

## 利用卫星对明安图射电频谱日像仪的相位校准研究

王 威<sup>1,2</sup>, 颜毅华<sup>1,2,3</sup>, 刘东浩<sup>1,2</sup>, 苏 仓<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 2. 中国科学院太阳活动重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 明安图射电频谱日像仪采用综合孔径技术成像的太阳专用射电望远镜, 为充分利用望远镜天线单元数量, 采用非冗余基线设计, 这就要求需要外部信号源进行系统校准. 本文介绍了利用同步轨道卫星作为校准源, 对明安图射电频谱日像仪进行相位校准的原理, 过程和相应的观测结果, 分析了卫星作为校准的优缺点、处理办法以及对图像质量的影响.

**关键词:** 综合孔径; 相位校准; 卫星

**中图分类号:** TN911.23

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2019)06-1384-04

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.06.028

## Phase Calibration Using Satellite as Calibrator for Mingantu Spectral Radioheliograph

WANG Wei<sup>1,2</sup>, YAN Yi-hua<sup>1,2,3</sup>, LIU Dong-hao<sup>1,2</sup>, SU Cang<sup>1,2</sup>

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Solar Activity of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Mingantu Spectral Radioheliograph (MUSER) is a solar dedicated interferometric array using synthetic aperture imaging technology. There aren't redundant baselines in MUSER in order to make full use of these antennas, which requires an external signal source to carry out system calibration. This paper describes phase calibration of MUSER by using the geostationary satellite as calibrator. Some observations and results are introduced as well. We analyzed the advantages and disadvantages of the satellite as a calibrator, as well as the effect on image quality.

**Key words:** synthesis aperture; phase calibration; satellite

### 1 引言

明安图射电频谱日像仪 Mingantu Spectral Radioheliograph (以下简称 MUSER) 是国家重大科研装备研制项目, 由中国科学院国家天文台研制并运行. 项目立项名称是“新一代厘米—分米波射电日像仪” Chinese Spectral Radioheliograph (简称 CSRH), 建成后根据建设地点改名为 MUSER. 根据科学目标, MUSER 是一部采用综合孔径方法成像的太阳专用观测射电望远镜, 可同时以高空间、高时间和高频率分辨率观测射电太阳, 探测太阳剧烈活动的起源, 将填补目前国际上对太阳耀斑能量初始释放区分米波段高分辨射电成像观测的空白, 有望在日冕物理研究中取得重要的原创性研究成果<sup>[1,2]</sup>.

MUSER 由低频阵和高频阵两部分组成, 对应观测频率分别为 0.4GHz ~ 2GHz 和 2GHz ~ 15GHz, 每个阵均有天线、模拟接收、光传输、数字接收和数据处理等部分

组成. MUSER 是采用综合孔径成像技术进行射电观测的太阳专用望远镜. 来自太阳的射电信号被天线接收, 经过接收机传输到室内, 完成混频、放大、滤波等过程, 再进入数字接收机进行数字化后进行复相关运算, 得到可见度函数, 最后对可见度数据进行处理得到最终的太阳射电图像. 在接收和传输射电信号的过程中, 天线、模拟接收机、光传输链路和数字接收系统中总是存在各种偏差和误差<sup>[3]</sup>. 这些偏差和误差最终引起了复可见度函数幅度和相位上的变化, 最终影响图像质量<sup>[4]</sup>. 因此, 对整个信号接收系统进行校正, 对于包括 MUSER 在内的所有射电望远镜都是必不可少的过程.

对于射电望远镜校准方法来说, 主要有直接测量、校准源校准和自校准三种方法<sup>[4]</sup>. 直接测量法是构建一个测量回路, 完成对接收链路的幅度相位测量; 校准源校准是利用望远镜观测外部的信号源和目标源, 依据两次观测数据消除掉接收系统带来的影响; 自校准

在观测数据中,利用观测目标自身特点,建立模型,然后改正,最终得到理想结果。

国外的太阳射电成像观测设备主要有法国的南茜日像仪和日本的野边山日像仪,都采用冗余基线的设计方法.根据等长基线测量到的相位相同的原理,可以依次递推的求出每个天线的参考相位,可以不必用校准源进行校准<sup>[5,6]</sup>.而 MUSER 为了获得更多的基线数量,采用的非冗余基线设计,不能参考国外日像仪的校准方法。

