

上海光源谐波腔系统的前端变频模块方案设计

宫鹏鹏^{1,2,3} 赵玉彬^{1,3} 侯洪涛^{1,3} 张志刚^{1,3} 郑湘^{1,3} 徐凯^{1,3} 常强^{1,3}
夏洋洋^{1,2,3} 刘建飞^{1,3}

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(上海市低温超导高频腔技术重点实验室 上海 201800)

摘要 上海光源是第三代同步辐射光源。在上海光源的二期工程中,超导三次谐波腔将用于拉伸束团长度,提升束流托歇克寿命。三次谐波腔工作在被动模式下,谐波腔工作频率(约 1.5 GHz)为主腔工作频率(约 500 MHz)的三倍。为实现谐波腔高频系统的调谐控制,需要对 1.5 GHz 信号进行下变频处理,便于后端对信号采样处理。本文介绍了三种下变频的方案,将 1.5 GHz 射频信号降频为 31.25 MHz 中频信号,分析了各个方案的特点和影响下变频结果的因素。测试结果显示:三种变频方案在不同的动态范围具有良好的线性,均已满足谐波腔控制需求。其中基于倍频器的变频模块为最优方案,其线性动态区间大于 70 dB,同时产生的中频信号的相位噪声最低,最终将在谐波腔的控制系统中采用。

关键词 三次谐波腔, 下变频, 低电平, 托歇克寿命

中图分类号 TL503.2

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.010101

Front-end frequency conversion module design for harmonic RF system in SSRF

GONG Pengpeng^{1,2,3} ZHAO Yubin^{1,3} HOU Hongtao^{1,3} ZHANG Zhigang^{1,3} ZHENG Xiang^{1,3} XU Kai^{1,3}
CHANG Qiang^{1,3} XIA Yangyang^{1,2,3} LIU Jianfei^{1,3}

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 Key Laboratory of Cryogenics & Superconducting RF Technology, Shanghai 201800, China)

Abstract [Background] Shanghai synchrotron radiation facility (SSRF) is the third generation synchrotron radiation source. In the phase II project, the third harmonic superconducting cavity will be used to improve Touschek lifetime by lengthening the bunch. [Purpose] This study aims to achieve the tuning control of the harmonic radio frequency (RF) system by frequency reduction of the 1.5 GHz signal from harmonic cavity for signal sampling in the control system. [Methods] First of all, three kinds of frequency conversion schemes were introduced. Then outcomes of reducing 1.5 GHz RF signal to 31.25 MHz intermediate frequency (IF) signal by using these three schemes were performed. Finally the characteristics of each scheme and the factors affecting the results of down conversion are

国家自然科学基金(No.11335014)资助

第一作者: 宫鹏鹏, 男, 1992年出生, 2014年毕业于中国科学技术大学, 现为博士研究生, 研究领域为核技术应用

通信作者: 刘建飞, E-mail: liujianfei@sinap.ac.cn

收稿日期: 2018-08-24, 修回日期: 2018-09-18

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11335014)

First author: GONG Pengpeng, male, born in 1992, graduated from University of Science and Technology of China in 2014, doctoral student, focusing on nuclear technology application

Corresponding author: LIU Jianfei, E-mail: liujianfei@sinap.ac.cn

Received date: 2018-08-24, revised date: 2018-09-18

analyzed. **[Results]** The test results shown that three down conversion schemes has good linearity in different dynamic range and met control system specifications. The optimal scheme based on frequency multiplier achieved best performance of linear dynamic range greater than 70 dB and lowest phase noise of IF signal. **[Conclusion]** A down conversion scheme with frequency multiplier will be applied in the harmonic RF control system.

Key words Third harmonic cavity, Down conversion, Low level radio frequency (LLRF), Touschek lifetime

对同步辐射光源来说,束流寿命是重要的参数之一^[1]。随着上海光源(Shanghai Synchrotron Radiation Facility, SSRF)进一步完善和改进,会有越来越多的插入件引入,插入件的引入也会对束流寿命有较大的影响。上海光源的束团长度短(14 ps),发射度小(3.9 nm·rad),影响束流寿命主要因素是托歇克散射^[2]。束流寿命问题是上海光源面临的几个主要挑战之一。上海光源计划在二期改造工程中使用三次超导谐波腔,通过拉伸束团提高束流托歇克寿命。高次谐波腔能够降低束流电荷密度,同时对束流能散度和光源亮度的影响非常小^[3-6]。二期中使用的谐波腔由束流感应建立电场,工作频率约为1.5 GHz,不需额外的功率源^[7]。由于以上原因谐波腔的高频系统与目前上海光源的低电平系统会有较大差别。本文主要介绍谐波腔高频系统的前端变频模块的设计,介绍了三种初步变频方案和实验,分析和对比了不同混频结构和器件应用的可行性。

