

基于相关测量 MUSER 馈源轴比的方法研究

苏 仓^{1,2,3}, 王 威^{1,3}, 颜毅华^{1,3}

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100012; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100012)

摘 要: 明安图射电频谱日像仪是新一代太阳专用射电成像望远镜, 超宽带双圆极化接收馈源是其关键技术之一. 轴比是反映双圆极化馈源性能的重要指标, 单天线测量轴比的传统方法需要标准天线辅助, 本文采用基于相关测量干涉阵馈源轴比的方法, 针对 MUSER 天线数目多, 且为户外环境, 根据天文观测的需求须经常测试天线的性能的特点, 简化了干涉阵望远镜测量轴比的过程, 且能够高效的得到准确的测量结果. 文中对该方法的测量过程做了详细的说明, 给出了部分天线的测试结果, 结果同时反映了馈源的良好特性.

关键词: 综合孔径; 明安图射电频谱日像仪; 圆极化; 轴比

中图分类号: P164 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2016)10-2556-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2016.10.039

Research of Measuring Axis Ratio of MUSER's Feed Based on Correlation

SU Cang^{1,2,3}, WANG Wei^{1,3}, YAN Yi-hua^{1,3}

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Key Laboratory of Solar Activity, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: The MUSER (Mingantu SpEctral Radioheliograph) is a new generation of solar dedicated radio telescope. Its ultra-wide band dual-circular polarized feed is one of the key technologies. AR (Axis Ratio) is an important parameter for measuring feed efficiency. The traditional AR measurement needs the involvement of the standard antenna. In this paper, the method by measuring correlation is adopted to measure AR of feeds for MUSER. Since MUSER has numbers of antennas and located in harsh environments, according to the demand of astronomical observations, the performance of the antennas should be measured frequently. This method simplifies the process of AR measurement of the interferometric array and can obtain accurate results efficiently. The measuring process are presented in detail in this paper. In addition, the results of AR measurement show the favourable characteristics of the feeds for MUSER.

Key words: synthetic aperture; Mingantu spectral radioheliograph; circular polarization; axis ratio

1 引言

极化是天线的一项重要性能, 所谓波的极化是指在垂直于波的传播方向的平面内电场矢量变化一周端点所描绘的轨迹, 如图 1(a) 所示. 如果这个轨迹是圆, 则称为圆极化; 如果是直线, 则称为线极化; 如果是椭圆, 则是椭圆极化, 如图 1(b, c, d) 所示. 椭圆极化按照电场矢量旋转方向不同, 可以分为左旋圆极化和右旋圆极化. 轴比是衡量天线圆极化性能的一个重要参数,

可以定义为极化椭圆长轴与短轴之比, 用 AR (Axis Ratio) 表示. AR 的取值范围为 $1 \leq AR \leq \infty$, 当 $AR = 1$ 时为圆极化, 当 $AR = \infty$ 时为线极化. 通常理想的圆极化天线工程中比较难以实现, 一般都表现为椭圆极化^[1].

太阳射电观测科学目标要求天线具有双圆极化接收能力, 虽然干涉阵天线增加了天线的数目, 但是也只能改善图像的信噪比和动态范围, 不能改善天线的

极化性能, 为保证正确测量快变信号的极化特性, 所以要求单天线具有很高的极化性能. 在圆极化天线

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2015-11-16; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家重大科研装备研制项目 (No. ZDYZ2009-3); 国家自然科学基金 (No. 11221063, No. Y011141001); 天文联合基金重点项目 (No. U1231205); 青年基金 (No. 11203042)

测试中需要测试天线的轴比,以验证天线的极化性能.单天线轴比测试方法(极化图法、分量法、圆分量法、综合法等)都需要标准天线辅助测试^[2-6],如图 2 所示.

