

基于多参数估计的矢量调制器校正技术 研究及验证

徐一茗 肖诚成 方文程
(中国科学院上海高等研究院 上海 201204)

摘要 上海软 X 射线自由电子激光 (Shanghai Soft X-ray Free-electron Laser, SXFEL) 在搜寻最大加速相位的过程中微波低电平 (Low Level Radio Frequency, LLRF) 系统的射频输出幅度会产生振荡, 进而影响整个装置的稳定性。针对此问题, 本文开发了基于多参数估计的矢量调制器 (Vector Modulator, VM) 校正技术, 用于稳定微波功率源的输出幅度, 并且在闭环控制中降低幅、相两个环路的串扰。该方法首先分析并建立了 VM 的非理想模型, 通过系统真实的输入输出估计模型中的多个参数, 设计了校正算法以补偿非理想因素对系统造成的影响, 使 VM 输出的激励信号不仅具有更好的幅相隔离度, 而且可同时消除输出波形与回测波形之间的相位差。实验结果表明: 经该方法校正后, 相位设定值的改变对 VM 输出幅度的影响由 4.0% (Root Mean Square, RMS) 下降到 0.19% (RMS), 同时相位的设定值与回测值的偏差控制在 0.18° (RMS) 以内。

关键词 低电平控制系统, 矢量调制器, 多参数估计, 误差校正

中图分类号 TL503.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.110202

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2024.47.110202

Design and test of multi-variable estimation-based calibration for vector modulator

XU Yiming XIAO Chengcheng FANG Wencheng

(Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China)

Abstract [Background] The RF output amplitude of the Low Level Radio Frequency (LLRF) system in Shanghai Soft X-ray Free-electron Laser (SXFEL) exhibits oscillations during the search for the maximum accelerating phase, compromising the stability of the entire device. [Purpose] This study aims to develop a multi-variable estimation-based calibration technology for the Vector Modulator (VM) to stabilize the RF output amplitude and reduce the crosstalk between the amplitude and phase loops in closed-loop control. [Methods] A non-ideal model of the VM was analyzed and established to address output amplitude stabilization in the LLRF system's microwave power source. The parameters of this model were estimated using real input and output data from the VM. A calibration algorithm was then designed and implemented to mitigate the adverse effects caused by non-ideal factors. [Results] Experimental results demonstrate that the proposed method reduces the impact of phase setpoint changes on the VM's output amplitude from 4.0% Root Mean Square (RMS) to 0.19% RMS after calibration. Furthermore, the error between the phase setpoint and measured phase was reduced to within 0.18° RMS. [Conclusions] This proposed method improves isolation between amplitude and phase, effectively eliminating phase differences between the output

国家自然科学基金(No.12105345)资助

第一作者: 徐一茗, 男, 1996 年出生, 2022 年于中科院上海应用物理研究所获硕士学位, 研究领域为微波低电平控制系统和控制理论

通信作者: 肖诚成, E-mail: xiaocc@sari.ac.cn; 方文程, E-mail: fangwc@sari.ac.cn

收稿日期: 2023-11-10, 修回日期: 2024-01-03

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12105345)

First author: XU Yiming, male, born in 1996, graduated from Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences with a master's degree in 2022, focusing on low level radio frequency system and control theory

Corresponding author: XIAO Chengcheng, E-mail: xiaocc@sari.ac.cn; FANG Wencheng, E-mail: fangwc@sari.ac.cn

Received date: 2023-11-10, revised date: 2024-01-03

and sampled waveforms.

Key words Low level radio frequency, Vector modulator, Multi-variable estimation, Error calibration

上海软 X 射线自由电子激光用户装置 (Shanghai Soft X-ray Free-electron Laser User Facility, SXFEL-UF) 已建造完成并通过国家验收^[1-2]。目前,在 SXFEL 下一阶段的升级改造工作中^[3-4],需要频繁调节电子束的有无或强弱,这要求射频系统具备准确且快速的调控能力^[5]。微波低电平 (Low Level Radio Frequency, LLRF) 控制系统作为激励源,完全管控着高功率系统输出微波脉冲的幅度、相位和脉宽等属性^[6]。最大加速相位搜寻过程中,一般会在加速结构所能承受的最大微波功率水平处^[7]通过扫相的方式最大化能量利用率。实践中,由于矢量调制器 (Vector Modulator, VM) I/Q (In-phase and Quadrature)^[8]两路控制信号的延时不同、串扰和增益不匹配等模拟电路的非理想性因素,当低电平单独调节相位时,输出幅度也会随之发生明显的涨落,这种现象容易造成速调管或者微波结构打火,进而造成丢束和死时间。之后不得不耗费大量机时恢复,这将严重影响运行时长与效率。与此同时,上述互耦现象会在幅、相两个控制闭环间形成串扰,将降低微波功率的稳定性。除此之外,互耦的消除还会减小频率调制中的谐波,提高能量利用率的同时还能防止反射功率的危害。