对于 MUSER 这种干涉阵来说,最简单有效也最可行的办法是利用外部的辐射源进行系统校准.在 MUSER 的校准过程中,宁静太阳和爆发、卫星、射电源都曾作为外部校准源,并在数据处理中也应用自校准等多种方法,得到了丰富的观测结果<sup>[7,8]</sup>.本文将详细论述卫星作为校准源对 MUSER 进行校准的过程、方法以及问题和解决办法。

## 2 相位校准原理

根据射电天文综合孔径成像原理,可观测的可见度函数与真实的亮度分布成傅立叶变换关系<sup>[8]</sup>.干涉阵是通过对两路信号的互相关运算来实现可见度函数测量的.校准的根本目的就是确定和分析这些噪声信号对观测的影响,通过测量完成对直接观测数据的修正。

当 MUSER 对太阳观测时,接收到的复可见度函数信息主要包含了来自太阳的信息,传播路径和接收机的影响.由于信号在接收机内的传播特性很难测量,并且随环境变化,所以无法测量出接收机对信号幅度相位的影响.因此,需要引入校准源观测.同理,当 MUSER 观测校准源时,观测到的复可见度函数信息主要包含了校准源的信息和接收机的影响.这样通过两次观测,就可以消除接收机对观测的影响,得到想要的太阳信息。

以一对基线观测到的可见度函数为例,校准过程可用公式简单的表述为:

$$V_{\text{sun}} = A_{\text{sun}} g_s e^{-j(\varphi_{\text{sun}} + \varphi_s)} \quad (1)$$

$$V_{\text{cali}} = A_{\text{cali}} g_s e^{-j(\varphi_{\text{cali}} + \varphi_s)} \quad (2)$$

$$\frac{V_{\text{sun}}}{V_{\text{cali}}} = \frac{A_{\text{sun}}}{A_{\text{cali}}} e^{-j(\varphi_{\text{sun}} - \varphi_{\text{cali}})} \quad (3)$$

式中, $V_{\text{sun}}$ 和 $V_{\text{cali}}$ 分别为观测太阳和校准源时的复可见度函数, $A_{\text{sun}}$ 和 $A_{\text{cali}}$ 分别为太阳和校准源的幅度信息, $\varphi_{\text{sun}}$ 和 $\varphi_{\text{cali}}$ 分别为太阳和校准源的相位信息, $g_s$ 和 $\varphi_s$ 分别为接收系统的增益和附加相位。

通过分别对太阳和校准源观测数据的综合,可以消除掉信号在接收过程中引入的增益 $g_s$ 和附加相位信息 $\varphi_s$ .为了在两次观测数据 $V_{\text{sun}}$ 和 $V_{\text{cali}}$ 中求出想要的来自太阳的幅度 $A_{\text{sun}}$ 和相位 $\varphi_{\text{sun}}$ ,必须知道来自校准源的幅度 $A_{\text{cali}}$ 和相位 $\varphi_{\text{cali}}$ .这就要求校准源的幅度和相位信息已知,因此最佳的校准源是点源.根据综合孔径成像原理,如果

校准源是点源,且处于观测的相位中心,那么观测到的复可见度函数的幅度和相位不随基线长短的改变而变化。

## 3 校准卫星选取与观测

在 MUSER 的 0.4GHz ~ 2GHz, 2GHz ~ 15GHz 的观测频率范围内,同步轨道卫星可作为校准源使用.相对于其它轨道卫星,同步轨道具有距离地面距离远、轨道变化范围小等优点,这些优点也为校准过程提供了便利.对于 MUSER 来说,在卫星信号的 4.2G 频段,波束宽度约为 5";在 12GHz 的频段,波束宽度约为 1.8".对于同步轨道卫星来说,卫星天线远小于此尺寸,可以把同步轨道卫星作为点源. MUSER 现在利用的卫星主要是在 L 波段的我国风云系列卫星和 C、Ku 波段的亚洲卫星有限公司 Asiasat 系列卫星.选取卫星主要需要考虑卫星的轨道位置,尽可能选取靠近天线中天位置的卫星.从校准误差上分析,太阳观测时的指向与卫星观测的指向越接近,误差越小。

在利用卫星作为校准源来修正太阳数据之前,为了了解卫星观测的性质, MUSER 曾对这些卫星进行长时间观测,得到了观测时间内卫星完整的轨迹变化.根据观测到的相位,考虑卫星点源的性质,追踪轨迹在 9 个小时内的变化如图 1 所示。