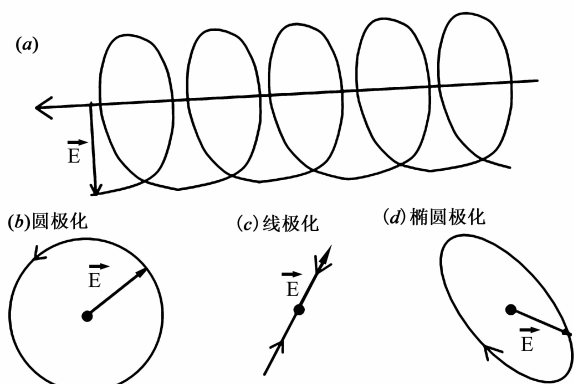


图1 电磁波极化示意图^[1]

对于单天线轴比测量,除了满足天线测量的一些共同要求外,还要求极化参数必须在一定坐标系中定义并且要求在无反射条件下进行,另外除三天线绝对法外,所有极化测量方法都要求事先提供一副或者多副已知极化参数的辅助天线来作为基准,因此选择基准天线及对基准天线的极化参数进行校准是测量的必备条件之一.此外在测试设备方面要求转台要有三个自由度,即除方位、俯仰可以自由旋转且有精确刻度外,还要求天线能绕本身的机械轴旋转,且附有精确刻度^[7]. MUSER 天线阵位于内蒙古大草原上,其为野外环境,并且天线数目众多,根据天文观测的需求须经常测试天线的性能,希望能够快速准确的得到天线的相关参数.但是标准宽带天线很难实现,而且干涉阵天线众多实施困难、周期长.对于干涉阵天线,Perley (2009) 给出了轴比与相关量的关系^[8],但是需要转动其中一个天线的馈源 90° . 对于 EVLA 这样的通用型干涉阵望远镜主要观测其他天体源,这些天体源极化特性不应显著变化,对时间分辨率要求低,可以通过逐次测量平行相关(RR、LL)和交叉相关(RL、LR)四个相关量,计算得到 Stokes 参数(I、Q、U、V).但是 MUSER 主要测量快变太阳活动信号,对时间分辨率要求高,实际观测中只有平行相关量(RR、LL),所以为了正确得到信号的极化特性 MUSER 必须具有很好的轴比性能.本文根据 MUSER 采用了基于相关测量干涉阵天线轴比的方法,即由干涉阵的相关输出直接计算得到天线的轴比,并可见其满足系统要求.

2 MUSER 介绍

明安图射电频谱日像仪(Mingantu SpEctral Radioheliograph, MUSER)是一台在厘米-分米波段同时以高时间、高空间、高频率分辨率对太阳进行成像观测的专

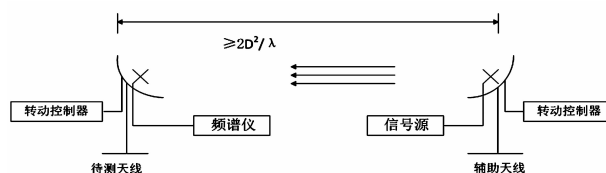


图2 天线轴比测试方法示意图

用射电望远镜^[9].

MUSER 根据综合孔径的原理,由低频阵(MUSER-I,40面4.5米天线)和低频阵(MUSER-II,60面2米天线)两部分组成,本文主要针对低频阵进行测试分析.如图 3 所示,高低频天线分别接收频率为 $400\text{MHz} \sim 2\text{GHz}$ 和 $2\text{GHz} \sim 15\text{GHz}$ 的太阳射电信号,然后通过等长的光纤传送到室内模拟接收机部分和通过数字接收机的数字化处理到达复相关器件,对所有通道进行复相关计算得到复可见度函数,最后经过成像处理得到太阳图像^[10].

由于 MUSER 需要接受超宽带双圆极化的太阳射电信号,所以天线采用末端加 3dB 电桥形成接收双圆极化信号的 Eleven 形式的馈源.在工程上通常双圆极化馈源可以由性能良好的双线极化通过圆极化合成网络合成^[11].