1 变频基本原理

一般的变频处理都是基于混频器器件。混频器的输出与两个输入信号的乘积成比例^[8]。对于一个射频(Radio Frequency, RF)信号,可以表示为:

$$u_{RF} = A_{RF} \cos(2\pi f_{RF} t) \quad (1)$$

本振(Local Oscillator, LO)信号也可以表示成:

$$u_{LO} = A_{LO} \cos(2\pi f_{LO} t) \quad (2)$$

混频器输出信号可以表示为:

$$\begin{aligned} u &= K u_{RF} u_{LO} \\ &= K A_{RF} A_{LO} \left[\cos(2\pi f_{RF} t) \cos(2\pi f_{LO} t) \right] \\ &= \frac{K A_{LO}}{2} A_{RF} \left[\cos(2\pi (f_{RF} - f_{LO}) t) + \cos(2\pi (f_{RF} + f_{LO}) t) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: K 为变频损耗引入有单位常量。对混频后信号进行滤波处理,得到频率为 $f_{IF}=f_{RF}-f_{LO}$ 的中频(Intermediate Frequency, IF)信号:

$$u_{IF} = K_1 A_{RF} \cos(2\pi (f_{RF} - f_{LO}) t) \quad (4)$$

式中: $K_1 = \frac{K A_{LO}}{2} K_0$, K_0 为滤波引入损耗常量。通过这样混频和滤波可以将高频信号频率降低,进行采

样,这是一般的下变频原理。上变频的原理基本类似,只是滤波保留 $f_{RF}+f_{LO}$ 频率成分项。

2 上海光源谐波腔高频系统

谐波腔高频系统的控制目标是稳定谐波腔的腔压和相位。上海光源将使用被动式谐波腔工作在大失谐条件下,感应腔压的失谐相位稳定在接近 90° 位置。超导谐波腔感应腔压幅度固定时,束流寿命不会随流强而改变^[9]。

三次谐波腔高频系统分为前端变频模块、数字处理模块和调谐器控制模块三个模块(图1)。高频信号经过前端变频模块降频转化为中频信号;中频信号传输到数字处理模块,经过同相/正交(In-phase/Quadrature, I/Q)采样、数字滤波等处理后得到谐波腔工作状态参量,数字处理模块根据状态参量驱动控制调谐器模块,控制压电陶瓷和伺服电机对谐波腔进行调谐,形成调谐环路。

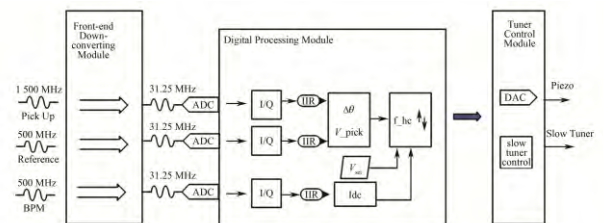


图1 上海光源三次谐波腔高频系统初步设计框图
Fig.1 Layout of the preliminary design of third harmonic RF system in SSRF

在初步方案设计中,谐波腔工作状态的确定需要束流位置探测器(Beam Position Monitor, BPM)的感应信号、谐波腔感应腔压信号以及信号源的参考信号三种信号。束流位置探测器感应信号可以确定束流流强信息;谐波腔感应腔压信号可以确定谐波腔腔压信息;信号源的参考信号和谐波腔感应腔压信号的相位信息可以确定失谐的方向信息。前端变频模块需对以上三种信号进行变频处理,考虑兼容光源的低电平系统,变频的中频信号频率定为31.25 MHz。

谐波腔的1.5 GHz变频与上海光源低电平系统的变频模块(图2)工作条件有较大的区别。

三次谐波腔感应电场频率为 1.5 GHz, 远高于信号源频率 500 MHz, 实现混频需要考虑升高本振信号频率和多级降低射频信号频率两种思路。同时由于使用高 Q 值的超导腔, 下变频模块必须具有较大的线性区间, 用来保证调谐系统在小信号和强信号工作条件下均能正常工作, 该线性区间至少为 30 dB。

