侧)光纤上产生更多的响应;同理留在SBP线的束团2产生的束损在SUD线SUD-L(左侧)光纤上产生更多的响应。由此能够证实第二个峰值(A)确实对应踢束器(Kicker)位置。

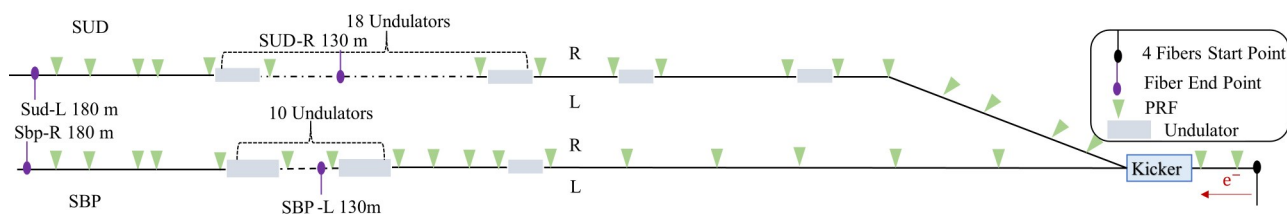


图10 光纤束损监测系统布局简图
Fig.10 Layout diagram of the SXFEL fiber beam loss monitoring system

再对比图9中各光纤信号幅度,在Kicker上游4根光纤面临的束损情况是完全相同的,我们发现:同一条束线的两根光纤信号幅度有少量差距,原因是各光纤在管道上游末端都剩余不同长度光纤,从1.2 m到3.8 m不等,这剩余光纤的长度差异造成了信号幅度的少量差异;此外不同束线光纤间的信号幅度差异更加明显,原因是SBP段光纤自2019年已开始服役,SUD段光纤则是2022年安装使用,长期辐射损伤导致短波长信号在光纤中传输时损耗更为显著,所以在较短光纤传输距离上,SBP段光纤信号损耗程度非常明显。但是当信号在光纤内传输距离增加时,两条束线上的光纤表现出的信号幅度基本没有差异。

图11是调束期间SBP段两根光纤捕获到的束损信号,根据光纤定位到束损位置在PMT下游80 m位置附近,在束损位置上游SBP-PRF3(SBP线第三个靶)位置落靶可见完整束斑,但是再下一个SBP-PRF4(SBP线第4个靶)位置落靶已观察不到束流信息。再进一步在两个靶之间排查原因,最终确定束损由清华等离子测量腔体内靶件未归零造成。由此可见在调束过程中,束流损失出现时第一时间通过光纤束损监测系统反馈给工作人员,因此该系统可作为早期的束流诊断工具。

通过比较4根光纤捕获到的束损信号反映出的靶后准直器与踢束器的二者间的束损间距与物理间距,如表2所示,可见光纤BLM在上游位置分辨能力为0.2 m左右。图10为光纤束损监测系统及相关加速器设备在SXFEL波荡器线的布局简图。

表2 由4根光纤落靶束损信号反映的束损间距与实际间距的比较

Table 2 Comparison between the beam loss distance reflected by the beam loss signal of four optical fibers and the actual distance

	实际间距 Actual distance / m	束损间距 Beam loss distance / m			
		SBP-L	SBP-R	SUD-L	SUD-R
束1 Bunch1	2.0	2.208	2.208	2.112	2.208
束2 Bunch2		2.112	2.208	2.208	2.208

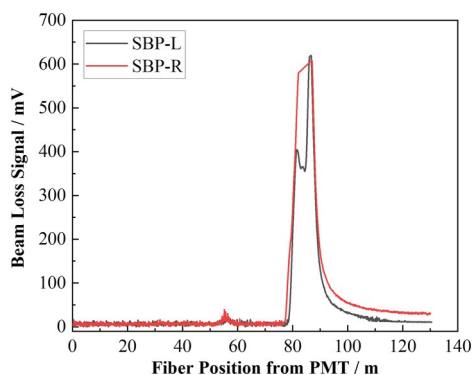


图11 调束过程中在SBP束线上由光纤捕获的束损信号
Fig.11 Beam loss signal captured by optical fiber of SBP beamline during the period of beam tuning

6 结语

基于切伦科夫辐射原理的光纤束损监测系统已成功应用于SXFEL波荡器线。完成了系统位置标定实验,将束损信号到达PMT时间转换成束损位置信息;同时测量了光纤衰减系数用于对探测到的束损信号衰减补偿来反映实际的束损信号,并提出一种可以直接通过计算得到衰减系数的方法,将计算结果与实验测量结果进行比较证实了测量结果的可靠性。在调束过程中,该束损监测系统对束损位置的判定表现了其具有良好的位置分辨能力,目前已

作为加速器调束过程中的前期束流诊断工具。

致谢 感谢上海软 X 射线自由电子激光装置项目辐射防护团队、调束团队和束测团队对本文工作的大力支持!

