

## 微波 S 波段相控阵天线相位的高精度测量研究

王焕菊, 刘甫坤

(中科院等离子体物理研究所十室, 合肥 230031)

**摘要:**为进一步研究受控核聚变, EAST 托卡马克将采用 3.7GHz 低杂电流驱动系统。本文根据 3.7GHz 低杂波相位控制系统的鉴相要求, 采用先下变频, 再用数字正交鉴相的设计方案, 实现了相位的高精度测量。

**关键词:**低杂电流驱动; 相位测量; 正交鉴相

**中图分类号:** TM933 **文献标识码:** A

**文章编号:** 0258-0934(2008)03-0641-03

根据波加热和电流驱动理论<sup>[1]</sup>, 由多只大功率速调管阵列构成的波谱可控的低杂波系统已经成为实现核聚变的一个重要研究方向。低杂波系统的相控阵天线是与托卡马克连接的重要部件, 通过对天线端口相位差的控制, 天线发射的微波能量可以沉积到托卡马克等离子体要求的位置。沉积到等离子体中的低杂波接近于静电波, 通过朗道阻尼使电子获得定向动量, 从而有效地驱动电流。很多 Tokamak 装置 LH-CD 实验都发现如下的实验现象: 在强磁场、中低密度的情形下, 驱动电流的效率比 Fisch 理论值大 1~2 个数量级; 对于高密度的情形, 电流趋于零的速率比 Fisch 预言的要快得多; 当密度超过某个临界值时, 驱动电流立即变为零, 这就是所谓的密度极限。在 Versator 上进行低杂波电流驱动密度极限的频率定标实验<sup>[2]</sup>, 发现截至密度的经验定标律: 截至密度正比于 LHW 频率的平方。目前 EAST Tokamak 上的 LHW 频率为 2.45GHz, 该密度对于中等等离子体密度是可行的; 而对于较高的等离子体

密度则应采用 3.7GHz 或 4.6GHz。为了实现 EAST 的高参数运行, LHW 频率的提高是必然趋势, 而目前 2.45GHz 低杂波系统的鉴相关键部件 AD8302 的鉴相频率最高为 2.7GHz, 不能满足以后应用的需要。本文所解决的关键问题是: 实现 3.7GHz LHCD 系统的鉴相。

## 1 方案设计背景

根据微波测量原理<sup>[3]</sup>可知, 电磁波通过微波器件时, 幅度(也即功率)和相位都会发生变化。而功率衰减和相移分别是散射参数 S21 的幅度和相角, 这是密不可分的两个部分, 是一个事物的两个方面, 二者在测量理论和方法上必然有很多共同点和相互借鉴之处。国外一些托卡马克上多采用 I/Q(正交)鉴相, 该方法就继承了上述思想, 可同时实现功率(衰减或增益)鉴别和相位鉴别。如 MIT 的 Alcator C-Mod 4.6GHz 的 LHCD 系统采用 I/Q(正交)鉴相, 可实现 360 度线性鉴相。据资料<sup>[4]</sup>显示, 其鉴相误差可控制在 5 度以内。其测试曲线如图 1。

目前 EAST 上 2.45GHz LHCD 系统的鉴相关键器件 AD8302 同样采用 I/Q 鉴相。根据测试数据<sup>[5]</sup>显示, 该鉴相器的最大误差在 10 度以上。这意味着在 2.45GHz 仅依靠 AD8302

**收稿日期:** 2008-01-12

**作者简介:** 王焕菊(1982-), 女, 现为等离子体所微波室低杂波课题组的研究生, 主要研究方向为: 微波相位控制和微波测量技术。

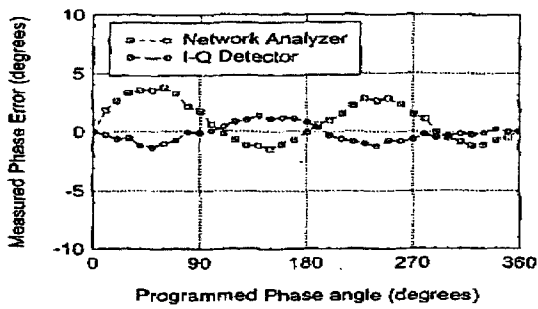


图1 鉴相误差测试曲线

鉴别相位已经不能满足相位控制系统的要求。针对出现最大误差的位置特点,经过复杂的软件算法加以修正后,基本可以满足系统相位测量精度的要求。当LHW频率高至3.7GHz时,现行方案则行不通。

