



·离子束科学技术及其应用·

## 相干渡越辐射束团纵向分布重建方法<sup>\*</sup>

袁肖肖<sup>1</sup>, 李 佳<sup>1</sup>, 闫文兵<sup>1</sup>, 冉朝晖<sup>1,2</sup>, 杨 鑫<sup>1,2</sup>, 赵全堂<sup>1,2</sup>,  
宗 阳<sup>1</sup>, 曹树春<sup>1,2</sup>, 张子民<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 实验上通过相干渡越辐射(CTR)能谱分析法测量束团长度以及进行纵向束团形状重建已成为一种有效的束流诊断手段。通过迈克尔逊干涉仪测量太赫兹辐射能谱, 通常实验所用探测器只能测量辐射的强度谱的幅值, 且由于缺少相位无法直接进行束团形状重建。目前重建算法主要有 Kramers-Kronig(K-K)相位分析法和代数迭代重建算法。利用这两种算法分别对高斯分布和带拖尾的高斯分布模型进行验证并进行了对比, 其中 K-K 得出的重建结果存在一定的误差, 迭代算法在解决重建反转歧义、重建噪声抑制等表现良好。同时利用这两种算法对兰州高能电子成像平台 CTR 实验结果进行了重建及分析, 得出了对应的重建结果, 为后续高能电子束成像平台的束流诊断反馈提供了一种参考手段。

**关键词:** 相干渡越辐射; 纵向束团重建; 重建算法; 束流诊断

中图分类号: TL53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230263

## Reconstruction algorithm for bunch longitudinal distribution of coherent transition radiation

Yuan Xiaoxiao<sup>1</sup>, Li Jia<sup>1</sup>, Yan Wenbing<sup>1</sup>, Ran Zhaohui<sup>1,2</sup>, Yang Xin<sup>1,2</sup>, Zhao Quantang<sup>1,2</sup>,  
Zong Yang<sup>1</sup>, Cao Shuchun<sup>1,2</sup>, Zhang Zimin<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

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

**Abstract:** Coherent transition radiation (CTR) spectroscopy has emerged as a highly productive technique for measuring bunch length and reconstructing longitudinal bunch profiles. However, conventional Michelson interferometry is limited to the amplitude measurement of terahertz radiation spectra, rendering it incapable of directly reconstructing the bunch profile owing to the absence of phase information. Currently, the predominant reconstruction methods encompass the Kramers-Kronig (K-K) phase analysis and algebraic iterative reconstruction algorithms. These two algorithms were employed to validate both Gaussian distribution and Gaussian distribution with tail models, respectively. The outcomes obtained from the K-K algorithm exhibit notable uncertainty, whereas the iterative algorithm showcased superior performance in resolving reconstruction ambiguities and mitigating noise interference. Within the framework of the Lanzhou High Energy Electronic Imaging Platform, a specialized Michelson interferometer was meticulously engineered for the precise measurement of CTR interference spectra. Subsequent to two distinct measurements, the acquired data was subjected to reconstruction and comprehensive analysis employing the aforementioned algorithms. As a result, detailed longitudinal beam cluster reconstructions for the electron beam were successfully obtained. These findings constitute a reference for subsequent beam diagnosis and feedback mechanisms within the High Energy Electron Beam Imaging Platform.

**Key words:** coherent transition radiation, longitudinal bunch reconstruction, reconstruction algorithm, beam diagnosis

\* 收稿日期: 2023-08-11; 修订日期: 2023-10-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFA0404900); 甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA103)

联系方式: 袁肖肖, yuanxx@impcas.ac.cn。

通信作者: 赵全堂, zhaquantang@impcas.ac.cn。

高亮度电子束是很多电子加速器应用追求的目标,而束流束团长度及纵向分布是电子束最重要参数之一。束团长度是反映束流纵向不稳定性发生的阈值和不稳定强度的主要参数,超短束流的超高时间分辨诊断在自由电子激光<sup>[1-2]</sup>、直线对撞机<sup>[3]</sup>、激光等离子体加速器<sup>[4]</sup>以及基于汤姆逊散射的 X 射线光源<sup>[5]</sup>中起着至关重要的作用。

由于电子束在诸多领域应用广泛,束团长度测量就显得至关重要。目前已经发展了各种测量方法来获取束团纵向长度信息,包括时域法和频域法。时域法即直接从电子或其辐射波的时间分布测量电子束团长度,包括条纹相机法<sup>[6]</sup>、电光采样法<sup>[7]</sup>和横向偏转法<sup>[8]</sup>等。其中电光采样法和横向偏转法是电子束轮廓的单次可视化的重要手段,电光采样法是一种非侵入测量法,可以作为实时监测手段。频域法指从电子束产生的某种相干辐射能谱中测量电子束团长度的方法,相干辐射根据产生机制的不同其可分为相干衍射辐射<sup>[9]</sup>、相干渡越辐射<sup>[10]</sup>、相干同步辐射<sup>[11]</sup>和相干 smith-purcell 辐射<sup>[12]</sup>。时域测量可以得出相对清晰的束团长度以及束流强度的分布,缺点是测量成本较高。频域测量之中,相干辐射测量相对成本较低,但是束团长度以及束团纵向分布重建存在一定的误差。随着束团长度向飞秒量级发展,传统的测量手段已经显得无能为力。实验室常用的条纹相机,在束团长度较长时是一种非常好的实验测量工具,但是时间分辨率极限在 200 fs 左右且造价昂贵。