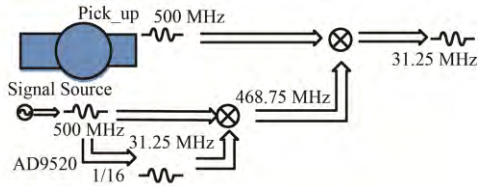


图2 上海光源低电平系统变频模块简图
Fig.2 Brief schematic of down-converting module in SSRF

3 谐波腔高频系统的前端变频模块方案设计

3.1 参考信号两倍频噪声影响

式(3)为理想混频器, 实际上混频后频率成分较为复杂, 需要考虑器件隔离度以及非线性带来的影响。若只考虑 1 次和 2 次噪声影响, 实际的混频后信号可以写成:

$$u' \approx u + A_1 \cos(2\pi f_{RF} t) + A_2 \cos(4\pi f_{RF} t) + B_1 \cos(2\pi f_{LO} t) + B_2 \cos(4\pi f_{LO} t) \quad (5)$$

频率成分为 f_{RF} 和 f_{LO} 的混频噪声主要来自器件隔离度影响, 是需要滤波的主要项。 $2f_{RF}$ 频率的噪声来自混频非线性和输入射频信号本身 2 次谐波部分, 该项相对其他成分贡献较小。 $2f_{LO}$ 频率的噪声来

自参考信号混频非线性和参考信号本身的 2 次谐波成分, 与 $2f_{RF}$ 的噪声不同, $2f_{LO}$ 频率噪声的强度与参考信号 LO 正相关。当输入 RF 信号功率远小于 LO 信号功率时, $2f_{LO}$ 频率噪声会显著影响混频线性。为实际测试 $2f_{LO}$ 频率噪声对混频的影响, 用几种不同型号的混频器构建输入 RF 信号为 1.5 GHz, LO 信号为 500 MHz, 输出中频信号为 1 GHz 的混频测试结构, 并对其进行线性测试(测试结果见图 3)。

测试发现, 当 RF 信号功率比 LO 信号弱 30 dB 以下时, 混频线性会迅速变差, 因此在混频方案设计中需避免 $2f_{LO}$ 频率噪声的混叠。

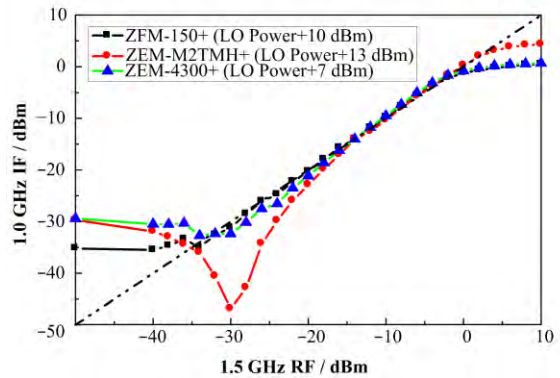


图3 几种混频器件测试(RF: 1.5 GHz, LO: 500 MHz)
Fig.3 Mixers test results (RF: 1.5 GHz, LO: 500 MHz)