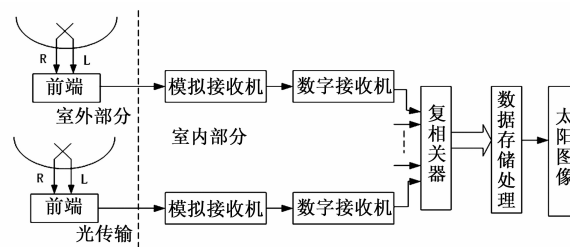


图3 MUSER系统框图^[12]

如图 4 所示的双圆极化合成网络结构,假设在网络的 A、B 两个端口分别输入正交且幅度相等的两路线极化信号 $A(\vec{E}_A = E_0 \vec{e}_x)$ 和 $B(\vec{E}_B = E_0 \vec{e}_y)$. 根据圆极化合成的基本原理,在圆极化合成网络中分别在两个通道中实现 90° 移相再分别相加,得到所需的双圆极化信号如下所示:

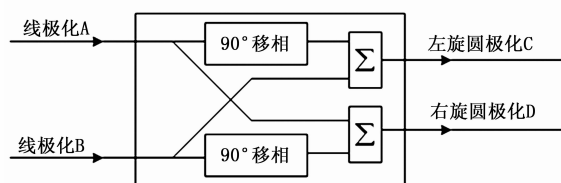


图4 圆极化合成网络示意图

$$\vec{V}_r = \vec{E}_A + \vec{E}_B e^{-j90^\circ} = E_0 (\vec{e}_x - j \vec{e}_y) \quad (1)$$

$$\vec{V}_l = \vec{E}_B + \vec{E}_A e^{-j90^\circ} = E_0 (\vec{e}_y - j \vec{e}_x) \quad (2)$$

但是在实际工程应用中无法做到两个线极化信号

的绝对正交,所以合成的圆极化信号也非绝对的圆极化信号而是椭圆极化信号,从而造成馈源的轴比不为1,所以接收到的左旋圆极化信号中有右旋圆极化信号的影响(或者在右旋圆极化信号中有左旋圆极化信号的影响).这种影响在成图观测中会使非极化的源出现极化特性、改变源的结构,从而造成图像灵敏度和动态范围的下降.

3 测量原理

极化椭圆参数位置角 ψ 和轴比 AR (Axis Ratio) 是表征极化特性的常用表示方式如图 5(a) 所示^[13].

对于任意的平面电磁波可以表示为正交的两个线极化分量,如下述式子所示:

$$\begin{aligned} E_x(t) &= \varepsilon_x(t) e^{j[2\pi\theta t + \delta_x(t)]} \\ E_y(t) &= \varepsilon_y(t) e^{j[2\pi\theta t + \delta_y(t)]} \end{aligned} \quad (3)$$

因此根据图 5(a) 所示,在 x' 和 y' 方向得到的电压分量为:

$$E_{x'}(t) = [\varepsilon_x(t) e^{j\delta_x(t)} \cos\psi + \varepsilon_y(t) e^{j\delta_y(t)} \sin\psi] e^{j2\pi\theta t} \quad (4)$$

$$E_{y'}(t) = [-\varepsilon_x(t) e^{j\delta_x(t)} \sin\psi + \varepsilon_y(t) e^{j\delta_y(t)} \cos\psi] e^{j2\pi\theta t} \quad (5)$$

如图 5(b) 所示,在 A 端得到的电压为:

$$v' = E_{x'} \cos\chi - j E_{y'} \sin\chi \quad (6)$$

对于右旋圆极化天线,假设天线接收的为右旋圆极化信号,则 E_x 相位领先 E_y 相位 $\pi/2$, 即 $E_x = jE_y$, 根据式(4)(5)得:

$$E_{x'} = E_x \cos\varphi + E_y \sin\varphi = E_x (\cos\varphi - j \sin\varphi) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} E_{y'} &= -E_x \sin\varphi + E_y \cos\varphi \\ &= -E_x (\sin\varphi + j \cos\varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