国内外对于束团长度测量的研究越来越多,美国 SLAC(Stanford Linear Accelerator Center)研究小组在 2007 年基于 40 fs 的超短电子束团获得加速梯度大于 200 MV/m 的实验结果<sup>[13]</sup>;德国电子同步辐射加速器(Deutsches-Elektronen-Synchrotron, DESY)的 FLASH 电子直线加速器利用相干渡越辐射以及横模腔两种方法测量 10 fs 的电子束团,并对束团进行重建<sup>[14]</sup>,为其用于自由电子激光的直线加速器开展了电子束诊断;清华大学利用光阴极微波电子枪实验平台搭建 Martin-Puplett 干涉仪,通过对磁压缩器出口超短电子束纵向分布的无阻拦测量,实现了 0.3 ps 的时间分辨率<sup>[15]</sup>;中国科学院上海应用物理研究所基于相干渡越辐射对以迈克尔逊干涉仪和 Golay Cell 为核心元件的上海 X 射线自由电子激光装置(SXFEL)进行了测量,成功实现束团长度测量范围为 20 fs~3 ps,并对 SXFEL 装置的亚皮秒电子束束长进行测量<sup>[16]</sup>。

中国科学院近代物理研究所的高能电子成像平台选择频域法中的相干渡越辐射方法进行电子束团长度测量<sup>[17]</sup>。在前期研究中,采用 K-K 算法进行纵向长度重建,结果表明能够实现对短束长电子束纵向形状重建,但 K-K 重建得出的结果存在较大的不确定性。代数迭代算法能够根据约束条件寻找合适的重建结果,能够降低 K-K 重建带来的不确定性。本文主要是对基于 CTR 束团纵向分布重建算法开展了相关研究。分别利用代数重建算法和 K-K 重建算法对特定模型进行重建并将重建结果进行对比,以选择具有较高保真度的重建算法,用于实际实验。

## 1 CTR 实验原理

当单个电子穿过真空与铝箔界面时,会产生渡越辐射,如图 1(a)所示,产生的渡越辐射波会向后传播,并且会呈现图 1(b)中的分布。实验中将铝箔界面与电子束流入射方向呈 45°角安装,可使后向辐射两边的辐射强度平均分布。生成的太赫兹辐射(渡越辐射)主要分布在与法向量相差 45°角的左右两边,辐射波呈 90°角离开真空室,其能谱空间分布可用 Ginzburg-Frank<sup>[18]</sup> 方程描述为

$$\frac{d^2 I_{sp}}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2} \quad (1)$$

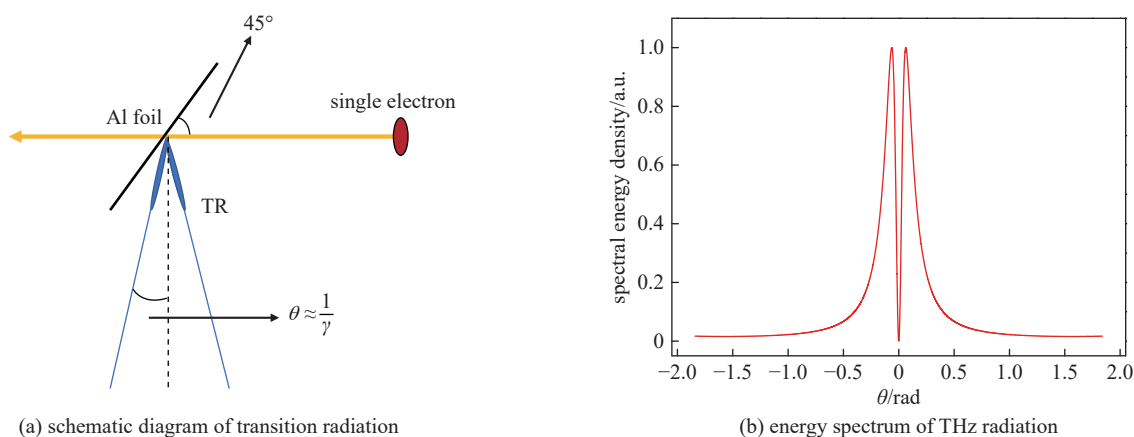


Fig. 1 Schematic diagram and intensity distribution of transition radiation

图 1 渡越辐射原理图与渡越辐射强度分布

式中:  $I_{sp}$  为单个带电粒子的渡越辐射谱;  $\omega$  为太赫兹 (渡越辐射) 辐射角频率;  $\Omega$  为渡越辐射的立体角分布;  $\epsilon_0$ 、 $c$  分别为真空介电常数和真空中的光速。该式适合于远场大屏观测条件, 其中:  $\theta = \arcsin\left(\frac{1}{\beta\gamma}\right) \cong \frac{1}{\gamma}$ 。