3.2 三种混频方案设计

针对谐波腔高频系统的要求, 设计了三种变频方案(图 4)。

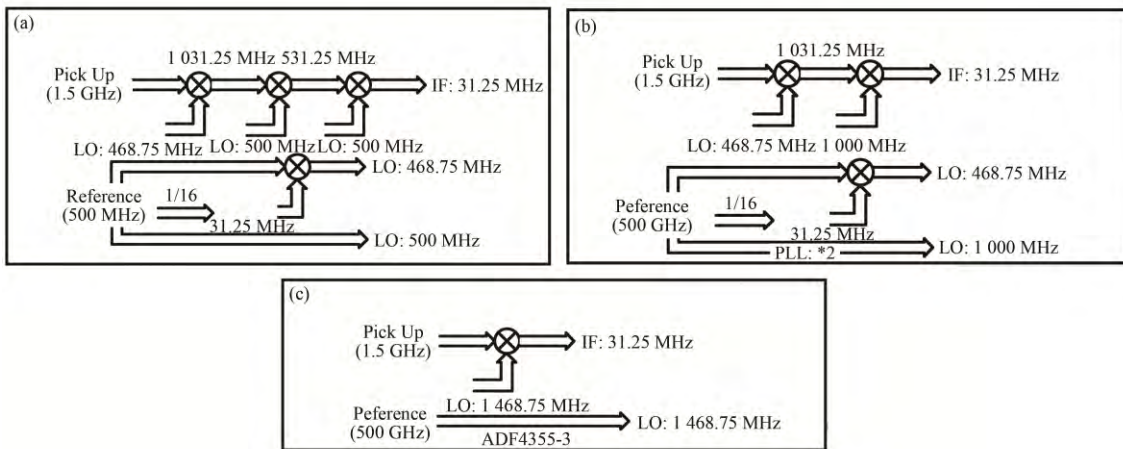


图4 三种前端结构设计方案
(a) 方案 a(RF 信号三次混频), (b) 方案 b(RF 信号两次混频), (c) 方案 c(RF 信号单次混频)

Fig.4 Three front-end structural design schemes
(a) Plan a (RF signal three times mixing), (b) Plan b (RF signal two times mixing), (c) Plan c (RF signal one time mixing)

如图4(a)所示,方案a为多级混频结构,RF信号经过三次变频得到中频信号,该结构的缺陷是每多一次混频都会劣化信号的线性,使用中通过对齐前后混频器件的线性区间的方法可以降低这一劣化影响。混频方案设计中,混频的本振信号和本振的谐波信号是需要回避的主要噪声源。在多级混频结构的情况会更加复杂,前级混频的本振和本振的谐波都是可能成为影响线性的噪声信号,在中间级的混频信号加入滤波器件,降低前级对于后级混频的干扰。

方案b如图4(b)所示,RF信号经过两次变频后得到中频信号。方案b中使用了两倍频器件。方案的复杂度与方案a相当,每一级混频后都需相应滤波和放大进行线性区间对准。倍频器件输出信号里面有较强的谐波信号,需滤波器件滤波进行处理。

如图4(c)所示,方案c为一次混频结构,方案中使用锁相环(Phase-locked Loop, PLL)芯片ADF4355-3直接生成1468.75 MHz。相比其他采用锁相环的方案,省去很多放大器件、衰减器件以及相应滤波器件,在结构上简化了很多。

通过对三种方案的测试,可以对比不同变频结构和器件对混频结果的影响,选出最优方案。

3.3 中频相位噪声测试和线性测试平台

为测试不同方案的混频线性和中频相位噪声,构建测试平台如图5所示。测试平台包含两个信号

源,一台频谱仪(E4445A)和一台信号源分析仪(E5052B)。信号源1输出固定功率(0 dBm)的500 MHz参考信号;信号源2输出1.5 GHz信号用于模拟谐波腔信号。两信号源输入到不同方案的变频结构中得到中频信号。将中频信号输入到信号源分析仪中进行相位噪声分析。中频信号输入到频谱仪中,调节信号源2的输出功率进行测试线性测试。

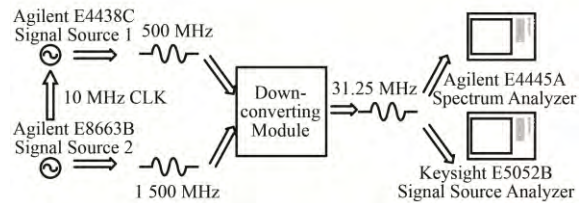


图5 中频相位噪声测试和线性测试结构
Fig.5 Block diagram of linearity measurement and IF phase noise measurement

谐波腔感应信号来自束流,两者存在三倍的关系,束流信号来自参考信号源,因此谐波腔感应信号和参考信号源(500 MHz)是同源信号。为了保证测试平台中的两个信号源的信号为同源信号,在信号源2处引出10 MHz的参考信号输入到信号源1。两个信号源通过10 MHz参考信号进行锁相。另外,当1.5 GHz RF信号小于-30 dB,中频信号会经过放大再去测量,从而较为准确获得小功率线性走势。