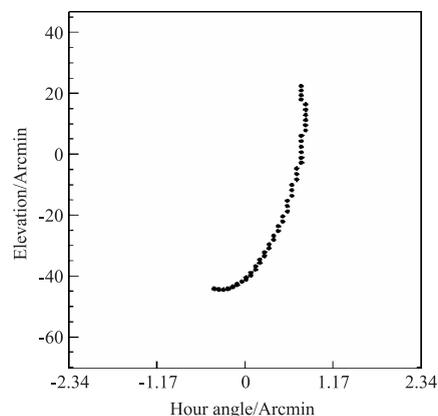


图1 观测到卫星的轨迹变化

从上图的观测结果中可以看到,卫星在 9 小时内,在赤纬角度上变化了 1.1°,而在时角方向上变化仅有 1'.在此需要指出的是,观测结果中的位置相对变化是准确的,但绝对位置可能有偏差.这是由于对卫星观测没有更为准确的校准源,虽然卫星可以认定为点源,但其绝对位置需要绝对位置准确的校准源来确定。

## 4 卫星校准源的问题及解决方法

### 4.1 轨道精度的影响

虽然 MUSER 采用的都是同步轨道卫星,但卫星轨道位置并不是绝对不变的,卫星在 24 小时之内呈近似

8字型的轨道漂移,从图2中的观测结果也可以看出,在赤纬方向漂移大,而在时角方向漂移小. MUSER常用的这些卫星中,风云系列的卫星在一天范围内在赤纬方向的漂移最大可以达到 $2^\circ$ ,而Asiasat系列卫星漂移较小,在赤纬方向仅为 $2'$ . MUSER在每次对卫星进行观测前,都会根据卫星轨道预报软件确定当前时刻卫星位置. 然后根据当前的位置,确定系统的相位中心,以此计算系统延时参数等. 但是,由于卫星轨道预报软件提供的轨道精度在角分量级,尤其是在轨道根数更新不及时的情况下,轨道精度更差.

由于轨道误差的影响,实际上卫星并非出于观测时所设定的相位中心,假定卫星的实际位置与观测设定的相位中心在赤经方向和赤纬方向的偏差为 $(\Delta l, \Delta m)$ ,那么观测卫星时的可见度函数可以写成:

$$\begin{aligned} V_{\text{sat}} &= A_{\text{sat}} g_s e^{-j(\varphi_{\text{sat}} + \varphi_s)} \\ &= A_{\text{sat}} g_s e^{-j(2\pi(u_{\text{sat}}\Delta l + v_{\text{sat}}\Delta m) + \varphi_s)} \end{aligned} \quad (4)$$

那么,利用卫星观测数据校准太阳观测数据可以写成:

$$\frac{V_{\text{sun}}}{V_{\text{sat}}} = \frac{A_{\text{sun}}}{A_{\text{sat}}} e^{-j(\varphi_{\text{sun}} - 2\pi(u_{\text{sat}}\Delta l + v_{\text{sat}}\Delta m))} \quad (5)$$

而 $\varphi_{\text{sun}}$ 对应某一个基线可以写成 $2\pi(u_{\text{sun}}l_{\text{sun}} + v_{\text{sun}}m_{\text{sun}})$ ,其中 $u_{\text{sun}}, v_{\text{sun}}$ 为这一基线观测太阳时的UV坐标, $l_{\text{sun}}$ 和 $m_{\text{sun}}$ 是在时角和赤纬方向上太阳圆面所有辐射源的综合位置,相当于重心. 那么公式就可以写成:

$$\begin{aligned} \frac{V_{\text{sun}}}{V_{\text{sat}}} &= \frac{A_{\text{sun}}}{A_{\text{sat}}} e^{-j2\pi(u_{\text{sun}}l_{\text{sun}} + v_{\text{sun}}m_{\text{sun}} - (u_{\text{sat}}\Delta l + v_{\text{sat}}\Delta m))} \\ &= \frac{A_{\text{sun}}}{A_{\text{sat}}} e^{-j2\pi(u_{\text{sun}}l_{\text{sun}} - u_{\text{sat}}\Delta l + v_{\text{sun}}m_{\text{sun}} - v_{\text{sat}}\Delta m)} \\ &= \frac{A_{\text{sun}}}{A_{\text{sat}}} e^{-j2\pi(u_{\text{sun}}(l_{\text{sun}} - \frac{u_{\text{sat}}}{u_{\text{sun}}}\Delta l) + v_{\text{sun}}(m_{\text{sun}} - \frac{v_{\text{sat}}}{v_{\text{sun}}}\Delta m))} \end{aligned} \quad (6)$$

从上面公式可以看出,由于在卫星观测时存在卫星实际位置和相位中心的偏差,在利用卫星作为校准源对太阳观测数据进行修正的过程中,这种偏差依然存在,并且会导致太阳图像的位置偏差,同时还导致可见度函数的相位误差. 观测太阳时的指向与卫星时的指向越接近,相位误差越小;观测卫星时相位中心与实际位置的偏差 $(\Delta l, \Delta m)$ 越小,带来的影响越小. 因此,在实际观测过程中,应尽可能的降低 $(\Delta l, \Delta m)$ 带来的影响.