电子束团产生的辐射强度必须考虑束团中每个电子的辐射强度, 这与电子束团长度有关。当电子束团长度小于或等于辐射波长时, 电子辐射相位大致相同, 辐射满足相干条件, 此时总辐射强度正比于电子个数的平方, 其中电子束团渡越辐射能谱为

$$\frac{d^2 I}{d\omega d\Omega} = \frac{d^2 I_{sp}}{d\omega d\Omega} [N + N(N-1)]F(\omega) \quad (2)$$

式中:  $N$  为电子数;  $I$  为电子束产生的辐射强度;  $F(\omega)$  为束团纵向形状因子。形状因子中包含电子束团纵向分布的信息, 其包含辐射的强度与辐射频率的信息, 并且可以借此描述电子束团的相干程度。形状因子定义为电子束团纵向密度分布傅里叶变换的平方, 即

$$F(\omega) = \left| \int e^{-kz} \rho(z) dz \right|^2 = |S(\omega)|^2 \quad (3)$$

对于常规高能分布的电子束而言, 一个束团中电子数在  $10^8 \sim 10^9$  数量级, 对于短脉冲束, 非相干辐射可忽略, 因此式(1)可近似为

$$\frac{d^2 I}{d\omega d\Omega} \approx \frac{d^2 I_{sp}}{d\omega d\Omega} N^2 F(\omega) \quad (4)$$

其中  $F(\omega)$  可由单电子辐射和电子束团辐射能谱反推出来。

基于相干渡越辐射搭建的电子束团长度测量平台如图 2 所示。主要实验过程如下: 电子束经过真空室和铝箔作用之后产生后向辐射的太赫兹波, 其首先穿过用于真空密封的太赫兹窗, 通过太赫兹窗 (材料为聚甲基戊烯, 厚度为 3.5 mm, 在频率为 10 THz 以下的透射率稳定在 70%) 之后, 穿过太赫兹窗的辐射波被离轴抛物面镜收集并传输到迈克尔逊干涉仪 (图中框图部分)<sup>[19]</sup> 中。在迈克尔逊干涉仪中 THz 波通过分光片 (透射率约为 54%, 反射率约为 46%) 之后分成两束, 再通过动镜改变光程差, 使其发生干涉, 通过高莱探测器探测干涉波的干涉强度。

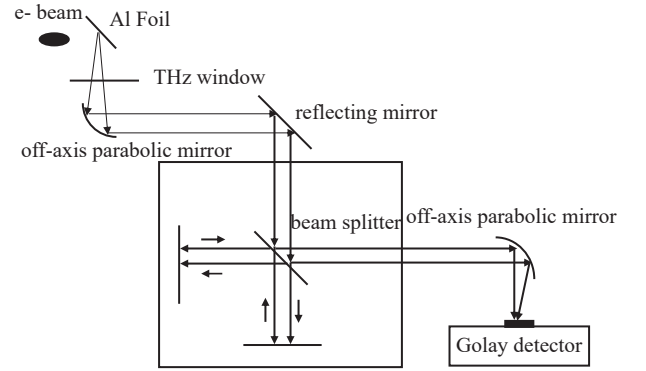


Fig. 2 Layout of Michelson interferometer

图 2 迈克尔逊干涉仪布局图

## 2 重建算法

### 2.1 K-K 相位分析法

迈克尔逊干涉仪的测量过程中, 太赫兹探测器一般只能记录电子束团相干辐射的振幅, 而缺失相位信息, 因此不能简单地通过傅里叶逆变换得到其纵向分布。R. Lai<sup>[20]</sup> 等人提出任意无源系统响应函数的实部和虚部之间存在 K-K 关系, 通过形状因子可以得到相位信息, 由此可以通过傅里叶逆变换尝试得到电子束团的纵向分布特征

$$S(\omega) = \int_0^{\infty} s(t) e^{ikt} dt = \rho_{amp} e^{i\phi(\omega)} \quad (5)$$

振幅和相位的关系为

$$\ln S(\omega) = \ln \rho_{amp} + i\phi(\omega) \quad (6)$$

式中:  $s(t)$  为束团的纵向分布,  $\rho_{amp}$  为形状因子振幅,  $\phi(\omega)$  为形状因子的相位。得到最小相位如下

$$\phi_{min}(\omega) = -\frac{2\omega}{\pi} \int_0^{\infty} d\omega' \frac{\ln[F(\omega')/F(\omega)]}{\omega'^2 - \omega^2} \quad (7)$$

式中:  $F(\omega)$  为对应的形状因子。可以得到电子束团的纵向分布为

$$s(t) = \frac{1}{\pi c} \int_0^{\infty} d\omega \rho_{amp}(\omega) \cos \left[ \phi(\omega) - \frac{\omega t}{c} \right] \quad (8)$$

由式(2)可知, 相位信息需要形状因子已知的情况下才可求出, 其中形状因子 (可以由探测器得到的幅值平方

的傅里叶逆变换得到, 式(3)所示)与频率有关, 但由于高莱探测器频率响应为 0.5~20 THz, 因此无法得出完整频域下的形状因子。L. Frohlich<sup>[21]</sup> 提出对变换后的形状因子进行低频补偿与高频截断, 可以得出相对应的完整频率的形状因子。

高频截断

$$F(\omega) = A\omega^{-B} \quad (9)$$

低频补偿(分为 Taylor 与 Gauss 补偿两种形式)

$$F_{\text{Taylor}}(\omega) = \sqrt{A + B\omega^2} \quad (10)$$

$$F_{\text{Gauss}}(\omega) = A \exp\left(-\frac{\omega^2}{2B^2}\right) \quad (11)$$