为辅助对于三个方案的测试以及测试表贴器件的性能,设计了两块测试板卡(图6)。

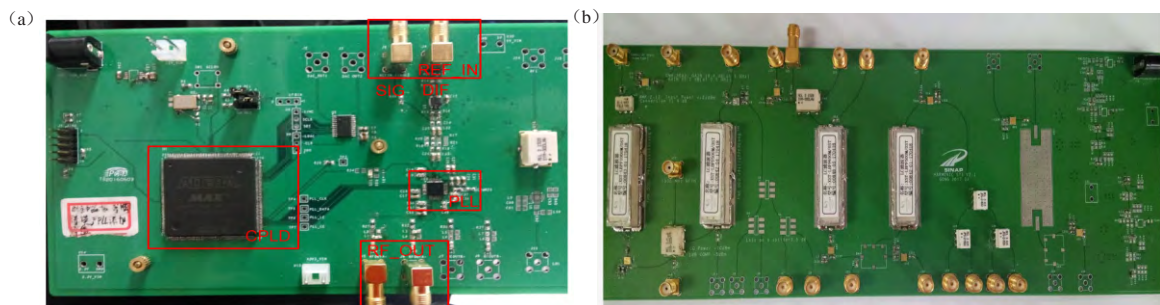


图6 Harmonic_sys V1.1 测试板(包含 ADF4355-3 锁相环)(a)和 Harmonic_sys V2.1 测试板(包含倍频器 AMK-2-13+)(b)
Fig.6 Photographs of Harmonic_sys V1.1 test board (ADF4355-3 PLL included) (a) and Harmonic_sys V2.1 test board (AMK-2-13+ frequency multiplier included) (b)

4 中频相位噪声测试和线性测试结果和分析

4.1 三种方案相位噪声测试

三种方案的相位噪声测试结果如图7所示。

方案a中频信号的抖动(jitter)均方根(Root

Mean Square, RMS)值约为4.18 ps;方案b中频信号的抖动均方根值约为4.07 ps;方案c中频信号的抖动均方根值约为14.56 ps。测试结果显示:方案c的相位噪声表现劣于方案a和方案b。使用锁相环的一次混频结构会引入很大的相位噪声。

目前分析该相位噪声来自锁相环器件(ADF4355-3)的压控振荡器(Voltage-controlled

Oscillator, VCO)。锁相环输出信号的相位噪声与输入参考信号相位噪声和输出频率有关。当VCO输出频率固定时,降频除数越大相位噪声越低^[10]。

方案要求锁相环输出信号频率为1 468.75 MHz对于器件ADF4355-3最多只能除以4,信号输出无法兼顾频率与相位噪声。

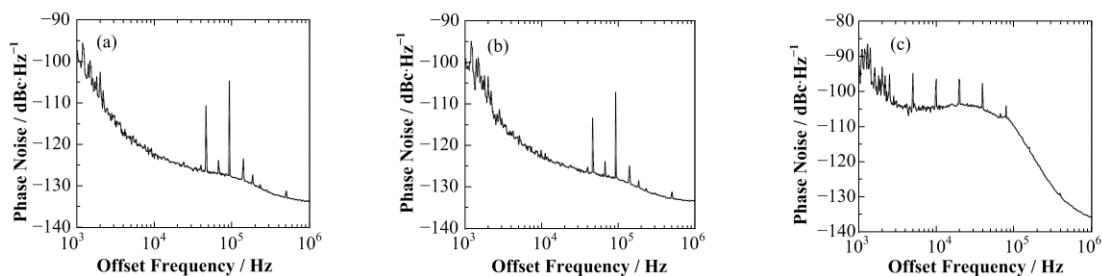


图7 三种前端结构相位噪声测试
(a) 方案a(RF信号三次混频), (b) 方案b(RF信号两次混频), (c) 方案c(RF信号单次混频)

Fig.7 Three front-end plans for IF phase noise measurement

(a) Plan a (RF signal three times mixing), (b) Plan b (RF signal two times mixing), (c) Plan c (RF signal one time mixing)

4.2 三种方案线性测试

通过图5的测试平台,得到三种变频结构的线性测试结果如图8所示。

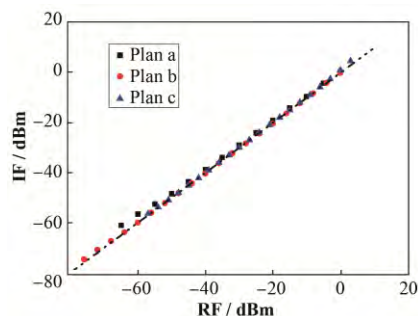


图8 三种方案的线性测试(虚线为 $y=x$ 函数线)