针对模拟器件输出失真的问题,常用的解决方案有定标法、逐次调节法以及前馈补偿法等^[9-10]。低电平输出由幅度和相位两个维度描述,并且 SXFEL 要求闭环控制精度分别在 0.1% (Root Mean Square, RMS) 和 0.1° (RMS) 以内。若采用定标法则需要二维空间中两百万个点来刻画前馈表。以目前 SXFEL 中控室对低电平 10 次/s 的控制速率计算,整个标定过程将持续 2~3 d。标定期间,环境变化会给电子学带来明显的慢漂,就算得到了前馈表,大部分数据也已失真,无法代表当下的系统状态。如果采用逐次调节法,相当于每当设定值改变时马上进行反馈控制。该方法虽精度高且不受慢漂影响,但调控时间会随精度的提高而增加。当切换 SXFEL 十余台低电平的相位时,逐次调节法引入的死时间会拉低调束效率。综上所述,本文选择前馈补偿法来消除幅相互耦问题。为了对已有微波单元进行最小改动,仅在现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 中添加矫正模块^[11],来对矢量调制器的两路控制信号进行前馈控制。

VM 补偿方案需综合考虑控制的精度、速率以及对慢漂的克服。本文先是建立了包含各种器件非

理想因素的 VM 误差模型。然后基于此模型,设计了在线、参数可调的矫正模块作为 FPGA 最后一级输出。通过测量不同的相位设定值处低电平的真实输出,估计模型中非理想因素的具体数值,进而计算出相关的矫正参数,该过程能在 1 min 内完成。文章的最后,简单介绍了微波测试平台,并在平台上对上述前馈矫正法进行验证。实验结果表明,单独改变相位设定值的情况下,输出幅度的涨落由 4.0% (RMS) 下降到 0.19% (RMS),且相位回测值与设定值之间的偏差在 0.18° (RMS) 以内。上述指标满足 SXFEL 的运行需求。

1 矢量调制器的误差模型

VM 是一种微波元器件,因为能连续调制任意频率微波信号的增益以及相移,所以广泛应用在相控阵列天线、高速通讯系统以及粒子加速器等领域中^[12]。通过 I 和 Q 两路外部输入信号的控制,VM 输出的幅相被独立地刻画在二维平面中。理想 VM 的功能模块如图 1 所示。参考信号 (REF) 通过一个 90° 移相器^[13-14],被分为两路相互正交的信号,随后分别与控制信号相乘再相加,得到 VM 输出信号。通过 I 与 Q ,便实现了对输出增益与相移的独立调节。并且给定任意的增益与相移,都能轻易反推出对应的 I/Q 。

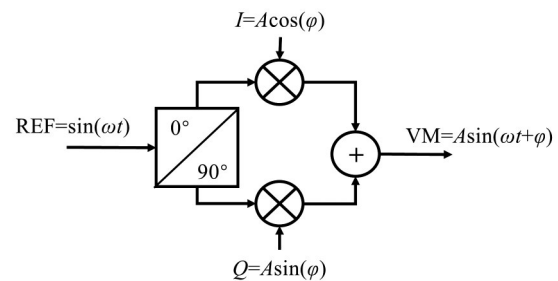


图1 理想 VM 的模块图

Fig.1 Block diagram of ideal vector modulator

在实际使用中,按照理想模型单独调节幅度或相位时,另一个变量也会随之发生明显变化。这是模拟器件存在多种非理想因素所致,具体原因如图 2 所示。首先,由于数字模拟转换器 (Digital-Analog Convertor, DAC) 直流偏置的影响, FPGA 产生的数字信号 I_{in} 和 Q_{in} 会分别叠加上 I_{offset} 和 Q_{offset} 。然后 I 、 Q 以模拟信号的形式,经过各级传输线进入乘法器。两路传输线之间存在串扰,等价于对 I/Q 组成的复

变量 $(I + jQ)$ 进行正交变换,即乘以复数 $(k_i + jk_q)$,其中 j 为虚数单位。与此同时,REF被 90° 移相器分为两路正交信号送往两个乘法器的过程中,由于器件公差以及传输线延时的不同,在系统中引入了共模噪声, g 和 ψ 分别表示两通路之间的增益不平衡与

