

文章编号: 1007-4627(2015)02-0196-06

LLRF超导腔体控制系统的测试

朱正龙^{1,3}, 王贤武¹, 李春龙¹, 常玮¹, 张生虎¹, 张军辉¹,
张瑞锋¹, 文良华⁴, 高郑^{1,2}, 陈奇^{1,2}, 岳伟明¹, 宋玉莹¹

(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;

3. 西北师范大学, 兰州 730070;

4. 宜宾学院物理与电子工程学院, 四川 宜宾 644000)

摘要: 中国科学院近代物理研究所自主研发的 ADS 注入器 II 第一代高频低电平 (LLRF) 控制系统, 工作频率为 162.5 MHz; LLRF 系统是由基于 I/Q 采样的正交解调技术构成的全数字闭环反馈控制系统, 其主要功能是实现超导腔体电压幅值稳定控制、相位稳定控制与腔体谐振频率控制; LLRF 控制系统在液氮温区超导腔上进行了系统稳定性和性能的在线测试, 根据实验数据计算得超导腔体电压幅度稳定度为 $\pm 3.4\%$, 相位稳定度为 $\pm 0.3^\circ$, 腔体表面峰值电场 (E_{pk}) 能长时间稳定在 25.1 MV/m。通过实验测试, 检验了 LLRF 控制系统的性能, 并对测试过程中出现的问题进行了分析, 为将来超导腔 LLRF 控制系统运行积累了经验。

关键词: LLRF; 幅度相位; 稳定度; 控制系统; 测试

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/ NuclPhysRev.32.02.196

1 引言

加速器驱动的次临界系统 (ADS), 是有效减少核废料放射性的途径之一^[1]。中国科学院近代物理研究所承担的 ADS 直线加速器高频系统的工作频率是 162.5 MHz; 其直线超导腔采用半波长谐振腔 (HWR) 形式, 腔的 Q_{Load} 在超导条件下为 1×10^6 ^[2]。国内做成高频低电平 (LLRF) 控制系统的还有中国科学院高能物理研究所和上海应用物理研究所。国外有美国密歇根州立大学 (MSU)、美国 Jefferson 国家实验室 (JLab)、德国电子同步加速器 (DESY)、日本高能物理研究所 (KEN) 等实验室也在研发低电平控制系统, 各个实验室的控制对象以及研究方法和研究方向各不相同。基本上 LLRF 控制系统的设计思想和理念都是借鉴国外实验室的成功案例, 控制系统实现上也是比较相像。LLRF 控制系统从系统搭建形式上分为模拟系统和数字系统, 从控制的模式上可以分为自激模式和它激模式, 从控制算法的实现上有 IQ 解调和非 IQ 解调之分。有关 LLRF 系统的具体实现见参考文献 [2]。本文首先简述 LLRF 控制系统, 其次介绍腔体锻炼和测试, 然后对实验数据进行讨论, 最后进行总结。本文的重点工作是 LLRF 控制系统在超导

腔上的测试。

2 LLRF 控制系统简述

中国科学院近代物理研究所于 2012 年完成了第一代数字 LLRF 控制系统的设计、搭建、调试和常温腔 (模型铜腔) 上的测试工作。LLRF 整体结构如图 1 所示。LLRF 控制系统硬件主要包括如下几个部分: 模拟前端、时钟分配和数字模块。本系统的外部时钟频率为 162.5 MHz, 本征频率为 131.78 MHz, 中频频率为 30.72 MHz。LLRF 控制系统实现了对 4 路信号的同时采样和处理, 并且完成一路信号的恢复和输出。工作的流程是外部信号 (频率为 162.5 MHz) 输入到 LLRF 控制系统中, 首先与本征信号混频取下变频的信号, 得到频率为 30.72 MHz 的中频, 再通过 ADC 采样 (采样频率 122.88 MHz), 一个周期采 4 个点, 送入 FPGA 进行数字处理, PPGA 处理之后生产输出波形, 通过 DAC (恢复频率 122.88 MHz) 恢复成中频信号, 中频信号与本征信号做混频后取上变频信号输出。LLRF 控制系统通过计算采样信号的相位差, 控制电机的运动方向, 完成频率调谐的功能。

收稿日期: 2014-07-07; 修改日期: 2014-09-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (91026001)