式中:  $A$ 、 $B$  分别为拟合系数, 为了避免高频段形状因子急剧下降, 式(9)中  $B$  的值应尽量在该频段形状因子的斜率值。后续的研究我们将通过上述两种补偿与截断方法对实验数据进行 K-K 重建。

## 2.2 代数迭代算法

K-K 算法在纵向束团重建上有很大的局限性, K-K 重建所需的频谱模量必须是已知的, 由于高莱探测器对频谱的响应情况, 实验上所得到的形状因子在低频与高频处缺失信息。通过外推拟合得到的形状因子存在潜在的误差。2014 年, 由 Daniele Pelliccia<sup>[22]</sup> 等人在 Fieup<sup>[23]</sup> 的迭代算法基础上, 提出了一种相位检索算法, 其主要方法是通过快速傅里叶变换, 在时域与频域之中分别施加约束, 从而寻找符合约束的重建结果, 并且通过求解互相关的方式确定最佳解集, 最后将所得结果平均。算法计算流程如图 3 所示。

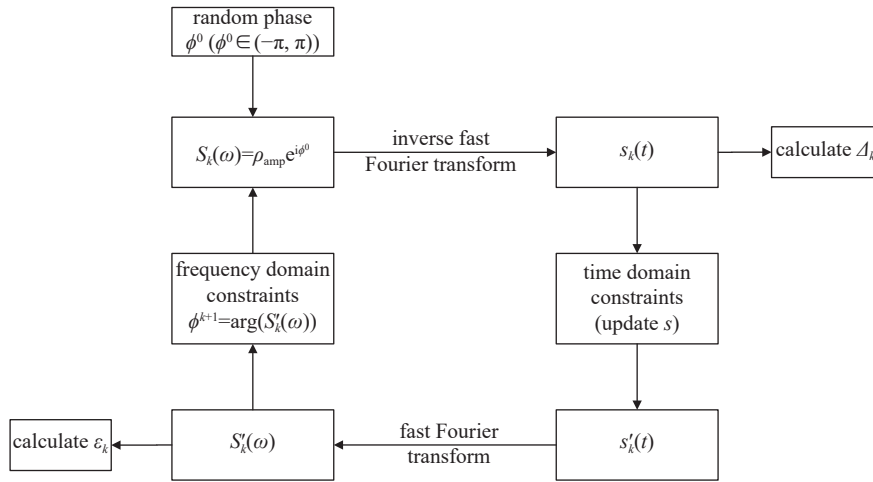


Fig. 3 Flow chart of iterative algorithm

图 3 迭代算法计算流程图

首先, 给定一组随机相位  $\phi^{(0)}$ , 构成初始解集  $S(\omega) = \rho_{\text{amp}} e^{i\phi^{(0)}}$ , 将其进行傅里叶逆变换得到时域下的信号  $s(t)$ 。时域中的约束称为“support”, 如果太小, 算法不能收敛, 如果支持值太大, 则可能同时出现两个或多个不明确的解, 使得重建结果会出现极大的不确定性。本文中我们采用矩形约束, 以确保重建能够正常进行, 得到满足约束条件下的  $s'(t)$ 。

然后, 对其进行傅里叶逆变换, 得到频域信号  $S'(\omega)$ , 频域下的约束只需将  $S'(\omega)$  的幅值替换为  $\rho_{\text{amp}}$ , 保留其相位然后依次进行迭代直到收敛。

为了监测算法是否收敛, Daniele Pelliccia 等人引入了误差因子, 具体形式为

$$\Delta_k = \sum_j \frac{|s_j^{(k+1)}| - |s_j^k|}{|s_j^k|} \quad (12)$$

$$\varepsilon_k = \sum_j \frac{|S_j^k| - \rho_{\text{amp}}}{\rho_{\text{amp}}} \quad (13)$$

式中:  $k$  为迭代代数,  $\Delta_k$  为监测信号时域误差,  $\varepsilon_k$  代表频域幅值与测量幅值的误差, 其典型值为  $\Delta_k \leq 10^{-3}$ ,  $\varepsilon_k \leq 10^{-3}$ 。

由此进行  $n$  次迭代可以得到一组满足典型误差值的解集  $s_j^{\min}(j = 1, \dots, J)$ , 以  $\Delta_k$  最小值为基准, 分别求与其他  $n-1$  组解的互相关系数

$$c_h^n = \frac{\sum_j s_j^{\min} s_{j+h}^n}{\sqrt{\sum_j |s_j^{\min}|^2} \sqrt{\sum_j |s_{j+h}^n|^2}} \quad (14)$$

$$\bar{c}_l^n = \frac{\sum_j s_j^{\min} s_{j-l}^n}{\sqrt{\sum_j |s_j^{\min}|^2} \sqrt{\sum_j |s_{j-l}^n|^2}} \quad (15)$$