相移不平衡。两路信号相加后作为VM输出,低电平再对其进行回测。射频(Radio Frequency, RF)信号经过下变频以及4倍 I/Q 解调后,还原出 I_{out} 和 Q_{out} 两个直流正交分量。

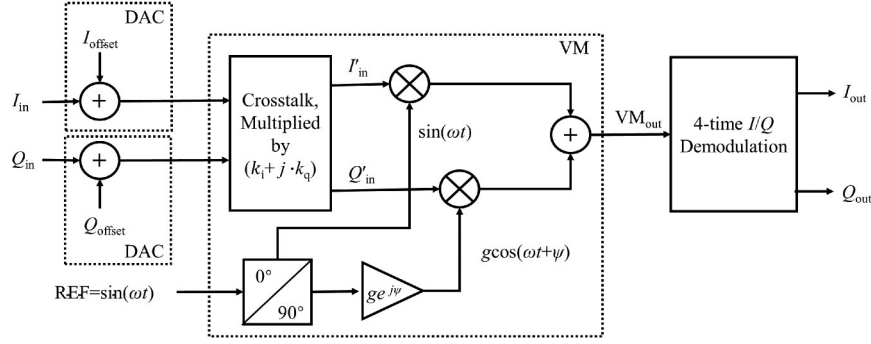


图2 非理想VM模型示意图
Fig.2 Black diagram of non-ideal vector modulator model

如果期望得到幅度 A 、相位 φ 的RF信号,即设定 $I_{in} = A \cos(\varphi)$ 、 $Q_{in} = A \sin(\varphi)$,在上述非理想模型中可计算得到:

$$I'_{in} + jQ'_{in} = [(I_{in} + I_{offset}) + j(Q_{in} + Q_{offset})](k_i + jk_q)$$

$$\begin{bmatrix} I'_{in} \\ Q'_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_i(I_{in} + I_{offset}) - k_q(Q_{in} + Q_{offset}) \\ k_q(I_{in} + I_{offset}) + k_i(Q_{in} + Q_{offset}) \end{bmatrix}$$

$$VM_{out} = I'_{in} \cos(\omega t) + gQ'_{in} \sin(\omega t + \psi)$$

VM_{out}经过 I/Q 解调后,可以得到:

$$\begin{bmatrix} I_{out} \\ Q_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I'_{in} + gQ'_{in} \sin(\psi) \\ gQ'_{in} \cos(\psi) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e \\ f \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \end{bmatrix} + \mathbf{N}$$

即为系统的传递函数,其中,

$$\begin{cases} a = k_i + k_q g \sin(\psi), b = -k_q + k_i g \sin(\psi) \\ c = k_q g \cos(\psi), d = k_i g \cos(\psi) \\ e = aI_{offset} + bQ_{offset}, f = cI_{offset} + dQ_{offset} \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)可以看出,当自变量 (I_{in}, Q_{in}) 在平面中的单位圆上移动时,因变量 (I_{out}, Q_{out}) 的轨迹是一个中心不在原点上的椭圆,如图3所示。如此便解释了单独改变幅度或相位时,另一个变量也会随之改变的原因。

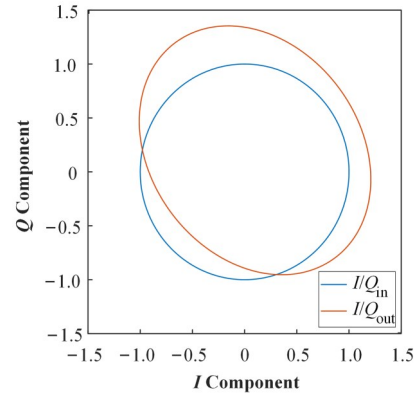


图3 非理想VM输入输出的映射关系(彩图见网络版)
Fig.3 Mapping relationship between the input and output of non-ideal VM (color online)

2 基于多参数估计的前馈矫正

由式(1)和(2)可知,系统的传递函数与控制信号 I/Q 无关,只要知道矩阵 $\mathbf{M}$ 和 $\mathbf{N}$ 的具体数值,就获得了系统的全部信息,进而设计控制策略。VM的非理想因素中,串扰和幅相不平衡因子难以通过测量仪器直接得到,所以选择使用参数估计来获取传递矩阵 $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{N}$ 。

定义输入矩阵 $\mathbf{U}$:

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} A \cos\left(\frac{0 \cdot 2\pi}{n}\right) & A \cos\left(\frac{1 \cdot 2\pi}{n}\right) & \cdots & A \cos\left(\frac{(n-1) \cdot 2\pi}{n}\right) \\ A \sin\left(\frac{0 \cdot 2\pi}{n}\right) & A \sin\left(\frac{1 \cdot 2\pi}{n}\right) & \cdots & A \sin\left(\frac{(n-1) \cdot 2\pi}{n}\right) \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: A 为不超过DAC量程的任意正整数; n 为大于6的整数。FPGA依次将矩阵 U 中每一列的第一和第二个元素分别输两路的DAC,如此便会回测得到 n 组VM输出,它们构成测量矩阵 Y ,并定义参数矩阵 L ,如式(4)表示:

$$Y = \begin{bmatrix} I_{out,0} & I_{out,1} & \dots & I_{out,n-1} \\ Q_{out,0} & Q_{out,1} & \dots & Q_{out,n-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$L = [M \ N] = \begin{bmatrix} a & b & e \\ c & d & f \end{bmatrix}$$

因为调束过程中,通常会先固定微波功率的幅度,然后逐步寻找最大加速相位,所以参数估计时,将测试点均匀地分布在一个圆轨迹上,以尽可能减少系统非线性带来的误差。估计目标为找到矩阵 L ,使得损失函数 $J = \|Y - LU\|$ 最小,对 L 求导,极值点处导数等于0,即

$$\frac{d}{dL} J = (Y - LU)U^T = 0$$

$$L = [M \ N] = YU^T(UU^T)^{-1} \quad (5)$$

得到参数 L 即得到了 M 和 N ,定义估计误差 $\sigma = \frac{J}{\|Y\|}$ 。下一步开始设计矫正算法,我们希望输出的轨迹也在同心圆上。算法在FPGA中实现,即控制信号矫正后再输入误差模型,应具有下述形式

$$\begin{bmatrix} I_{out} \\ Q_{out} \end{bmatrix} = M \left(P \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \end{bmatrix} + R \right) + N = k \begin{bmatrix} I_{in} \\ Q_{in} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: P 为 2×2 的方阵; R 为 2×1 的矩阵; k 为正实

数。在矫正的同时,我们希望尽可能保持低电平原有的输出量程与分度值,即 P 的行列式应满足, $\det(P) = 1$,因为方阵的行列式代表着空间中的单位元经过该方阵所对应的线性变换后的面积。 $\text{rank}(P) = 2$,求解方程(6)可以得出:

$$k = \det(M)^{1/\text{rank}(P)} = \sqrt{\det(M)},$$

$$P = \sqrt{\det(M)} M^{-1}, R = -M^{-1}N \quad (7)$$

综上所述, P 和 R 即为前馈控制的两个矫正系数。

3 低电平架构与微波实验平台搭建

使用自主研发的基于CPCI(Compact Peripheral Component Interconnect)架构的低电平控制系统作为实验平台。图4展示了实验平台上的信号流以及CPCI低电平的实物图。微波信号发生器(Rohde & Schwarz SMW200A)产生2 856 MHz的正弦波,作为整个系统的基准时钟以及分频器的主振(Master Oscillator, MO)。MO通过同轴电缆接入低电平,频率转换器对其进行分频并得到三路信号^[15],分别是保持原频率的REF,模拟数字转换器(Analog-Digital Convertor, ADC)、DAC以及FPGA使用的105.7 MHz同步时钟信号CLK,2 829.6 MHz用于下变频的本振信号。VM输出通过外部的同轴线接回低电平进行回测,先与本振信号进行混频再低通滤波,下变频到26.4 MHz中频(Intermediate