作者贡献声明 吴亚龙负责实施实验、处理数据与撰写论文;夏晓彬负责指导论文写作与论文修改;王光宏负责指导实验与协助修改论文;许文贞、李哲夫、张斌团负责协助课题研究。

参考文献

- 赵振堂, 王东, 殷立新, 等. 上海软 X 射线自由电子激光装置[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 33 - 42. DOI: 10.3788/CJL201946.0100004.
ZHAO Zhentang, WANG Dong, YIN Lixin, *et al.* Shanghai soft X-ray free-electron laser facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 33 - 42. DOI: 10.3788/CJL201946.0100004.
- Liu B, Feng C, Gu D, *et al.* The SXFEL upgrade: from test facility to user facility[J]. Applied Sciences, 2021, 12(1): 176. DOI: 10.3390/app12010176.
- Johann Eduardo Baader. A novel technique for detecting radiation damage in variable-gap permanent-magnet undulators based on in-situ magnetic measurements[D]. Campinas, Sao Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2019.
- Wolff-Fabris F, Pflueger J, Schmidt-Foehre F, *et al.* Status of radiation damage on the European XFEL undulator systems[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1067: 032025. DOI: 10.1088/1742-6596/1067/3/032025.
- Wang Y C, Shi Y W, Jiang H T. Passive optical fibre sensor based on Cerenkov effect[C]. International Conference on Optical Fibre Sensors in China OFS (C)' 91, Proceedings SPIE, 1991, 1572: 32 - 37. DOI: 10.1117/12.50081.
- Janata E, Körfer M. Radiation detection by Cerenkov emission in optical fibers at TTF[R]. Hamburg: Desy, 2000.
- Maltseva Y I, Ivanenko S V, Khilchenko A D, *et al.* Beam loss monitoring system for the SKIF synchrotron light source[J]. Journal of Instrumentation, 2022, 17(5): T05004. DOI: 10.1088/1748-0221/17/05/t05004.
- Giansiracusa P J, Boland M J, Holzer E B, *et al.* A distributed beam loss monitor for the Australian Synchrotron[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 919: 98 - 104. DOI: 10.1016/j.nima.2018.12.054.
- Fisher A S, Clarke C I, Jacobson B T, *et al.* Beam-loss detection for the high-rate superconducting upgrade to the SLAC Linac Coherent Light Source[J]. Physical Review Accelerators and Beams, 2020, 23(8): 082802. DOI: 10.1103/physrevaccelbeams.23.082802.
- Podobedov B, Hu Y, Hidaka Y, *et al.* NSLS-II beam loss control and monitoring system[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 969: 163812. DOI: 10.1016/j.nima.2020.163812.
- 刘畅, 冷用斌, 俞路阳, 等. 基于切伦科夫原理的光纤束损探测系统研制[J]. 核技术, 2013, 36(8): 080102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.080102.
LIU Chang, LENG Yongbin, YU Luyang, *et al.* Development of fiber beam loss monitor based on Cerenkov principle[J]. Nuclear Techniques, 2013, 36(8): 080102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2013.hjs.36.080102.
- Jung N S, Kim M H, Kim H H, *et al.* Development and operation of fiber-based radiation protection beam-loss monitor for PAL-XFEL[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2021, 330(2): 521 - 528. DOI: 10.1007/s10967-021-07805-w.
- Singal T L. Optical fiber communications: principles and applications[M]. London: Cambridge University Press, 2016. DOI: 10.1017/9781316661505.
- Wandel M. Attenuation in silica-based optical fibers[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2006.
- Marechal X M, Asano Y, Itoga T. Design, development, and operation of a fiber-based Cerenkov beam loss monitor at the SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 673: 32 - 45. DOI: 10.1016/j.nima.2011.12.094.