最后, 确定  $p_n = \max(c_h^n, \bar{c}_l^n)$  并且使得  $p_n \geq 0.9$ , 将所得结果进行平均。

依此方法可以对信号进行良好的重建, 在每次重构过程中, 依次应用频率空间和实空间的约束。只保留那些既足够接近测量谱幅值又具有较高收敛速度的解, 其次利用互相关函数可以消除时间反转和时间平移的歧义结果, 最后利用算术平均来减小计算过程中引入的误差, 得到最终的重建结果。

### 3 重建算法验证及应用

#### 3.1 重建算法的测试

为了比较两种算法的优缺点, 我们采用图 4 所示的几种分布模型, 进行模拟重建研究。

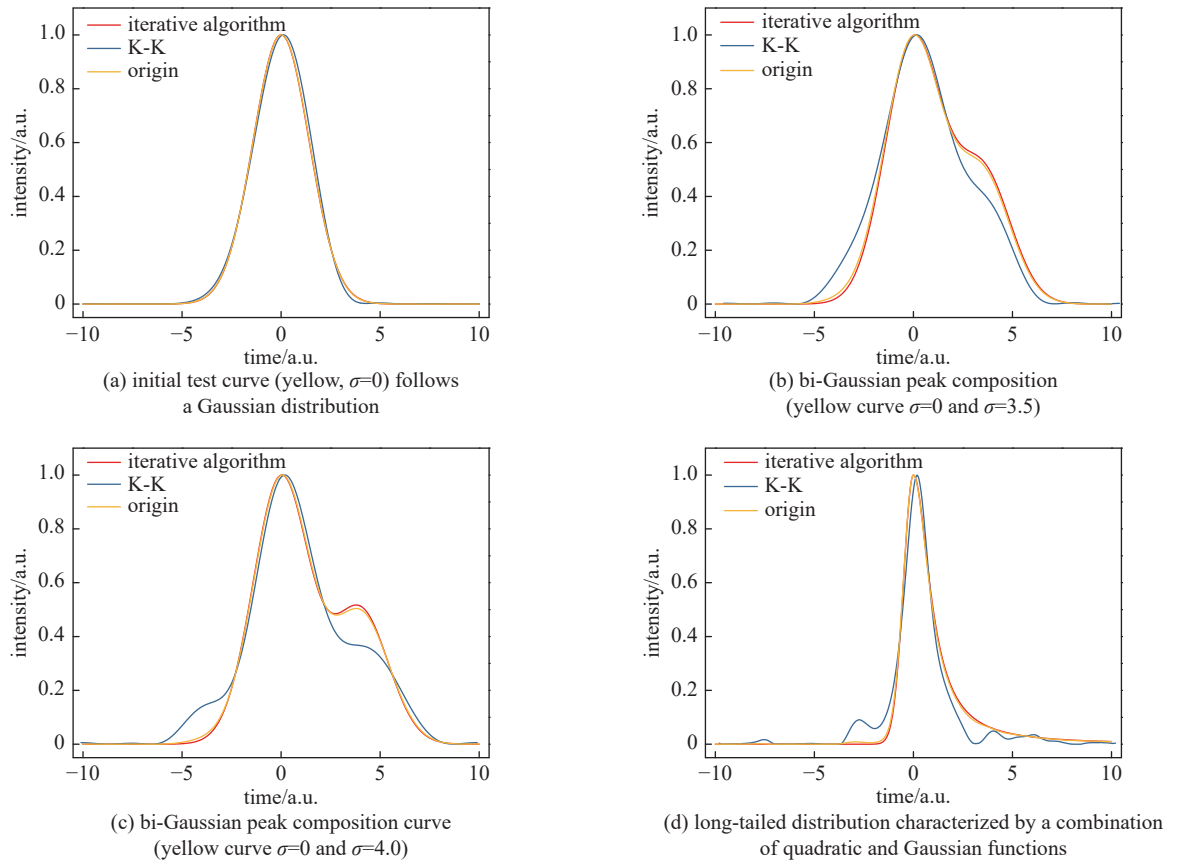


Fig. 4 Simulation experiment outcome of the iterative algorithm

图 4 迭代算法重建模拟实验

图 4(a) 中所所示的是典型的高斯分布, 由于高斯分布特殊性, K-K 或是迭代算法均可以进行完美的重建。由于电子束纵向形状有时呈现多个峰值的情况, 图 4(b)、图 4(c) 测试双高斯峰拟合, 与高斯分布的重建相反, 图 4(b)、图 4(c) 中所所示两个高斯峰重叠基于 K-K (基于最小相位重建, 最小相位的积分会出现求解上的困难) 重建则会出现很多的问题, 图 4(b) 中可以看出, K-K 的求解相比于迭代算法来说, 其半高宽相对较宽, 且在高度较小的峰出现了明显的误差, 图 4(c) 中也能得到相同的结果。

基于迭代算法则可以避免很多问题,通过增加“support”尺寸(非对称的结构可以增加一端的“support”尺寸)可以极大程度地还原信号。上述结论可以在图 4(d)中获得证明。

### 3.2 重建算法的应用

兰州高能电子成像实验平台的布局如图 5 所示<sup>[24]</sup>,其主要包括光阴极微波电子枪、热阴极微波电子枪、阿尔法磁铁、3 m 长的行波加速管和实验终端,实验中电子束能量为 50 MeV,能散 0.5%,束斑 5 mm,归一化发射度 10.5 mm·mrad。目前实验平台只安装了热阴极微波电子枪,电子束团长度正是基于热阴极微波电子枪的电子直线加速器进行测量。