作者简介: 朱正龙 (1990-), 男, 甘肃平凉人, 助理工程师, 从事加速器高频 LLRF 相关技术; zhuzhl@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>

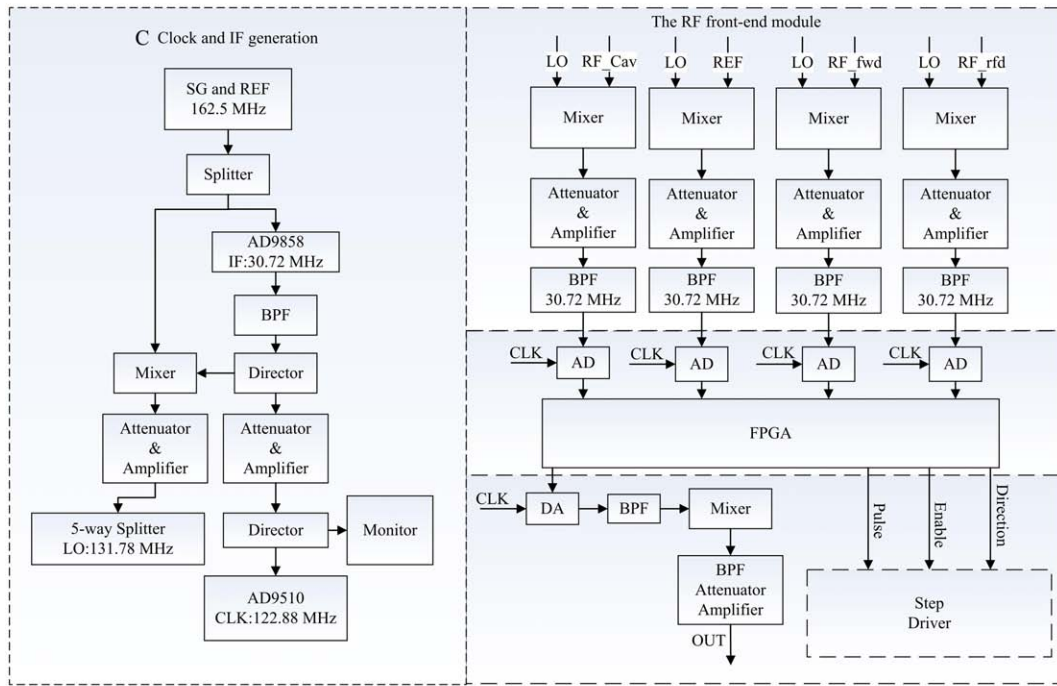


图 1 (在线彩图) 第一代数字 LLRF 整体结构框图

2.1 信号采样与恢复

腔体频率 162.5 MHz, 下变频至中频 30.72 MHz, 采样频率 122.88 MHz, 采样信号频率是中频信号频率的 4 倍, 满足采样定理。这样设计的原因是可以直接采到 IQ 的组合序列, 通过 IQ 解调, 获得 I 序列和 Q 序列。如果定义第一个采样值为 I, 则有序列 I, Q, -I, -Q, I, Q, …, 如果用 S(n) 表示 IQ 序列, I(n) 表示 I 序列, Q(n) 表示 Q 序列, 则有:

$$S(n) = I, Q, -I, -Q, I, Q \dots (n = 1, 2 \dots), \quad (1)$$

$$I(n) = \frac{S(n) - S(n+2)}{2}, \quad (2)$$

$$Q(n) = \frac{S(n+1) - S(n+3)}{2}. \quad (3)$$

2.2 PI 控制

通过前面的介绍, 把 I 序列和 Q 序列通过 Cordic 旋转, 得到信号幅度和相位, 对幅度和相位分别用 PI 参数调节, 然后经过数字 DDS 得到输出波形, 模数转换成中频。若 Cordic 转出的幅度和相位为 Amp(n) 和 Pha(n), 幅度设定值和相位设定值分别为 A 和 P, 则经过 PI 控制器的输出幅度 Amp_adjust(n) 和相位 Pha_adjust(n) 分别如式 (6) 和式 (7) 所示:

$$sum_a(n) = \sum_1^M \left\{ sum_a(n-1) + Ki * [A - Amp(n)] \right\}, sum_a(0) = 0, \quad (4)$$

$$sum_p(n) = \sum_1^M \left\{ sum_p(n-1) + Ki * [P - Pha(n)] \right\}, sum_p(0) = 0, \quad (5)$$

$$Amp_adjust(n) = Kp * (A - Amp(n) + sum_a(n)) \quad n = 1, 2 \dots M; \quad (6)$$

$$Pha_adjust(n) = Kp * (P - Pha(n) + sum_p(n)) \quad n = 1, 2 \dots M; \quad (7)$$