## 2 鉴相方案研究

相位测量不是对单一信号的直接测量,它测量的是两个同频率相关信号之间的相位差。取其中一信号作为参考信号,另一信号即为相位待测的被测信号。相位测量是在相控阵天线及加速器等技术出现之后,才备受关注的。射频段的相位测量技术并不十分成熟。目前所采用的正交鉴相方法,相对于以前的相位/电压转换式鉴相器、相位/计数转换式鉴相器有诸多优点:电路简单、精度提高、可同时测量相位和功率等。其可同时测量相位和功率的优点为EAST LHCD组功率控制系统的实现展开了新的思路。正交鉴相原理如图2。

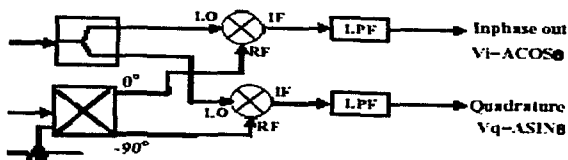


图2 正交鉴相原理图

其中,幅度  $v = \sqrt{v_i^2 + v_q^2}$ , 相位  $\phi = \arctg(v_q/v_i)$ 。传统的鉴相器为了保证相位测量的准确,对微波信号源的频率稳定性要求非常高。而这种正交鉴相方法是基于乘法器型混频器的,混频器的本振LO和射频信号RF来自鉴相器的两个输入信号(取自同一个信号源),混频后的中频信号IF经低通滤波器取差频,则微波信号源即使有频率的漂移,取差频后也可以消除。故这种方法的优点是可以实现扫频的测量,提高测量精度。

美国模拟器件公司的AD8302是基于模拟正交原理的,它能同时测量从低频到2.7GHz频率范围内的两输入信号之间的幅度比和相位差。其不同频率的鉴相特性曲线和鉴相误差特性曲线<sup>[6]</sup>如图3、图4。

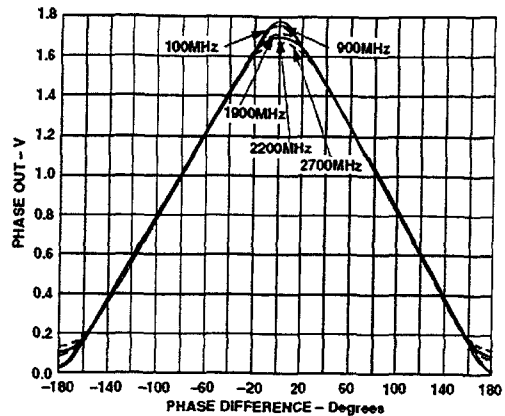


图3 不同频率的鉴相特性曲线

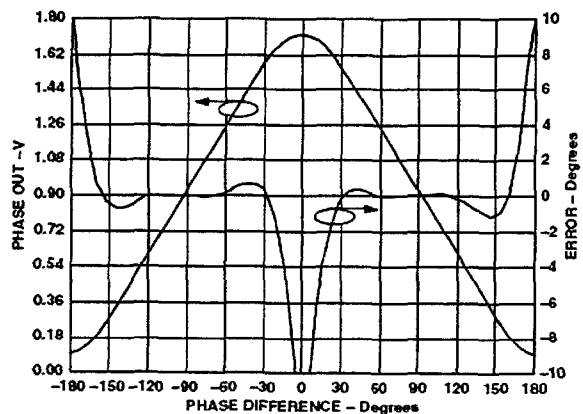


图4 鉴相误差特性曲线

由鉴相误差特性曲线可知,鉴相误差主要集中在0度和180度左右。由不同频率的鉴相特性曲线可知,随频率的升高鉴相误差增大。这是由于模拟正交鉴相是采用模拟电路来实现的,由于模拟乘法器和低通滤波器本身存在不一致性,再加上模拟电路的热稳定性比较差,使得I、Q两路输出的相位上存在误差,从而使得其测量精度受限。