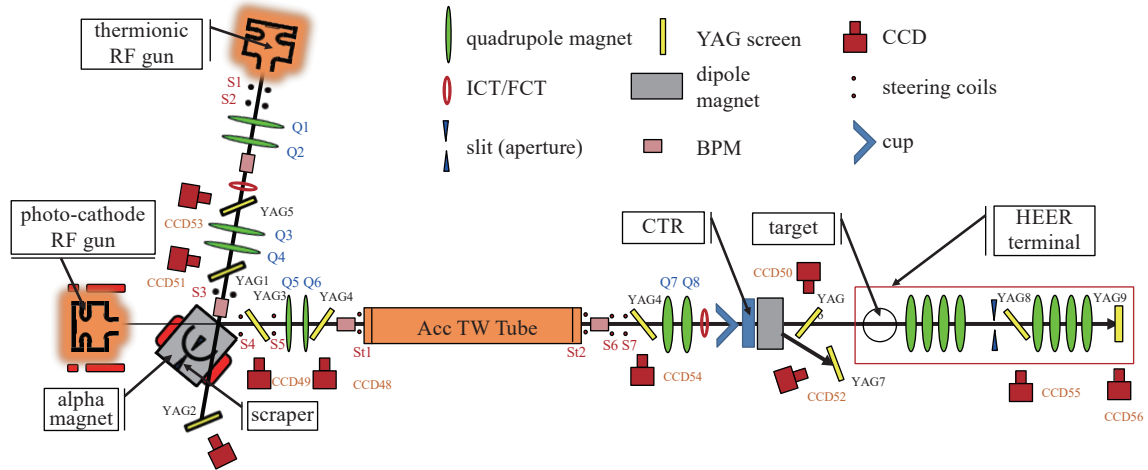


Fig. 5 Layout diagram of the HEER experimental platform

图 5 HEER 实验平台布局图

实验过程中,高能电子与靶相互作用,THz 波经过图 2 装置干涉之后,最后由高莱探测器探测干涉强度。高莱探测器连接一台可远程调节的示波器,干涉强度与输出电压成正比。控制动镜采用的是高精度步进电机,精度为 0.1  $\mu\text{m}$ ,总行程为 150 mm,以保证足够的分辨率。在基础上进行两次测量,测量 5 次干涉强度的统计分析数据如图 6 所示,图 6(a)为首次测量,其中束流宏脉冲峰值流强约为 24 mA。图 6(b)为第二次测量,峰值流强约为 34 mA。第一次实验,设置步长为 5  $\mu\text{m}$ 。第二次实验设定步长为 6  $\mu\text{m}$ 。

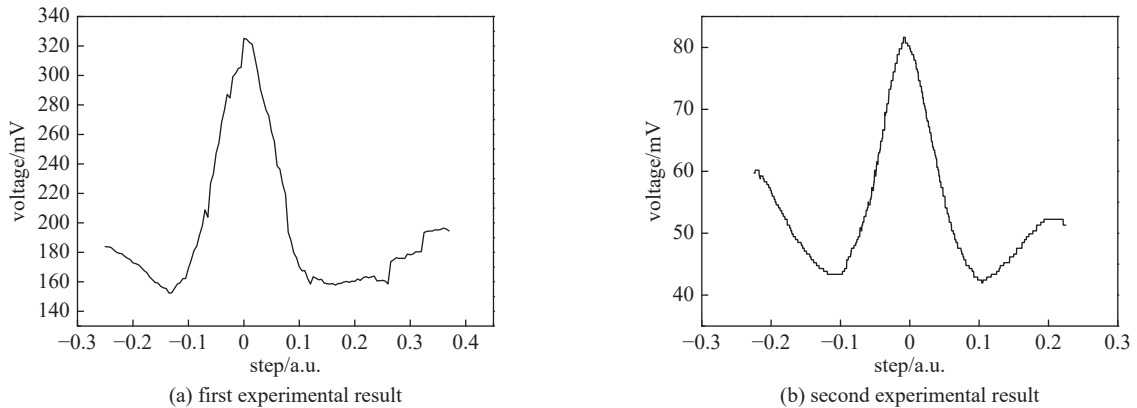


Fig. 6 data of auto-coherence curve

图 6 自相干曲线数据

根据 2.1 节得到如图 7 所示的形状因子,并对低频与高频信号进行外推和截断处理。

通过对图 7 得出的形状因子对比,同一个实验结果在不同的外推以及高频截断拟合下有较为明显的差别,这对依赖形状因子重建的 K-K 算法造成了潜在的误差。

代数迭代算法初始化相位设置取值范围为  $-\pi \sim \pi$  之间的随机值,迭代循环次数分别是 500 以及 1000 次,收敛误差设置为  $\Delta_k \leq 10^{-3}$ ,  $\varepsilon_k \leq 10^{-3}$ 。重建得出的结果如图 8 所示。

