

I/Q 技术用于加速器鉴相的实验研究*

张建兵^{1; 1)} 王芳¹ 王光伟²

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

摘要 I/Q 解调技术在加速器领域的应用颇为常见, 本文基于对模拟 I/Q 鉴相器的理论分析提出一套完整的误差校正方法, 可以有效地克服各种误差对 I/Q 鉴相器性能的影响, 并在此基础上完成了相关的实验工作.

关键词 I/Q 鉴相器 矢量鉴相 误差校正

1 引言

在加速器领域, I/Q 技术的应用颇为广泛, 国外如 SLAC 的 PEP-II, SPEAR3, DESY 的 TESLA, 欧洲 CERN 的某些加速器, 以及一些新建的装置如加拿大的 CLS, 美国的散射中子源 SNS 等, 在射频系统的反馈控制中均采用了 I/Q 技术. 和传统的模拟反馈环路相比, 采用 I/Q 技术可以使得系统大为简化, 可以满足较高的指标要求, 在重负载情形下有较大的优势. 和国外相比, 国内在加速器方面的应用还处于起步阶段^[1, 2], 本文利用自己设计制作的 I/Q 鉴相器做了相应的实验工作, 从结果来看, 对于国内的研究有一定的借鉴意义.

2 I/Q 鉴相原理及误差校正方法

I/Q 鉴相的方法有两种, 一种是直接采用模拟 RF 器件, 如图 1 所示, 另一种是利用高速数模转换器件将其数字化. 模拟型 I/Q 鉴相器包含大量的误差, 来源主要包括功率分配平衡, 积分相位平衡, 直流偏置, 阻抗匹配, 以及传输损耗等, 详见王芳等人的理论分析文章^[3]. 利用数字化的方法, 可以很好地

克服模拟器件所带来的误差.

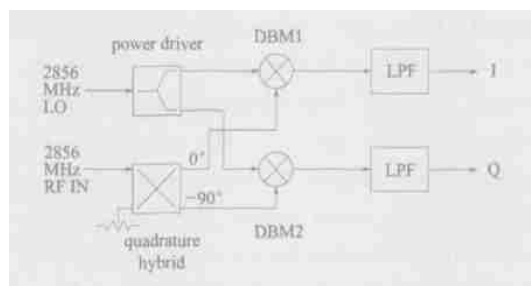


图 1 I/Q 鉴相器原理图

本文提出的误差校正方法主要包括 3 个步骤, 首先是直流偏置校正, 校正方法是: 用移相器在 RF 信号支路移相 360° , 得到 $I-Q$ 封闭曲线(理论上为圆, 实际为椭圆), 可以得到曲线的中心为:

$$\frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}, \frac{Q_{\max} + Q_{\min}}{2}, \quad (1)$$

在测得的 I, Q 值中分别减去曲线中心点的坐标值, 即可得到消除直流偏置以后的值. RF 输入为 0dBm, 参考信号为 10dBm 时, 直流偏置值约为几个毫伏, 如果 RF 输入变化很大, 可以相应调整参数. 实际在处理数据过程中直流偏置值的设定应该使得相位的标准偏差最小, 这么做除了可以克服曲线中心读取误差外, 还可以避免移相器在 360° 范围内衰减不一

2004-07-09 收稿

* 中国科学院知识创新工程重大项目资助

1) E-mail: zhangjb@sinap.ac.cn

样所带来幅度上的误差。

其次是角度以及幅度校正, 如果经过直流偏置校正后, I, Q 满足公式 $I(\phi) = V_i \cos(\phi), Q(\phi) = V_q \sin(\phi + \Delta\phi)$ 那么就可以考虑采用公式校正的方法, 公式如下:

$$\begin{bmatrix} I_c \\ Q_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{V_i}{V_q} Q_\phi(\phi) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I \\ Q \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 $Q_\phi(\phi) = \frac{Q(\phi) - \frac{V_q}{V_i} \sin(\Delta\phi) I(\phi)}{\cos(\Delta\phi)}$. 可以参考

C. Ziomek 文章中^[4]提到的校正方法与校正公式。

最后, 由于器件的原因, 经过上面的校正后仍然有相当大的误差, 在 RF 输入为 0dBm 时标准偏差约 2° 左右, 最大误差达到 $\pm 4^\circ$. 因为这里的误差不是随机的, 所以可以考虑采用曲线拟合的方法. 实验采取的是多项式拟合法, 拟合公式如下:

$$y = a + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 + b_5x^5 + b_6x^6 + b_7x^7 + b_8x^8 + b_9x^9, \quad (3)$$