其中 M 为已采样的次数。

3 腔体锻炼和测试

3.1 测试方案

LLRF 控制系统的测试环路, 如图 2 所示。系统通过两个环路接在超导腔上, 分别是幅度相位环路和频调环路。幅度相位环路: 由 LLRF 控制系统输出 Out 经过一个可调衰减器, 控制 20 kW 功率源, 功率源输出经过定向耦合器, 然后通过腔体耦合器馈入超导腔中, 再从腔体上提取信号, 经过放大器和可调衰减器的调理, 经过功分器分为两路, 其中一路作为 Cavity 信号, 送入

LLRF控制系统，组成环路。频调环路：在定向耦合器上取前向信号Forward，再从功分器取一路信号

为Reflected信号，鉴相得相位差，然后通过算法控制电机驱动器，完成调谐环路。

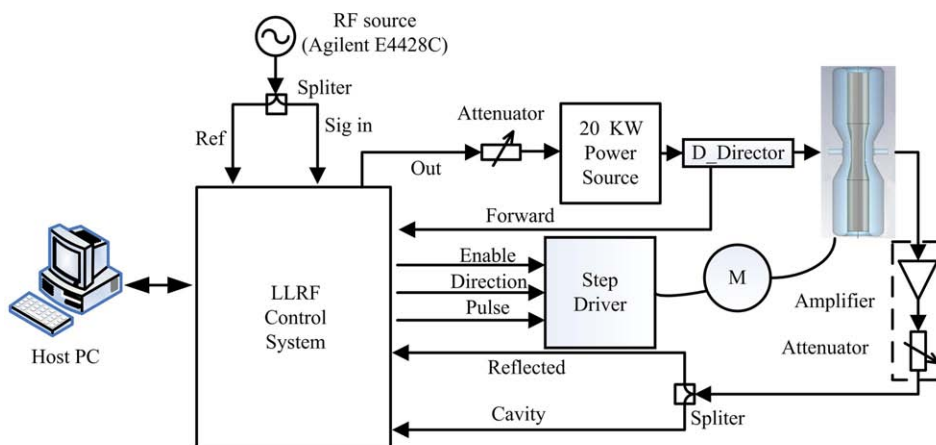


图 2 (在线彩图) LLRF 控制系统测试环路

上位机和 LLRF 控制系统通过以太网通信。上位机主要功能：显示腔体信号幅度相位信息，控制腔体幅度和相位环路的开闭，控制调谐器环路的开闭。另外上位机配置 AD9858 和 AD9510 工作频率和输出频率，输出端口等。

配置好各个模块的软件和输入输出信号之后，通过调节信号源频率，在频谱仪上找到腔体频率的谐振峰，控制功率源输出功率不要过大，以免烧坏环路仪器。测试发现，腔体谐振频率位置上的性能很差，Multipacting^[3]很严重，根据国外实验室的经验，需要对腔体进行长时间的锻炼，以减小或消除 Multipacting，才能用 LLRF 控制系统完成测试。

3.2 腔体锻炼

刚开始测试，腔体的性能不好，容易激起 Multipacting，需要对腔体进行打脉冲锻炼。由于 LLRF 控制系统只有连续模式，没有脉冲模式，所以利用 Agilent E4428C 信号源的 FM 调制功能，搭建了一个 VCO-PLL^[4]锁相环路。如图 3 所示，VCO-PLL 环路能够锁定腔体频率，然后锁定腔体谐振频率打脉冲。脉冲频率 1 Hz，占空比 70%。