由于在实际工程应用中不能做到标准圆极化信号,所以 $\chi_r \neq -\pi/4$ 而是 $\chi_r = -\frac{\pi}{4} + \Delta\chi_r$, 其中 $\Delta\chi_r$ 为偏离圆极化的偏离量. 所以根据式(6)得到:

$$\begin{aligned} v'_r &= E_x e^{-j\varphi} (\cos\chi_r - \sin\chi_r) \\ &= \sqrt{2} E_x e^{-j\varphi} \cos\Delta\chi_r \end{aligned} \quad (9)$$

同理可以得到接收左旋圆极化信号时,

$$\begin{aligned} v'_l &= E_x e^{j\varphi} (\cos\chi_r + \sin\chi_r) \\ &= \sqrt{2} E_x e^{j\varphi} \sin\Delta\chi_r \end{aligned} \quad (10)$$

交叉极化是用来表征工程应用中天线对正交于天线极化方向信号的反应,在射电天文也被称为 D 参数^[8],

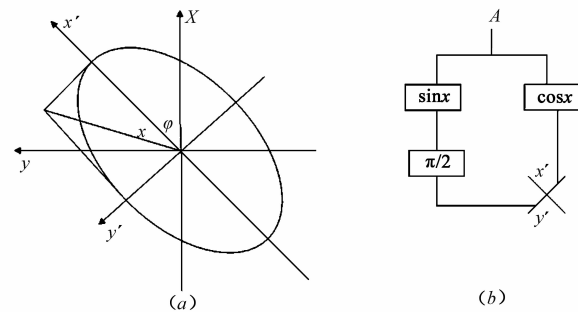


图5 (a)极化椭圆参数示意图(其中位置角 ψ 是椭圆长轴与 x 轴的夹角;轴比 $AR=\tan\psi$; $-\pi/4 \leq \psi \leq \pi/4$) (b)天线模型——当在A端输入信号,会产生如图(a)所示的椭圆极化信号^[13]

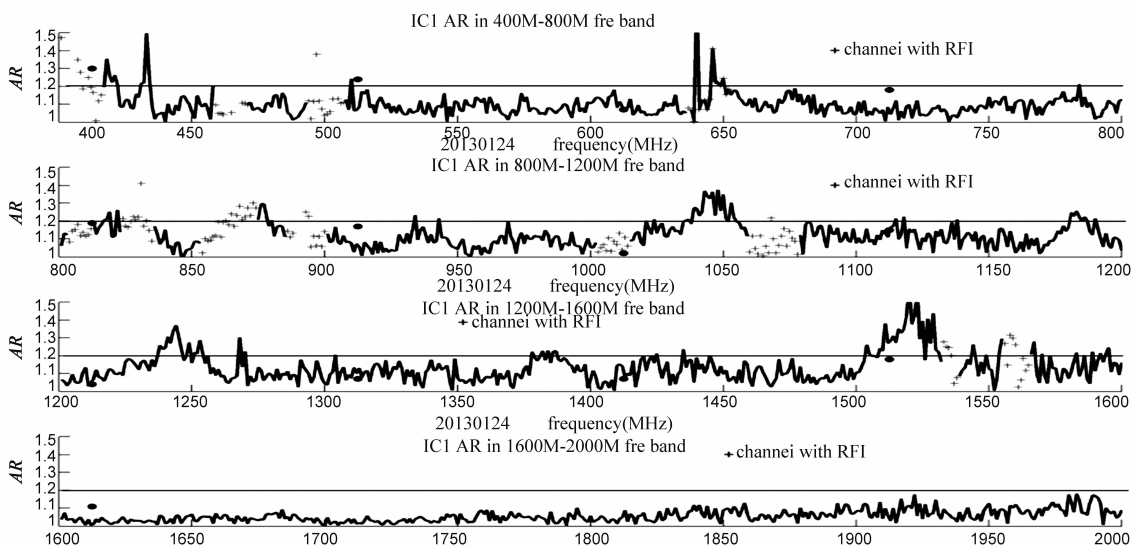


图6 天线轴比测试结果(其中红色“+”为射频干扰频段,黑色直线为AR=1.2,黑色圆点为用标准天线辅助测试值)