可以看出,两种方法都能对测得的信号进行重建,但重建结果有较大的区别。首先,由于形状因子采用不同外

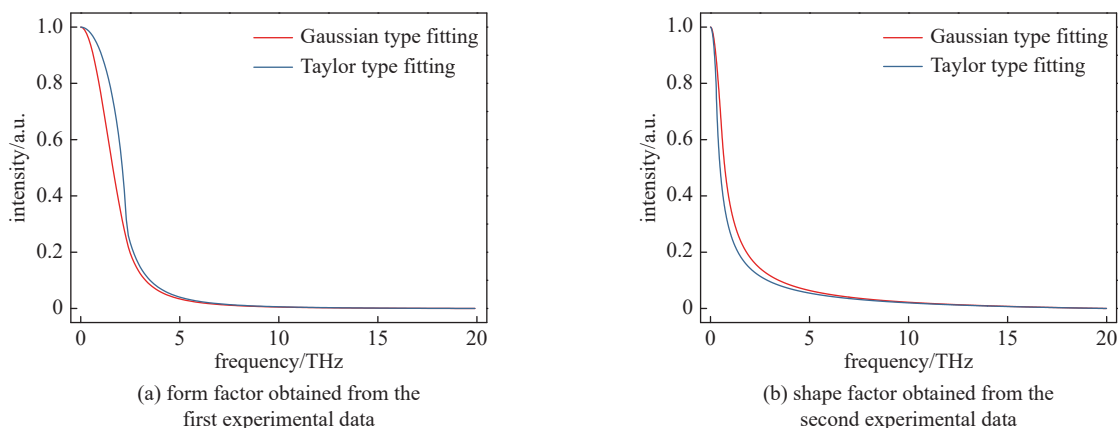


Fig. 7 The form factor is derived through fitting procedures

图 7 拟合后得形状因子

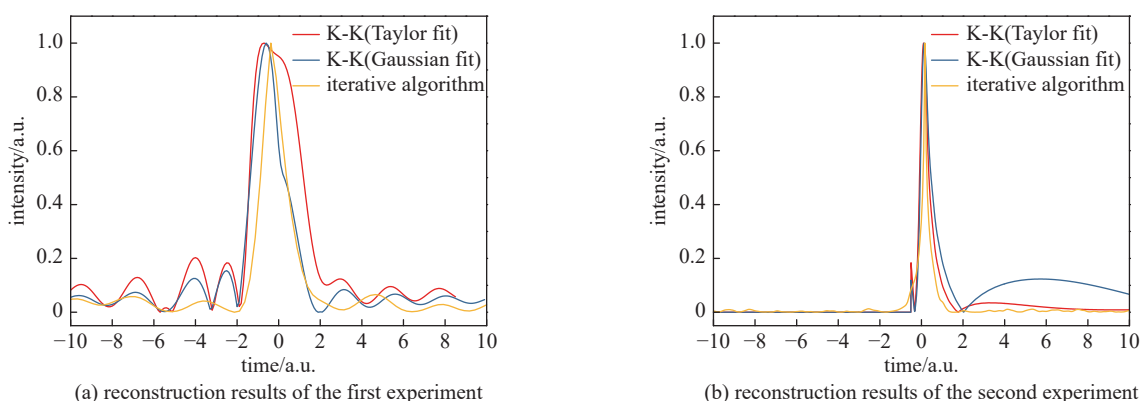


Fig. 8 comparative analysis of results between the K-K algorithm and the iterative algorithm

图 8 K-K 算法与迭代算法结果对比

推形式, 图 8(a) 中的 Gauss 型拟合与 Taylor 型拟合纵向束团形状差别较大, 其中高斯型拟合均方根束长为 0.896 ps, 而 Taylor 型均方根束长为 0.701 ps, 迭代算法得出的均方根束长为 0.539 ps。图 8(b) 中 Gauss 型拟合与 Taylor 型拟合得出的均方根束长分别为 0.195 ps、0.219 ps, 迭代算法重建得出的束长为 0.149 ps, 通过比较以及结合数值模拟, 得出代数迭代算法比较符合理论结果; 其次, 高斯型拟合导致 K-K 算法对于重建后的噪声抑制很差, 而迭代算法可以很好地抑制算法造成的噪声。最后, 图 8(b) 中, 可以看出迭代算法在拖尾重建出相对较好, K-K 算法(高斯或者 Taylor)在拖尾处都出现了较大的误差(Taylor 重建拖尾处的纵向电流强度误差较大), 总体来说, K-K 算法重建的不确定性较大, 迭代算法可以给出一个比较合理重建结果, 并且由于互相关系数与后平均的计算过程, 可以有效地去除噪声与平移、反转信号的歧义。

## 4 结论

本文基于中国科学院兰州近代物理研究所高能电子成像平台, 通过迈克尔逊干涉仪测量相干渡越辐射谱进行纵向束团重建。实验表明, 利用迈克尔逊干涉仪进行实验有一定的优势, 首先装置便于调试和实验, 操作性较高, 且能够通过 K-K 与迭代算法, 重建可能的纵向束流分布。对不同电子束流强下 CTR 测出的干涉谱, 通过迭代算法和 K-K 算法重建结果的比较, 迭代算法在抑制重建噪声、有拖尾束团的重建以及半高宽上的结果较好, 并且迭代算法能够克服 K-K 算法在平移、反转信号的歧义。为基于 CTR 束团长度测量及纵向分布重建提供了一种可靠的方法, 具有普遍适用性。