## 4.2 非平面波对校准的影响

地球同步轨道卫星的运行周期与地球自转时间相同. 所以不考虑轨道摄动时,在地球同步轨道上运行的卫星每天相同时刻经过地球上相同地点的上空. 对地面观测者而言,每天卫星近似出现在相同的方向上. 对应MUSER低频阵,在最高频率的2.0GHz的时候,波长约为15cm;对应MUSER高频阵,波长分别是15cm~2cm,由于观测相位误差 $5^\circ$ 的要求,在数据处理中需要

考虑这种非平面波带来的影响.

以东经 $105^\circ$ 赤道上空的Asiasat7卫星和FY-2G卫星为例,由于投影关系的存在,最大基线时角方向最大基线约为2.8km,赤纬方向2.0km,卫星距离天线阵的距离约为37678km. 由于卫星高度和基线距离的影响,来自卫星的信号到达中心天线和最远端接收天线时不能简单的假定为平面波入射,远端天线与中心天线的距离差可写为:

$$\sqrt{L_{\text{sat}}^2 + D_{\text{array}}^2} - L_{\text{sat}} \quad (7)$$

上式中, $L_{\text{sat}}$ 为卫星到中心天线的距离, $D_{\text{array}}$ 为天线对应的基线到基线中心的距离.

依据上面的计算,距离差与天线离阵中心的距离成正比,最远端天线产生的距离差将达到4.26cm. 对于MUSER最高频率2cm的工作波长来说,距离差已经是波长2倍多. 按照MUSER的设计指标要求,系统中产生的相位误差不超过 $5^\circ$ ,对于低频阵的1.7GHz,约80.3%的基线相位误差小于 $5^\circ$ ;对于高频阵C波段的4.2GHz,只有约74.8%的基线相位误差小于 $5^\circ$ . 因此,在数据处理中必须对这种非平面波带来的影响进行消除.

## 4.3 系统稳定性影响

MUSER是采用综合孔径技术进行射电成像的,接收系统增益和相位的稳定对望远镜至关重要. MUSER图像的动态范围要求是25dB,根据相位误差与图像动态范围的关系<sup>[9]</sup>

$$D = \frac{\sqrt{N(N-1)}}{\phi} \quad (8)$$

其中, $D$ 为图像动态范围, $N$ 为天线单元数量, $\phi$ 为相位误差.

对于MUSER低频阵(0.4GHz~2GHz)的相位误差要求 $\leq 7^\circ$ ,对于高频阵(2GHz~15GHz)的相位误差要求 $\leq 10^\circ$ . 幅度的误差要求更低,一般 $10^\circ$ 的相位误差对应20%的幅度误差<sup>[8]</sup>. 以2015年6月5日的测量结果为例,在定标过程中,消除掉卫星位置变化后,观测结果的幅度和相位的实际变化分别如表1所示.

表1 系统稳定性测试

	幅度 RMS (dB)	相位 RMS( $^\circ$ )
低频阵短基线	0.4	2.8
低频阵长基线	0.4	3.6
高频阵短基线	0.1	0.8
高频阵长基线	0.1	1.2

实际上,上表中的测量结果受信噪比的影响. 对于低频阵,测量的是卫星信标信号,相对于MUSER25MHz的积分带宽,信号带宽很窄,灵敏度低于太阳信号观测. 而对于高频阵测量的是卫星下行的宽带信号,相对低频阵信噪比提高很多. 在定标观测的过程中,系统的幅度和相位变化小于系统设计需求,不会对图像产生影响.

## 5 观测结果

现阶段 MUSER 主要利用同步轨道卫星作为校准源来对观测数据校准,每天早晚各观测一次卫星.通过两次卫星观测检验仪器状态和补偿参数情况,利用其中的一次观测作为校准信息,完成太阳观测的相位修正.校准过的数据经过傅里叶变换后得到脏图,在经过去卷积后得到洁图.

在 MUSER 研制和试运行时期取得了一系列的观测结果,图 2 是高频阵在 2016 年 7 月 5 日的观测数据经过 Asiasat7 卫星相位校准后的结果.