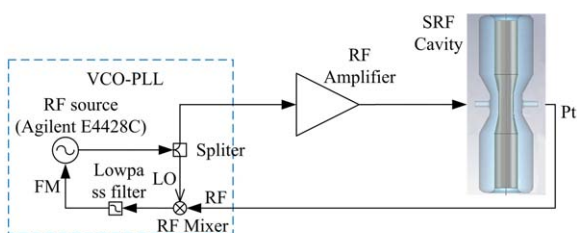


图 3 (在线彩图) 脉冲锻炼腔体示意图

经过一段时间的脉冲锻炼，腔体性能还是没有明显好转。测试发现调偏信号源频率，偏离腔体谐振频率，不容易激起 Multipacting，此时 LLRF 控制系统更容易对腔体幅度和相位进行闭环操作和控制。但是一旦控制系统闭环，功率源输出功率瞬间变大，腔体激起 Multipacting，随后腔体的场消失，等再次建立起腔体的场，又有 Multipacting 的存在，如此反复，达不到 LLRF 控制的要求，控制系统很难控制腔体信号。需要继续对腔体进行锻炼。

脉冲锻炼只是锻炼腔体某一频率点的性能，但腔体的谐振频率会随氦压和温度的变化而浮动，所以需要腔体的性能在一个比较宽的频率范围比较好，才能适合 LLRF 控制系统运行和控制。利用 Agilent E4428C 信号源，固定幅度，使输出信号频率在一定范围里反复变化，从而实现对腔体的扫频锻炼，扫频锻炼的效果比打脉冲锻炼好很多。腔体 Multipacting 频谱图 4 所示。

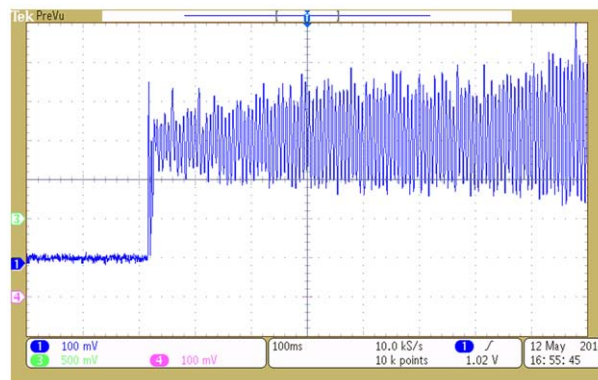


图 4 (在线彩图) Multipacting 经过检波器的波形

4 实验数据与讨论

对腔体经过长时间的扫频锻炼, 腔体的性能有所改善, 达到 LLRF 控制系统的控制要求, LLRF 控制系统能够比较容易地控制腔体幅度和相位, 使其能够长时间的稳定。

经过长时间的扫频锻炼(累计超高 170 h 的扫频老练), 腔体 Multipacting 有一定的改善, 老练之前 LLRF 控制系统完全不能锁定腔体谐振频率, 老练

之后系统能够控制腔体信号的幅度和相位并且能够闭环。LLRF 控制系统能够控制腔电压的幅值和相位并能保持稳定很长一段时间(测试中最长维持 3 小时 40 分钟的稳定)。图 5 为 LLRF 控制系统界面在闭环稳定状态持续 45 min 时的截图, 包含幅度和相位闭环控制接口和 PI 控制器的参数设置, 腔体的振幅和相位的信号曲线。图中的两条曲线表明, 在闭环状态下 LLRF 控制系统能够保持腔信号的振幅和相位稳定, E_{pk} 达到 25.1 MV/m。