## 参考文献:

- [1] 张令翔, 庄杰佳, 赵夔, 等. 第四代光源[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(1): 51-55. (Zhang Lingyi, Zhuang Jiejia, Zhao Kui, et al. Fourth-generation light sources[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2001, 13(1): 51-55)
- [2] 闫陇刚, 邓德荣, 张浩, 等. 太赫兹自由电子激光波荡器的设计、测量与优化[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30: 113101. (Yan Longgang, Deng Derong, Zhang Hao, et al. Design, measurement and optimization of undulator for terahertz free electron laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2018, 30: 113101)

- [3] Xiang Dao, Colby E, Dunning M, et al. Demonstration of the echo-enabled harmonic generation technique for short-wavelength seeded free electron lasers[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105: 114801.
- [4] Mangles S P D, Murphy C D, Najmudin Z, et al. Monoenergetic beams of relativistic electrons from intense laser-plasma interactions[J]. *Nature*, 2004, 431(7008): 535-538.
- [5] Brown W J, Anderson S G, Barty C P J, et al. Generation of high brightness X-rays with the PLEIADES Thomson X-ray source[C]//Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference. 2003: 95-97.
- [6] 王季刚, 何志刚, 孙葆根, 等. 条纹相机系统在激光脉冲整形测量中的应用[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(6): 1461-1465. (Wang Jigang, He Zhigang, Sun Baogen, et al. Application of streak camera system to measurement of laser pulse shaping[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(6): 1461-1465)
- [7] Yan X, MacLeod A M, Gillespie W A, et al. Subpicosecond electro-optic measurement of relativistic electron pulses[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(16): 3404-3407.
- [8] Dowell D H, Bolton P R, Clendenin J E, et al. Slice emittance measurements at the SLAC Gun Test Facility[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 507(1/2): 327-330.
- [9] Potylitsyn A P. Transition radiation and diffraction radiation. Similarities and differences[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1998, 145(1/2): 169-179.
- [10] Lihn H C, Kung P, Settakorn C, et al. Measurement of subpicosecond electron pulses[J]. *Physical Review E*, 1996, 53(6): 6413-6418.
- [11] Paech A, Ackermann W, Weiland T, et al. Numerical simulation of synchrotron radiation for bunch diagnostics[C]//Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference (EPAC 06). 2006: 1031-1033.
- [12] Bei Hua, Dai Zhimin. Theoretical and numerical analysis of coherent Smith-Purcell radiation[J]. *Chinese Physics C*, 2008, 32(11): 916-923.
- [13] Muggli P, Blue B E, Clayton C E, et al. Meter-scale plasma-wakefield accelerator driven by a matched electron beam[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 014802.
- [14] Schmidt B, Lockmann N M, Schmüser P, et al. Benchmarking coherent radiation spectroscopy as a tool for high-resolution bunch shape reconstruction at free-electron lasers[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2020, 23: 062801.
- [15] 向导. 高亮度电子束发射度、束长和束斑的先进测量方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2008. (Xiang Dao. Advanced beam measurements of emittance, bunch length, and beam size for high-brightness electron beam[D]. Beijing: Tsinghua University, 2008)
- [16] 边宇. 基于相干渡越辐射的亚皮秒级电子束长测量研究[D]. 上海: 中国科学院大学(上海应用物理研究所), 2017. (Bian Yu. Sub-picosecond electron bunch length measurements using coherent transition radiation at SXFEL[D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences (Shanghai Institute of Applied Physics Chinese Academy of Sciences), 2017)
- [17] Ran Zhaohui, Li Zhongping, Zhao Quantang, et al. Demonstration of high energy electron radiography with sub-micron spatial resolution[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2021, 1015: 165769.
- [18] Bajlekov S I, Heigoldt M, Popp A, et al. Longitudinal electron bunch profile reconstruction by performing phase retrieval on coherent transition radiation spectra[J]. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2013, 16: 040701.
- [19] 艾蕾, 赵全堂, 宗阳, 等. 兰州高能电子成像实验平台电子束团长度测量研究[J]. *原子能科学技术*, 2022, 56(3): 570-576. (Ai Lei, Zhao Quantang, Zong Yang, et al. Study on electron bunch length measurement of Lanzhou high energy electron radiography experimental platform[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2022, 56(3): 570-576)
- [20] Lai R, Sievers A J. On using the coherent far IR radiation produced by a charged-particle bunch to determine its shape: I analysis[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 1997, 397(2/3): 221-231.
- [21] Frhlich L. Bunch length measurements using a Martin-Puplett interferometer at the VUV-FEL[D]. Hamburg Department of Physics of the University, 2005.
- [22] Pelliccia D, Sen T. A two-step method for retrieving the longitudinal profile of an electron bunch from its coherent radiation[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, 764: 206-214.
- [23] Fienup J R, Crimmins T R, Holsztynski W. Reconstruction of the support of an object from the support of its autocorrelation[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1982, 72(5): 610-624.
- [24] 赵全堂, 张子民, 曹树春, 等. 高能电子成像研究进展[J]. *原子能科学技术*, 2019, 53(9): 1651-1655. (Zhao Quantang, Zhang Zimin, Cao Shuchun, et al. Status and progress of high energy electron radiography[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2019, 53(9): 1651-1655)