Fig.8 Linearity measurement for three plans (the dotted line is $y=x$ function line)

把偏移不超过 $y=x\pm 0.5$ dBm的区域当作良好线性区。方案a的线性区间约为40 dB;方案b线性区域约为70 dB;方案c线性区域约为60 dB。三种方案的线性区域均满足要求。

4.3 小结和最终方案

从三种变频结构的结果分析,可以得出以下结论:1) 两次以及三次的多级混频结构线性动态范围满足系统要求,可以应用到实际的变频设计中;2) 多级混频需相应的滤波和放大调整结构,RF信号混频次数增加会增加系统复杂度,也会对变频线性有负面影响,因此不使用两次以上的混频结构;3) 倍频器对于混频的中频信号的相位噪声和线性没有负面影响,可以应用到设计中;4) 锁相环器件的方案相位噪声表现相对于其他方案较差,应用到实际设计中需要降低锁相环输出频率,但会增加方案复杂

度,相对其他方案无明显优势。

根据以上测试,最终的设计方案基于采用倍频器的方案b,混频结构根据实际应用需求进行调整为一次混频或者两次混频。

5 结语

本文介绍了针对上海光源三次谐波腔高频系统需求,所设计三种1.5 GHz变频方案,分析了影响混频线性的因素。通过对三种方案的测试,对比分析了多级混频结构与单次混频结构的优缺点,实验评估锁相环器件和倍频器器件应用到混频方案的可行性。

一种基于倍频器的方案将会应用到谐波腔前端变频模块中。该方案对中频信号的相位噪声参数影响较小,同时具有良好线性响应,方案的线性区域约为70 dB,满足前端变频模块需求。

参考文献

- 1 Byrd J M, Georgsson M. Lifetime increase using passive harmonic cavities in synchrotron light sources[J]. Review of Modern Physics, 2000, 4(4): 222-224. DOI: 10.1103/PhysRevSTAB.4.030701.
- 2 阎映炳,冷用斌,赖龙伟,等.用束流位置监测器测量上海光源束流寿命[J].强激光与粒子束,2012,24(1): 189-192. DOI: 10.3788/HPLPB20122401.0189. YAN Yingbing, LENG Yongbin, LAI Longwei, et al. Beam lifetime measurement using beam position monitor in SSRF[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(1): 189-192. DOI: 10.3788/HPLPB20122401.0189.
- 3 Byrd J M, Santis S D, Georgsson M, et al. Commissioning of a higher harmonic RF system for the

- advanced light source[J]. Nuclear Instruments and Methods Physics Research A, 2000, **455**(2): 271 – 282. DOI: 10.1016/S0168-9002(00)00504-0.
- 4 Phimsen T, Jiang B C, Hou H T, *et al.* Improving Touschek lifetime and synchrotron frequency spread by passive harmonic cavity in the storage ring of SSRF[J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(8): 108. DOI: 10.1007/s41365-017-0259-y.
- 5 Penco G, Craievich P, Fabris A, *et al.* First year of operation of SUPER-3HC at ELETTRA[C]. Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland, 2004.
- 6 Phimsen T, Jiang B, Hou H, *et al.* Tracking code simulation for passive harmonic cavity in the SSRF storage ring[J]. Radiation Detection Technology and Methods, 2018, **2**(1): 8. DOI: 10.1007 / s41605-018-0035-5.
- 7 于海波, 刘建飞, 侯洪涛, 等. 三次谐波超导腔高次模抑制研究[J]. 核技术, 2012, **35**(1): 1–4.
- YU Haibo, LIU Jianfei, HOU Hongtao, *et al.* Higher order mode damping of a higher harmonic superconducting cavity for SSRF[J]. Nuclear Techniques, 2012, **35**(1): 1–4.
- 8 波扎. 微波工程[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- Pozar D M. Microwave engineering[M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015.
- 9 樊浩. 储存环中高次谐波腔的有关计算研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2354723.
- FAN Hao. Calculation and research of the higher harmonic cavity in storage ring[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. DOI: 10.7666/d.Y2354723.
- 10 Analog Device . ADF4355-3 data sheet[DB/OL]. 2015. <http://www.analog.com / ADF4355-3? doc=ADF4355-3.pdf>.