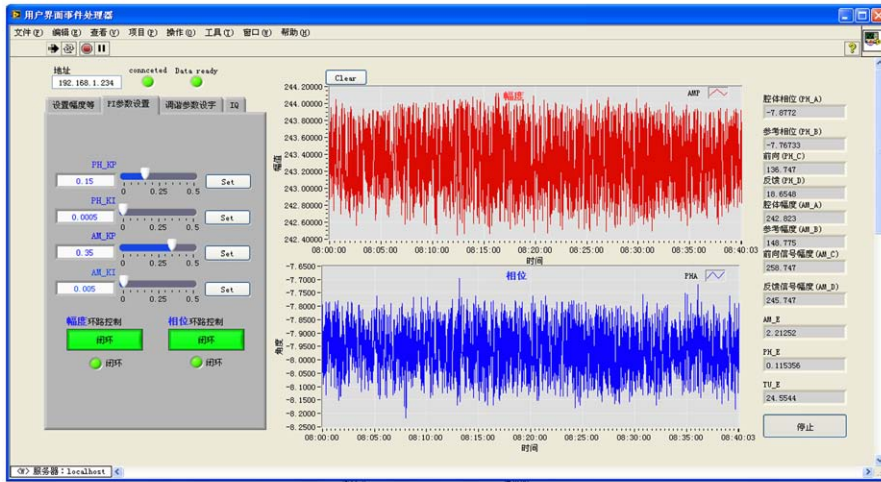


图 5 (在线彩图) LLRF控制系统界面

图 6 为在幅度相位开环状态下模腔的提取信号的频谱, 从图中可以看出, 频谱仪的带宽为 2 kHz, 腔体谐振峰在 200 Hz 范围内。除了主峰, 两侧有相对大的相位噪声, 但腔体的 Multipacting 消失, 腔体谐振频率和幅度抖动都不大。在这种情况下, 有利于 LLRF 控制系统的闭环控制。

图7为在幅度相位闭环状态下提取的腔体信号频谱。

从腔体信号频谱可以看出, 在本闭环状态时, 腔体的相位噪声信号被有效地抑制, 此时腔体信号是相对稳定的, 相位噪声被抑制到约 -106 dBm。但是, 也可以从图中看到, 主峰两侧存在相位噪声的小峰。这表明, PI控制器的参数不是最佳的, 所以 PI 参数需要进行调整, 以抑制相位噪声的幅度。

图 6 和图 7 是 LLRF 控制系统幅度相位闭环控制前



图 6 (在线彩图) 环状态下腔体信号频谱

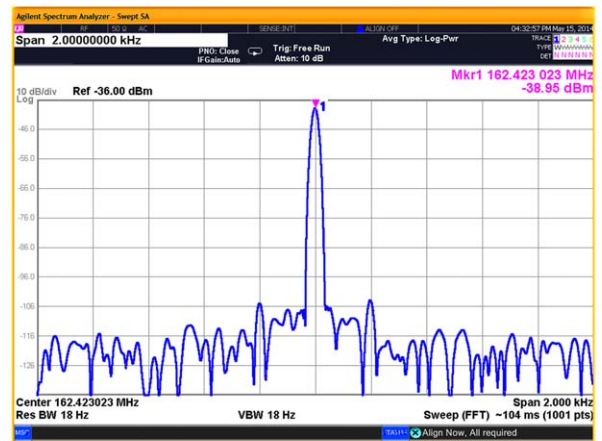


图 7 (在线彩图) 闭环状态下腔体信号频谱

后腔体信号的频谱。可以看出 LLRF 控制系统很好地抑制了腔体信号频谱上的相位噪声，达到了很好的控制效果。闭环之后，通过调节 PI 参数，能够很好地抑制相位噪声，腔体信号和噪声信号幅度相差 70 dBm 左右，如图 7 所示，信噪比很高。

通过调节 PI 控制器的参数，如图 5 中的比例增益 PH_KI。LLRF 控制系统的相位噪声抑制效果逐渐增强。图 7 和图 8 为不同 PI 参数下的腔体信号的频谱。如图 8 所示，LLRF 控制系统的抑制效果非常好。除了主要的共振峰，空腔的其他噪声信号振幅被抑制得非常低，并且在这种状态下，闭环状态能够保持稳定很长一段时间，持续稳定 3 h 以上。

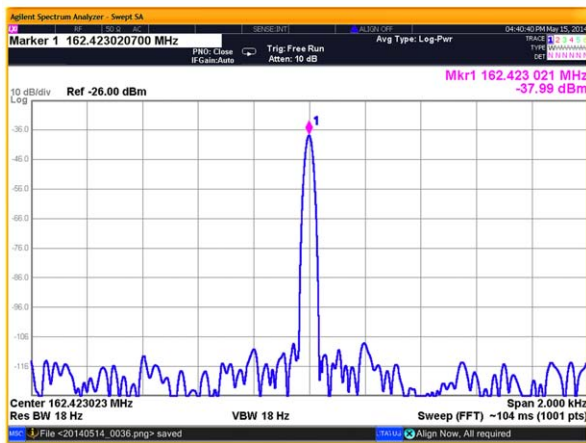


图 8 (在线彩图) 闭环状态下调整控制参数后的腔体信号频谱

5 结论与展望

针对超导腔高 $Q_{Load}(Q_L)$ 值、低带宽的特点，高频 LLRF 系统基于 IQ 技术的全数字控制技术设计研发。本文在液氦低温超导腔上对 LLRF 控制系统进行测试和分析，为进一步优化系统，积累相关技术参数。现