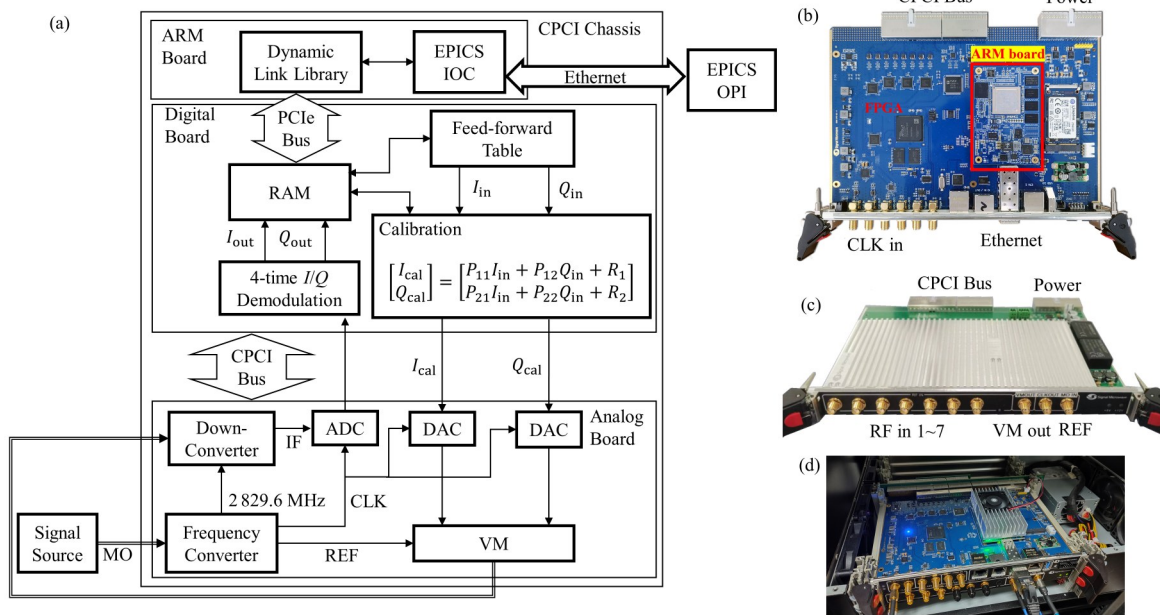


图4 微波实验平台逻辑架构(a)、数字板卡(b)、模拟板卡(c)以及CPCI低电平实物图(d)
Fig.4 Logical architecture of RF experimental setup (a), and snapshots of digital board (b), analog board (c), and CPCI-based LLRF (d)

frequency, IF), 由ADC采样。模拟板与数字板通过CPCI背板总线连接, ADC输出和DAC输入均通过背板总线传输。

图4(a)数字板中的所有模块均由FPGA实现。运行过程中使用的参数和计算结果存储在随机存取存储器(Random Access Memory, RAM)的固定地址处, FPGA中的各模块和其他设备周期性地读写RAM, 即可实现FPGA与外设的实时通讯, 以获取采样波形或修改算法中的参数, 刷新间隔设置为1 s。ADC采样结果经过4倍 IQ 解调, 分离出 I_{out} 和 Q_{out} 两个分量, 存入RAM等待上位机读取。前馈表中存放了输出脉冲的波形信息, 由外部触发信号控制输出脉冲的起点(图4中未画出)。输出波形经过校正模块后, 由背板总线传输到DAC。校正参数 P 、 R 可通过RAM实时修改。

数字板上搭载了一块核心板, 两者通过PCIe(Peripheral Component Interconnect Express)交互。核心板的主要器件是一个安装了Linux操作系统的ARM架构处理器。实验物理和工业控制系统(Experimental Physics and Industrial Control System, EPICS)在该平台被开发, 用于共享、保存、实时显示低电平运行过程中的数据。将PCIe驱动编译成动态链接库, 供EPICS调用以实现与FPGA的高速通讯。核心板作为EPICS的输入输出控制器(Input and Output Controller, IOC), 通过以太网与上位机相连。上位机作为EPICS的操作界面(Operator Interface, OPI), 由PyDM开发, 能实时显示并控制各寄存器的状态、数值以及波形, 支持基于Python脚本的运行状态调节和数据处理。图5展示了部分图形界面。