经过拟合后 RF 输入为 0dBm 时的标准偏差可以降低至 0.07° 左右。

在得到 I, Q 校正值后, 利用下面的公式即可得出 RF 输入与参考信号之间的相位夹角:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{V_q}{V_i} \right). \quad (4)$$

3 实验设备及软件编写

实验装置如图 2 所示, 信号源为 Agilent 公司的 E4437B, 经过分功器后输出两路信号, 其中 RF 信号支路接移相器和可调衰减器, 另一路为参考信号, 经过 I/Q 鉴相器后输出直流电平, 分别为 I 及 Q . 实验利用一台数字示波器(型号为 Agilent 54845A) 完成数据采集功能, 再通过 GPIB 接口与计算机相连。

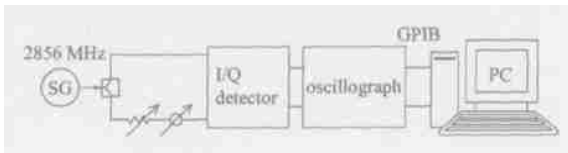


图 2 I/Q 鉴相连接示意图

软件用 HP VEE 编写, 程序界面如图 3 所示, 左上角为采样间隔与采样数目, 采样间隔实际上是计算机与示波器通信的速度, 由 GPIB 接口所决定, 通信指令可参考 Agilent 公司的编程手册^[5]. 下面的 $I,$

Q 平均值是采样值经过累加后取平均所得到的值. 左下角为校正参数. 右边为校正以后的结果, 经过计算可以得到 RF 输入信号的幅值及相对相角. 从 $I-Q$ 曲线可以看出, 经过校正后, I, Q 值基本上可以构成一个圆。

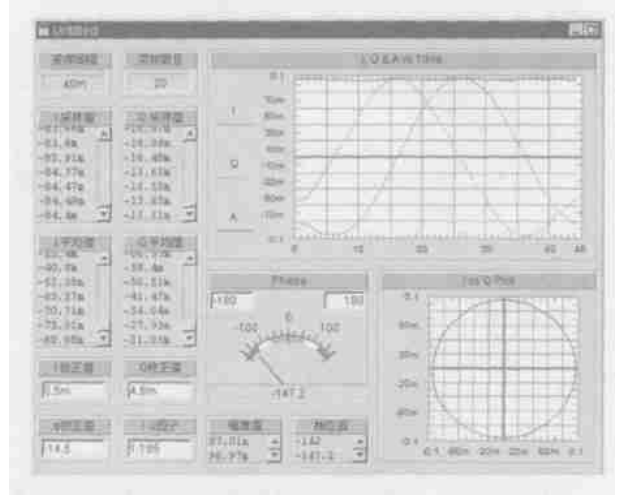


图 3 程序界面 (I), 参数校正及相位测量

对程序稍加修改, 并利用校正后的参数, 可用于脉内相移的测量, 程序界面如图 4 所示. 从示波器读取波形数据后利用公式(4) 计算后即可得到相位数值. 脉冲调制信号由信号源产生, 脉冲包络宽度为 8μs, RF 功率为 0dBm. 从图中可见脉冲内部的相移量是很小的, 测量结果在 $\pm 0.5^\circ$ 以内。

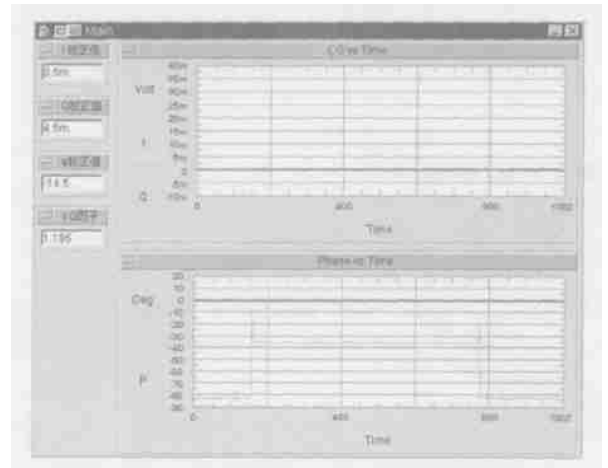


图 4 程序界面 (II), 可用于测量脉内相移

4 实验结果及分析

当 RF 输入功率为 0dBm 时, 改变输入相位 360° 时的相位误差曲线如图 5 所示, 其中标准偏差为

1. 95° 的曲线为公式修正之后的结果, 最大误差约为 $\pm 4^\circ$. 采用曲线拟合的方法可以减小误差, 程序采用多项式来作拟合, 多项式次数为 9, 可分为两段分别拟合. 结果可将标准偏差降到 0.07° .