随着高速器件的发展,可以直接对10MHz的中频信号进行A/D转换,经过数字电路形成I/Q信号,这样得到的I/Q信号一致性大大优于模拟I/Q信号,从而可提高鉴相精度。故本文采用先把3.7GHz微波信号下变频到10MHz的中频信号,再用数字I/Q鉴相实现相

位测量。

### 3 鉴相方案实现

为了保证相位测量的准确性,除要求微波信号源频率稳定外,更要求变频后的中频测量频率保持不变。为了使变频后的信号与原来的微波信号保持确定的相位关系,采用锁相变频技术<sup>[7]</sup>。锁相变频的优点在于:变频后可保持原来的相位关系不变,实现扫频测量。当信号频率改变时,锁相环路的输出信号频率可以自动跟踪其相位变化,这样就可以实现扫频测量,并可以提高测量精度。锁相变频方案的框图如图 5 所示。

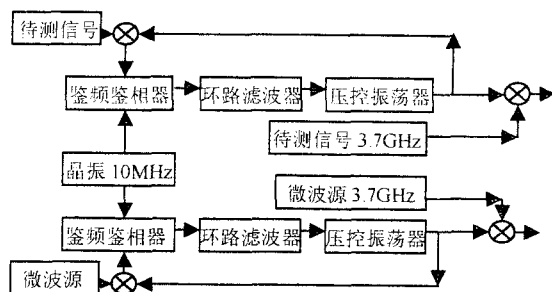


图 5 锁相变频方案框图

如图 5 所示,经过速调管的待测信号锁相变频后的信号频率为 3.69GHz。该信号与 3.7GHz 的微波信号混频,然后经带通滤波器取出差频信号,再经过中频放大单元、自动增益控制电路<sup>[8]</sup>后得到 10MHz 稳定的待测信号。从振荡源引出的参考信号锁相变频后的信号频率同样为 3.69GHz,再与 3.7GHz 的微波信号源混频,经滤波、中放、自动增益控制电路后得到 10MHz 稳定的参考信号。10MHz 的待测信号与参考信号分别经过 A/D 变换为数字信号,进行数字 I/Q 鉴相。数字 I/Q 鉴相方案框图如图 6 所示。

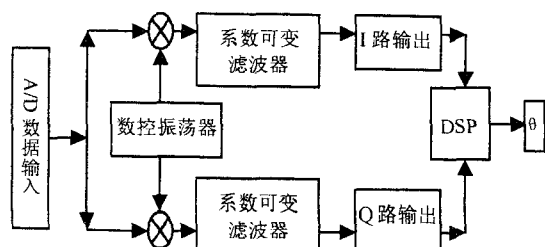


图 6 数字 I/Q 鉴相方案框图

如图 6 所示,经 ADC 采集之后的二进制数分成两路,分别与数控振荡器 NCO 产生的两

路正交信号混频,混频之后的数据经过可变系数滤波器取出基带信号,最后经过 DSP 算法处理,可得到待测信号相对于参考信号的相位差  $\theta$ 。其中,ADC 选用高分辨率、宽动态范围、采用率高达 105MSPS 的 AD6645,输出为 14 位二进制补码数据,采样时钟为 40MHz;数字信号正交处理在 xilinx 公司的 FPGA 上实现,软件平台采用 ISE\_8.2.03,NCO 由 IP core 产生,系数可变滤波器的设计用 matlab 的 fir2 函数实现<sup>[9]</sup>;最后 I/Q 两路输出数据经 DSP 算法处理,即得到相位差。当初始相位设置为一致时,实测结果显示为 -0.05 度左右,该误差在系统要求范围内。