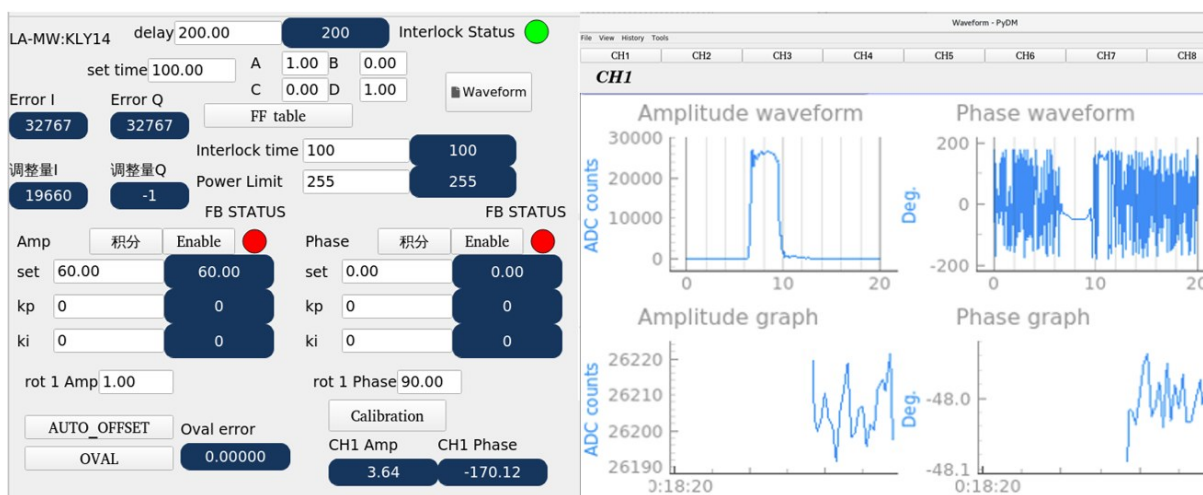


图5 操作界面截图
Fig.5 Screenshot of OPI

4 实验验证与分析

首先调节低电平的输出幅度, 在不超过ADC量程的情况下尽可能大, 以提高信噪比。先将校正参数 P 、 R 设置为单位矩阵和零矩阵, 即 $(I_{cal}, Q_{cal}) = (I_{in}, Q_{in})$ 。保持设定幅度不变, 等间距改变设定相位, 从 -180° 旋转到 175° , 并测量每个设定点处的VM输出。每 5° 测量一个点, 一共测量了72个角度, 用每个微波脉冲中间30个采样点的平均值表示该脉冲的幅相。为了减小噪声干扰, 每个设定点重复测量10个脉冲, 它们平均值表示该设定点处低电平的输出, 10个脉冲的标准差表示设备的不稳定性。然后, 按照式(3)、式(4)生成观测矩阵 U 、 Y , 并根据式(5)、式(7)计算系统的传递参数 M 、 N 和校正参数 P 、 R 。将 P 、 R 下发到FPGA相应的寄存器中。最后

重新测量72个角度的VM输出, 与校正前的结果进行对比。根据实验数据, 各参数的计算结果如下:

$$M = \begin{bmatrix} -0.8303 & -0.3814 \\ 0.3589 & -0.7386 \end{bmatrix}, N = \begin{bmatrix} 240 \\ 158 \end{bmatrix}$$

$$k = 0.8661, P = \begin{bmatrix} -0.8528 & 0.4404 \\ -0.4144 & -0.9586 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 156 \\ 290 \end{bmatrix}$$

估计误差为0.0018。实验结果如图6所示, 两个圆轨迹的开口处分别为相位旋转的起点与终点。可以看出, 算法补偿了输出量与设定值的相位偏差, 并且两个圆的面积基本相当, 即校正算法没有改变低电平输出微波的分度值与量程。图7更详细地展示了校正前后VM输出幅度稳定性的变化。从图7(a)可以得出, 单独调节设定相位时, 幅度稳定性从4%(RMS)提升到了0.19%(RMS)。图7(b)是校正后VM输出幅度曲线的放大图, 由于在每个设定点

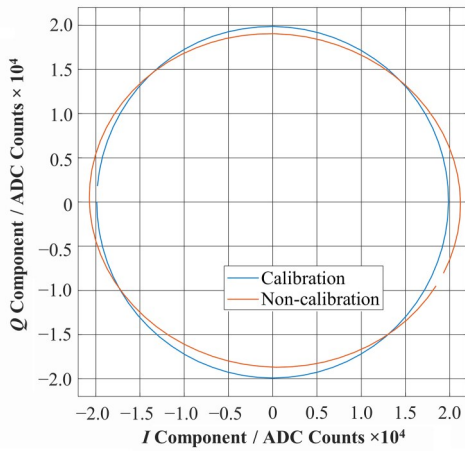


图6 矫正前后VM输出的轨迹(彩图见网络版)
Fig.6 VM output track before and after calibration (color online)