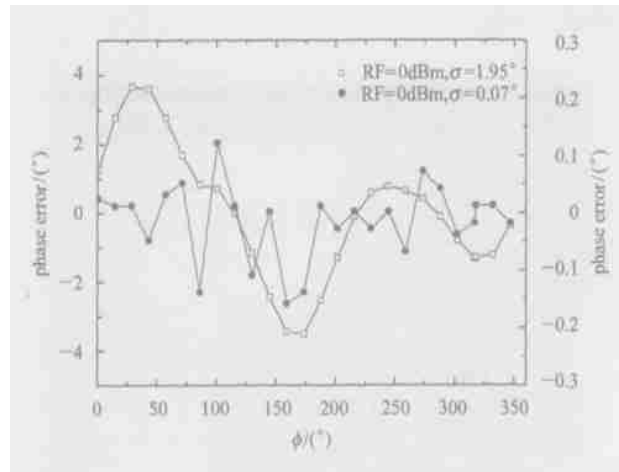


图 5 I/Q 鉴相器鉴相误差(I)

利用 RF 输入为 0dBm 时的校正参数以及拟合公式, 改变输入功率, 可以得到图 6 所示的曲线. 从图中可见相位误差随着输入功率的改变而增大, 可以算出, RF 功率为 2dBm 和 -4dBm 时的标准偏差分别为 0.85° 和 0.82° . 不过如果在这些功率点上采用相同的校正和拟合方法, 误差降到更低. M. Satoh 论文^[6]中 RF 输入在 -7dBm 到 3dBm 范围内相位误差在 $\pm 1^\circ$ 以内, 如果采用曲线拟合的方式, 应该可以使得误差更小, 动态范围更大.

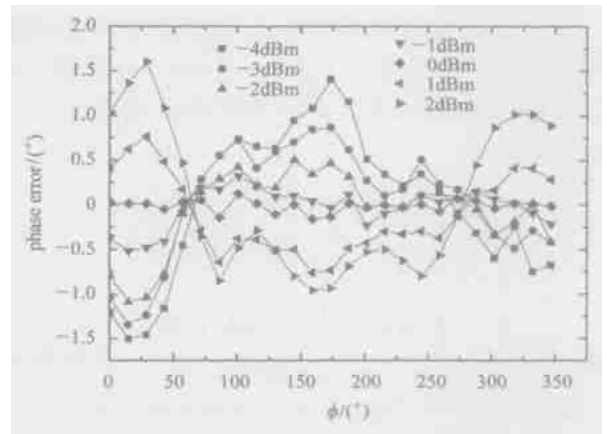


图 6 I/Q 鉴相器鉴相误差(II)

5 结论

本文在理论分析的基础上提出一套完整的误差校正方法, 并用曲线拟合的方法将相位误差降到一个很低的水平, 可作为继续工作的基础. 进一步的工作是构建一套高稳定度的相位测量和反馈系统, 这将是今后要研究的课题.

作者感谢中国科学院上海应用物理研究所原加速器一室的全体同事在项目进行中的大力支持与帮助, 感谢高频组在读博士赵玉彬在软件编写方面的有益讨论, 感谢在读博士俞路阳提供的测量仪器.

参考文献 (References)

- 1 WANG Fang et al. HEP & NP, 2004, **28**(1): 88—91
- 2 WANG Fang et al. Nucl. Sci. Tech., 2004, **15**(1): 1—3
- 3 WANG Fang et al. Theoretic Analysis of the Research for I/Q Technique Applied in Accelerator Phase Detecting. Inner Report. 2004 (in Chinese)

- (王芳等. I/Q 技术用于加速器鉴相的理论分析, 内部报告. 2004)
- 4 Ziomek C. Low level RF Signal Processing Software. Stanford Linear Accelerator Center, NLCTA Note 56. 1996, 2—6
- 5 Programmer's Quick Reference Guide (Publication Number 54810 97065). Agilent Technologies Inc., 2001
- 6 Masanori Satoh. Study of Initial Beam-Loading Compensation for Electron Linacs. Ph.D. Thesis of The University of Tokyo, 2001

Experiment Research for I/Q Technology Applied in Accelerator Phase Detecting*

ZHANG Jiarr Bing^{k 1)} WANG Fang¹ WANG Guang-Wei²

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

2 (Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract I/Q demodulation is a common and useful technique used in accelerators. This paper presents a series of methods to correct phase errors based on the theories of the analog I/Q demodulator, which can correct various errors effectively. And based on this, we have done the relative experiments.

Key words I/Q demodulator, vector phase detection, error correction

Received 9 July 2004

* Supported by Knowledge Innovation Program of CAS

1) E-mail: zhangjb@sinap.ac.cn