通常被定义为正交信号对天线接收信号的泄露,即 $D_r = \frac{v'_l}{v'_r} = e^{j2\varphi_r} \tan \Delta\chi_r$, 其中 D_r 表示在右旋圆极化天线中左旋圆极化信号对右旋圆极化信号的泄露^[13]. 同理可得 $D_l = \frac{v'_r}{v'_l} = e^{-j2\varphi_l} \tan \Delta\chi_l$.

$$\text{轴比 AR} = \tan(\chi + \Delta\chi_l) = \frac{\tan\chi + \tan\Delta\chi_l}{1 - \tan\chi \tan\Delta\chi_l}, \text{当 } \chi = \frac{\pi}{4}$$

时, $\text{AR} = \frac{1 + \tan\Delta\chi_l}{1 - \tan\Delta\chi_l}$, 而 $|D| = \tan \Delta\chi_l$, 所以:

$$\text{AR} = \frac{1 + |D|}{1 - |D|}. \quad (11)$$

根据综合孔径的原理,如果用一对双圆极化的天线观测时,会得到四个相关量^[1] ($V_{rr}, V_{ll}, V_{rl}, V_{lr}$).

因此,两天线相关测量输出和交叉极化项的关系可以表示为^[8,14]:

$$\frac{V'_{rr}}{g_{rm}g_{rn}^*} = V_{rr} + D_{rm}V_{lr} + D_{rn}^*V_{rl} + D_{rm}D_{rn}^*V_{ll} \quad (12)$$

$$\frac{V'_{rl}}{g_{rm}g_{ln}^*} = V_{rl} + D_{rm}V_{ll} + D_{ln}^*V_{rr} + D_{rm}D_{ln}^*V_{lr} \quad (13)$$

$$\frac{V'_{lr}}{g_{lm}g_{rn}^*} = V_{lr} + D_{lm}V_{rr} + D_{rn}^*V_{ll} + D_{lm}D_{rn}^*V_{rl} \quad (14)$$

$$\frac{V'_{ll}}{g_{lm}g_{ln}^*} = V_{ll} + D_{lm}V_{rl} + D_{ln}^*V_{lr} + D_{lm}D_{ln}^*V_{rr} \quad (15)$$

其中 V' 为实际观测中得到的相关量, V 为理想馈源情况下的相关量, g 为复增益项. 对于无明显极化成分的处于相位中心的源,如果两天线具有相似的特性,根据式(11)、(12)、(13)、(14)可得到:

$$D = V'_{lr}/2 \sqrt{V'_{rr}V'_{ll}} \quad (16)$$

4 测试结果与分析

选取天线 IB1 和 IC1 为一对基线,根据式(11)(16)可得到天线 IC1 的轴比如图 6 所示.

其中红色“+”为射频干扰频段,黑色直线为轴比 $\text{AR} = 1.2$,黑色圆点为用标准天线辅助测试值(数据采自 4.5 米天线测试报告).从测试结果可以看出,在大部分频点测得了和单天线测试方法相当的轴比值.这也不排除是单天线方法测试带来的误差,包括极化标准的校准误差、基准天线的极化误差、基准天线的对准误差和转台系统带来的误差等.而基于相关的测试方法对于干涉阵天线不但不会带来上述误差而且更具有可操作性和可重复操作性,因为其不用考虑标准天线的摆放位置和配置.并且只要有合适的天文源就很容易得到全频段需要的数值,而不受标准天线的限制只能得到数个频点或者窄带上数值.

由图 6 可知,在 400MHz ~ 800MHz 频段内 96.5% 的频点轴比小于 1.2;在 800MHz ~ 1200MHz 频段内 86.9% 的频点轴比小于 1.2;;在 1200MHz ~ 1600MHz 频段内 84.4% 的频点轴比小于 1.2;在 1600MHz ~ 2000MHz 的所有频点均小于 1.2.并且在 400MHz ~ 2000MHz 的频率范围内有 97.2% 的频点轴比小于 1.26.此结果验证了 MUSER 具有较高性能的双圆极化馈源,为双圆极化的成像提供了保障.