都测量了10个脉冲,用它们两倍的标准差来表示系

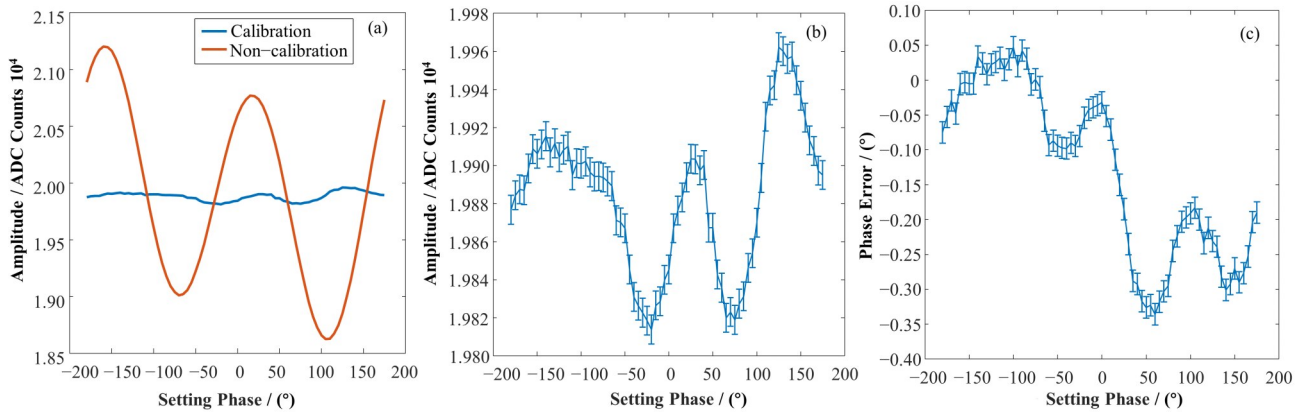


图7 矫正前后VM输出幅度随相位的变化(a)、矫正后VM输出幅度与白噪声(b)、VM输出相位与设定相位的误差(c)
Fig.7 Variation of the VM output amplitude with the setting phase before and after calibration (a), VM output amplitude after calibration and white noise (b), error between VM output phase and setting phase (c)

5 结语

本文详细分析了矢量调制器在粒子加速器中的实际使用场景下存在的非理想性,并由此建立了误差模型和设计了前馈矫正算法。通过回测低电平的输出,对模型中的多个参数进行估计,最终实现幅相隔离。该方法无须改动硬件,具有估计速度快、精度高、灵活的优势。使用过程中,如果发生了明显的慢漂或人为改变系统的硬件,只需短暂地重新估计即可将设备调整至最优状态。实验结果表明,单独调节相位时,矫正前后输出幅度的涨落从4%(RMS)减小到了0.19%(RMS),输出相位与设定值的偏差为0.18°(RMS),满足SXFEL的运行调试需求。

作者贡献声明 徐一茗负责方案设计、理论分析、数据、收集与处理、论文写作、软件支持;肖诚成负责结果验证、资金获取;方方程负责实验监督、论文审核。

统中的白噪声并用误差尺标出,其幅度为信号的0.038%。图7(c)中测量相位与设定相位的误差为0.18°(RMS),依旧标出了10个脉冲间两倍标准差的误差尺,值为0.015°。

由于低电平系统中还存在诸多非线性误差,如ADC、DAC、乘法器的非线性、电缆的弯折、较长实验持续时间带来的慢漂、电磁干扰等因素,所以矫正后输出的幅度相位依旧存在可观测的涨落和偏差。不过,实际使用中并不需要测量如此密集的设定值以及重复脉冲,所以估计传递参数所持续的时间远没有如此之长,系统不会出现明显的慢漂。其次,该前馈矫正算法的主要任务是保证寻找最大加速相位的过程中微波功率的涨落不会引起加速结构打火,本文所呈现的幅度稳定性完全可以接受。微波的长期稳定性由另外的闭环反馈控制保证。综上所述,该方法完全可以用到SXFEL的实际运行中。

参考文献

- 1 Feng C, Deng H X. Review of fully coherent free-electron lasers[J]. Nuclear Science and Techniques, 2018, 29(11): 160. DOI: 10.1007/s41365-018-0490-1.
- 2 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.
- 3 方方程, 谭建豪, 张俊强, 等. 软X射线自由电子激光试验装置微波系统[J]. 真空电子技术, 2021(1): 32 - 37,

46. DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2021.01.06.
FANG Wencheng, TAN Jianhao, ZHANG Junqiang, *et al.*
Microwave system of soft X-ray free electron laser test
facility[J]. Vacuum Electronics, 2021(1): 32 - 37, 46.
DOI: 10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2021.01.06.
- 4 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.
- 5 宫鹏鹏, 赵玉彬, 侯洪涛, 等. 上海光源谐波腔系统的前
端变频模块方案设计[J]. 核技术, 2019, **42**(1): 010101.
DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010101.
GONG Pengpeng, ZHAO Yubin, HOU Hongtao, *et al.*
Front-end frequency conversion module design for
harmonic RF system in SSRF[J]. Nuclear Techniques,
2019, **42**(1): 010101. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.
hjs.42.010101.
- 6 Xu Y M, Zhang J Q, Xiao C C, *et al.* Design and
verification of adaptive control to generate flat-top radio
frequency power output of pulse compressor for SXFEL
[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics
Research A, 2022, **1031**: 166596. DOI: 10.1016/j.nima.
2022.166596.
- 7 杜朝海, 刘濮鲲, 薛谦忠, 等. 具有高稳定性的超高增益
回旋行波管放大器[J]. 电子与信息学报, 2010, **32**(7):
1717 - 1720. DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.00880.
DU Chaohai, LIU Pukun, XUE Qianzhong, *et al.* An ultra-
high gain gyrotron traveling-wave amplifier with high
stability[J]. Journal of Electronics & Information
Technology, 2010, **32**(7): 1717 - 1720. DOI: 10.3724/SP.J.
1146.2009.00880.
- 8 全欣, 张梦瑶, 刘简, 等. 一种基于双通道非线性反馈架
构的模拟域功率放大器线性化技术[J]. 电子与信息学
报, 2023, **45**(12): 4211 - 4217.
QUAN Xin, ZHANG Mengyao, LIU Jian, *et al.*
Linearization of analog domain power amplifier based on
two-channel nonlinear feedback architecture[J]. Journal
of Electronics & Information Technology, 2023, **45**(12):
4211 - 4217.
- 9 陈雷, 岳光荣, 唐俊林, 等. 基于数字预失真的发射机 I/
Q 不平衡校正[J]. 电子与信息学报, 2017, **39**(4): 847 -
853. DOI: 10.11999/JEIT160581.
CHEN Lei, YUE Guangrong, TANG Junlin, *et al.*
Calibration of transmitter I/Q imbalance based on digital
pre-distortion[J]. Journal of Electronics & Information
Technology, 2017, **39**(4): 847 - 853. DOI: 10.11999/
JEIT160581.
- 10 吴焕铭, 杨海钢, 尹韬, 等. 一款基于解调信号相位校正
技术的低噪声微陀螺接口电路芯片[J]. 电子与信息学
报, 2013, **35**(10): 2524 - 2531. DOI: 10.3724/SP.J.1146.
2012.01511.
WU Huanming, YANG Haigang, YIN Tao, *et al.* A low
noise micro-gyroscope interface circuit on chip with
demodulation signal phase calibration technique[J].
Journal of Electronics & Information Technology, 2013,
35(10): 2524 - 2531. DOI: 10.3724/SP. J. 1146.2012.
01511.
- 11 李松, 张俊强, 张猛, 等. 基于 FPGA 的电子直线加速器
低电平系统前馈功能的实现[J]. 核技术, 2016, **39**(7):
070402. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.070402.
LI Song, ZHANG Junqiang, ZHANG Meng, *et al.*
Implementation of FPGA-based feedforward function in
LLRF system for electron LINAC[J]. Nuclear
Techniques, 2016, **39**(7): 070402. DOI: 10.11889/j.0253-
3219.2016.hjs.39.070402.
- 12 Wang C, Miao J G. Implementation and broadband
calibration of a multichannel vector modulator module[J].
IET Science, Measurement & Technology, 2017, **11**(2):
155 - 163. DOI: 10.1049/iet-smt.2016.0072.
- 13 徐一茗. 基于自适应算法的低电平射频控制技术研究
[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2022.
DOI: 10.27585/d.cnki.gkshs.2022.000093.
XU Yiming. Technology research of low level radio
frequency control system based on adaptive algorithm[D].
Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese
Academy of Sciences, 2022. DOI: 10.27585/d.cnki.gkshs.
2022.000093.
- 14 肖诚成, 尹哲, 张俊强, 等. 低电平系统中 C 波段时钟本
振的设计及测试[J]. 核技术, 2021, **44**(1): 010201. DOI:
10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010201.
XIAO Chengcheng, YIN Zhe, ZHANG Junqiang, *et al.*

- Design and test of a C band local oscillator and clock device in LLRF[J]. Nuclear Techniques, 2021, **44**(1): 010201. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.010201.
- 15 徐一茗, 张俊强, 肖诚成, 等. 用于实现能量倍增器平顶输出的双环PI控制技术研究及验证[J]. 核技术, 2022, **45**(6): 060102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060102.
- XU Yiming, ZHANG Junqiang, XIAO Chengcheng, *et al.* Design and test of double PI-control loop to generate flat-top output of RF pulse compressor[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(6): 060102. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.060102.