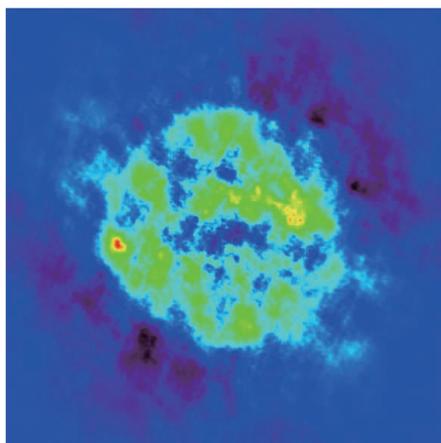


图2 MUSER高频阵观测脏图  
(观测频率4.1875GHz,积分时间30ms,图像范围 $1^\circ \times 1^\circ$ )

## 6 总结

MUSER 是国家天文台自主研制并运行的具有国际领先水平的新一代厘米分米波太阳射电成像观测设备.现阶段,同步轨道卫星对于 MUSER 是个主要的校准源,包括 L 波段的风云系列卫星和 C、Ku 波段的 AsiaSat 系列卫星. MUSER 利用卫星作为校准源对接收系统进行了校准,取得了一系列的观测结果.本文从综合孔径望远镜校准原理出发,分析了 MUSER 的校准过程,对同步轨道卫星轨道位置变化和非平面波入射影响等方面的进行了分析,给出了校准结果.

校准后的观测结果主要受轨道位置精度、非平面波和系统稳定性的影响.根据上文中的分析,以高频阵的观测为例,非平面波入射的影响可以较为精确计算,系统相位稳定也远小于系统设计的要求.卫星轨道位置偏差的影响相对不确定,在各个基线上引起不同的相位偏差,主要会引起图像位置的偏移和变形,而这种变形在图像边缘影响严重.根据 MUSER 试运行的观测结果来看,在这些频段仍可得满足要求的观测图像,但为了在全频段上和更为精确的校准,仍需要进一步考虑其它射电源来进行校准,消除校准源位置和非平面

波带来的影响.

## 参考文献

- [1] 颜毅华,张坚,黄光力.厘米-分米波高分辨频谱日像仪——项目建议书[R].北京:中国科学院国家天文台,2003.
- [2] Yan Yihua, Jian Zhang, Wei Wang, Fei Liu, Zhijun Chen, Guoshu Ji. The Chinese spectral radioheliograph-CSRH [J]. Earth Moon Planet, 2009, 104(1-4): 97-100.
- [3] 王绥琯,吴盛殷,崔振兴,等.射电天文方法[M].北京:科学出版社,1988.
- [4] AR Thompson, JM Moran, GW Swenson Jr. Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy[M]. New York: Wiley, 2001. 86-90.
- [5] Nakajima H, Nishio M, Enome S, et al. The nobeyama radioheliograph[J]. Proceedings of IEEE, 1994, 82(5): 705-713.
- [6] The Radioheliograph Group. The Nancay multifrequency radioheliograph; New developments and data acquisition for the solar physics community [J]. Advances in Space Research, 1993, 13(9): 411-414.
- [7] Wang W, Yan Y H, Liu D H, Chen Z J, Su C, Liu F, Geng L H, Chen L J, Du J. Calibration and data processing for a chinese spectral radioheliograph in the decimeter wave range [J]. PASJ, 2013, 65(sp1): s18-1-s18-5.
- [8] 刘东浩,颜毅华,赵岸,王威.新一代厘米分米波射电日像仪系统延时校准方法研究[J].电子学报,2013,41(3): 570-574.  
Liu Dong-hao, Yan Yi-hua, Zhao An, Wang Wei. A delay calibration for Chinese spectral radioheliograph in the decimeter to centimetric wave range [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(3): 570-574.
- [9] G B Taylor, C L Carilli, RA Perley. Synthesis Imaging in Radio Astronomy-II [M]. California: Astronomical Society of Pacific, 1999.

## 作者简介



王 威 男,1979 年 9 月出生于辽宁.中科院国家天文台,高级工程师,2007 年毕业于中科院研究生院,获得理学博士学位.现主要从事射电天文技术方法方面的研究,包括干涉成像理论,射电天文仪器校准、数据处理和图像处理等工作.

E-mail: wwang@nao.cas.cn

颜毅华 男,1962 年 4 月出生于陕西.研究员、博士生导师,1990 年于大连理工大学毕业获得博士学位,现主要从事空间天文、太阳物理和太阳射电天文研究,现任中国科学院太阳活动重点实验室主任、国家天文台明安图观测基地首席研究员.

E-mail: yyh@nao.cas.cn