5 总结

本文通过对 MUSER 双圆极化天线馈源轴比与 D 参数和互相关函数之间的关系理论分析和推导,采用基于相关测量馈源轴比的方法,并在相关测试中得到验证.该方法适合于对综合孔径望远镜阵列馈源轴比的测量,可以根据阵列的相关输出直接测量轴比,不但简化了轴比的测量过程,缩短了测试周期,而且减少了标准天线等相关外界条件带来的误差.同时该方法也不仅限于干涉阵望远镜的轴比测试,只要有满足相似条件的双天线就可以测量天线的轴比,比如批量生产的天线,也可以提供借鉴.并且从结果可以看出 MUSER 双圆极化天线馈源做到了很好的轴比特性,可以满足其对太阳双圆极化成像的要求.

参考文献

- [1] G B Taylor, C L Carilli, R A Perley. Synthesis Imaging in Radio Astronomy II[M]. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1999. 111 - 124.
- [2] 李南京,冯引良,王剑飞,等.利用线极化天线快速测量圆极化天线轴比的方法[P].中国专利:CN103235194A. 2013-08-07.
- [3] 李文廷,韦高,仲兆宇,吴文鹤.圆极化天线轴比的测量方法[J].电子设计工程,2014,22(7):77-78.
- [4] Warren L Stutzman, Gary A Thiele. Antenna Theory and Design (3rd Edition)[M]. USA:Wiley,2012.577-579.
- [5] B Rama Rao, W Kunysz, K McDonald. GPS/GNSS Antennas[M]. Boston, London: Artech House Publishers, 2011. 309-360.
- [6] 尚军平,傅德民,蒋帅,邓颖波.圆极化天线特性参数测量方法[J].西安电子科技大学学报自然科学版,2009,36(1):106-110.
- [7] 毛乃宏,俱新德,等.天线测量手册[M].北京:国防工业出版社,1987.126-165.
- [8] Rick Perley. Measurements of C-Band EVLA Antenna Polarization[Z]. EVLA Memo 131, 2009.
- [9] Yan Y, Zhang J, Wang W. The Chinese Spectral Radioheliograph CSRH[J]. Earth, Moon, and Planets, 2009, 104(1-4):97-100.

- [10] 颜毅华,张坚,陈志军,等. 关于太阳厘米分米波段频谱日像仪研究进展[J]. 天文研究与技术国家天文台台刊,2006,3(2):168-175.
- [11] 王威,颜毅华,张坚,等. 阵列设计研究及馈源设计的初步考虑[J]. 天文学研究与技术国家天文台台刊,2006,3(2):128-134.
- [12] Wang Wei, Yan Yihua, Liu Donghao, Chen Zhijun, Su Cang, et al. Calibration and data processing for a Chinese spectral radioheliograph in the decimeter wave range[J]. PASJ,2013,65(S18):1-5.
- [13] A Richard Thompson, James M Moran. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy [M]. USA: Wiley-Interscience Publication,2001. 97-121.
- [14] Bignell R C. Synthesis Mapping-Proceedings of the NRAO-VLA Workshop held 21-25 June 1982 in Socorro[J]. National Radio Astronomy Observatory,1982.

作者简介



苏 仓 男,1987年二月出生于山东省菏泽市. 2009年毕业于桂林电子科技大学,2010年进入中科院国家天文台太阳射电研究团组. 现为博士生,从事太阳射电图像处理及校准方面的研究.

E-mail: csu@nao.cas.cn



王 威 男,1979年9月出生,辽宁铁岭人. 高级工程师,硕士生导师,中国电子学会会员,天线分会委员. 2002年,2007年分别在杭州电子工业学院和中国科学院研究所院获得工学学士、理学博士学位. 现为中国科学院国家天文台高级工程师,主要从事射电天文方法、校准与数据处理等方面的研究.