场运行指标：腔体电压幅值稳定度 $< \pm 6 \times 10^{-3}$ ，相位稳定度 $< \pm 0.7^\circ\text{C}$ ，频率失谐角度 $< \pm 0.6^\circ\text{C}$ ，工作点加速梯度 $E_{acc} \geq 4.7 \text{ MV/m}$ ，腔体表面峰值电场 $E_{pk} \geq 25 \text{ MV/m}$ 。由实验数据算出幅度稳定度 $\pm 3.4\%$ ，相位稳定度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ， E_{pk} 可以达到 25.1 MV/m 且能长时间稳定。达到了测试目标，完成了 LLRF 控制系统在低温超导腔上的控制测试。这是中国科学院近代物理研究所第一次成功采用 LLRF 控制系统实现对超导在线控制测试，有着重大的意义。

系统在常温下的铜腔上做了测试，控制性能非常好，达到了设计指标和控制要求。在低温超导下的铌腔， Q_L 值达到了 1×10^6 ，带宽非常窄，约为 230 Hz，并且用了 20 KW 的功率源，另外还有温度、氦压、氦液位、真空等等影响因素，腔体本身还会激起 Multipacting 在为 LLRF 控制系统控制超导腔带来了挑战。测试中也存在一些问题：例如超导腔必须在没有或者避开 Multipacting 的时候，LLRF 控制系统才能投入测试工作；控制算法的 PI 参数整定需要根据工程师的经验和实际的运行情况来调节；控制电机调谐的效果不是很好。下一步的工作就要对上述问题进行分析和处理，包括算法的改进，硬件的升级等等。

参考文献：

- [1] SU Guan yu, GU Hanyang, CHENG Xu. Atomic Energy Science and Technology, 2012, **2**(2): 186. (in Chinese) (苏冠宇, 顾汉洋, 程旭. 原子能科学技术, 2012, **2**(2): 186.)
- [2] WEN Lianghua, WANG Xianwu, HE Yuan, *et al.* Chinese Physics C, 2013, **37**(8): 087004.
- [3] HANSAN PADAMSEE. RF Superconductivity for Accelerators[M]. New York: A Wiley- Interscience Publication, 1998: 179
- [4] GARDNER F M. Phaselock Techniques[M]. Second Edition. John Wiley & Sons, 1979: 112.

Test of LLRF Control System on Superconducting Cavity

ZHU Zhenglong^{1,3,1)}, WANG Xianwu¹, LI Chunlong¹, CHANG Wei¹, ZHANG Shenghu¹, ZHANG Junhui¹,
ZHANG Ruifeng¹, WEN Lianghua⁴, GAO Zheng^{1,2}, CHEN Qi^{1,2}, YUE Weiming¹, SONG Yukun¹

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

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;*

4. *School of Physics and Electronic Engineering, Yibin University, Yibin 644000, Sichuan, China)*

Abstract: The first generation Low-Level radio frequency(LLRF) control system for China ADS injector II is developed by IMP, CAS(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences). This system is composed by superconducting cavity amplitude stability controller, phase stability controller and the cavity resonance frequency controller; the operation frequency is 162.5 MHz. This is an all-digital closed-loop feedback control system which based on the IQ quadrature sampling demodulation technique. The performance of the system has been tested on the superconducting cavity, which is running in the temperature range of liquid helium and the $E_{pk}=25.1$ MV/m (the peak electric field on the surface of the superconducting cavity). The amplitude stability is less than ± 3.4 ‰ and the phase stability is less than $\pm 0.3^\circ$. Superconducting cavity bandwidth is about 230 Hz. From the spectrum, the phase noise suppression can reach 70 dBm.

Key words: Low-Level radio frequency; amplitude and phase; stability; control system; test

Received date: 7 Jul. 2014; **Revised date:** 5 Sep. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (91026001)

1) E-mail: zhuzhl@impcas.ac.cn.

<http://www.npr.ac.cn>