### 4 结束语

本文的基本思路是基于 MIT 的 ALCATOR C 的鉴相模式,结合目前 EAST 的发展状况而制定的先下变频再用数字正交实现鉴相方案。由于射频段的鉴相技术不成熟,鉴相精度不够高;低频段的鉴相技术虽然很成熟,但速度不够高,均不能满足系统的需求。兼顾速度和精度,采用了变频鉴相折衷方案。方案采用了频率合成与锁相技术、混频技术、中频滤波与放大技术、自动增益控制电路以及 FPGA 数字正交鉴相等。该方案可以灵活地改变频率,能做到高动态范围、低噪声系数、高灵敏度,可满足系统的要求,实现相控阵天线相位的高精度测量。

#### 参考文献:

- [1] Nathaniel J. Fisch, Theory of current drive in plasma[J], Reviews of Modern Physics, 1987, 59 (1).
- [2] M. J. Mayberry, et al. Phys. Rev. Lett., 55 (1985) 829
- [3] 汤世贤. 微波测量(修订版)[M]. 北京:国防工业出版社. 1981:241
- [4] D. Terry, et al. The Alcator C-Mod lower hybrid current drive experiment low power microwave and active control system[J], Proceedings-Symposium on fusion Engineering, 2002:23-26.
- [5] 徐辉, EAST 低杂波相位反馈控制系统研究[D], 中国科学院等离子体物理研究所硕士论文, 2007: 53.

(下转第 510 页, Continued on page 510)

目前超级神冈的 DAQ 系统也将进行一次大规模的升级,其前端电子学的处理能力将极大增强,将不会存在类似的限制。可以预期,在新的 DAQ 系统上,强制触发的研究将可以得到更为理想的结果,将更容易开展超新星遗迹中微子的相关研究。

致谢:本文感谢东京大学宇宙线研究所对实验工作的大力支持。另外,本文部分研究内容也是参与者邓智和陈少敏承担的国家自然科学基金委项目之一(项目编号为 10575056)。

#### 参考文献:

- [1] The Super-Kamiokande Collaboration, Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos. *Phys. Rev. Lett.* 81:1562,1998.
- [2] The Super-Kamiokande Collaboration. The Super-Kamiokande detector. *NIM A501*(2003)418.
- [3] S. Chen & Z. Deng. A proposal for detecting Supernova relic neutrino in Super-Kamiokande, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 166 (2007) 252.

## The design of forced trigger module for Super Kamiokande experiment

XUE Tao, GONG Guang-hua, DENG Zhi, CHEN Shao-min, SHAO Bei-bei

(Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing, 100084, China)

**Abstract:** A forced trigger method is proposed to record emitted 2.2MeV  $\gamma$  candidates from neutron capture in pure water for Super kamiokande neutrino experiment. The design of the forced trigger module is described in this article; the result is also presented and discussed.

**Key words:** forced trigger; neutrino detection; inverse beta decay

(上接第 643 页,Continued from page 643)

- [6] www.analog.com Analog Devices, Inc. AD8302 datasheet.
- [7] 赵春晖,杨莘元. 微波测量与实验教程[M],哈尔滨:哈尔滨工业出版社,2000,10:33.
- [8] 罗德(Rohde. U. L)(美)尼科(Newkirk. D. P)著,张

玉兴等译. 无线应用射频微波电路设计/(美)[M]. 北京:电子工业出版社,2004,8:350-356.

- [9] 薛年喜主编. MATLAB 在数字信号处理中的应用[M]. 北京:清华大学出版社 2003:218-233.

## The high-precision phase measurement research of microwave s-band phased array antenna

WANG Huan-ju, LIU Pu-kun

(Institute of plasma physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031, China)

**Abstract:** A 3.7GHz Lower Hybrid Current Drive (LHCD) system will be implemented on EAST Tokamak for further research on controlled nuclear fusion. This paper presents the design of phase detection according to the requirement of 3.7GHz Lower Hybrid Current Drive phase control system. First frequency is down converted, then it uses digital I/Q phase discrimination to realize high-precision phase measurement.

**Key words:** LHCD; phase measurement; I/Q phase discrimination