

射电天文毫米波接收机强度校准*

王 凯^{1,†} 陈卯蒸^{1,2} 马 军^{1,2} 李笑飞^{1,2} 闫 浩^{1,2} 项斌斌^{1,2}

(1 中国科学院新疆天文台 乌鲁木齐 830011)

(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210008)

摘要 射电天文强度校准的目的是将接收设备对天文观测源的响应转换为天文意义上的流量。在常用的射电天文强度校准方法中, 厘米波校准主要使用噪声注入模式, 就是将1个标准噪声信号在馈源和极化器之后注入到接收机内部进行校准。由于毫米波微波器件的小型化导致噪声注入模式不易实现, 加之注入模式可能引入噪声, 因此BTL (Bell Telephone Laboratory) 最早提出使用斩波轮技术进行毫米波校准, 就是在馈源口面交替放置或者移除常温黑体进行校准; 之后BIMA (Berkeley Illinois Maryland Association Array)又提出使用常温、热负载进行校准; ALMA (Atacama Large Millimeter Array)对单、双负载校准方式的精度进行计算后, 认为双温度负载校准方式有潜力实现1%的校准精度, 并最终设计出机械臂式双温度负载校准机构; 此后, GBT (Green Bank Telescope) 4 mm波段制冷接收机设计出旋转盘式双温度校准机构; OSO (Onsala Space Observatory)最新研制的3 mm波段制冷接收机设计出波束切换式双温度校准机构。中国科学院新疆天文台QTT (Qi Tai Telescope)项目的启动推动了毫米波接收机研制进程, 为提高毫米波强度校准精度, 相关的技术预研已经开始。

关键词 望远镜, 技术: 雷达天文, 方法: 观测

中图分类号: P111; **文献标识码:** A

1 引言

射电天文是天文学的一个重要研究领域^[1]。射电天文学中按电磁波波段区分, 毫米波天文是使用毫米波段(波长1–10 mm)进行天文观测的一个分支^[2]。20世纪50年代, 世界上就成功研制了一系列小型毫米波射电望远镜。毫米波射电天文发展到20世纪70年代, 已经成为当时新兴的实测天文领域。毫米波段的宇宙电波信息被用来研究星际云的分布、恒星形成及演化、银河系结构、星系和宇宙学以及彗星和行星等太阳系天体。在

2018-03-23收到原稿, 2018-06-08收到修改稿

*国家重点基础研究发展计划项目(2015CB857100)、国家自然科学基金项目(11603064、U1431230)、中国科学院天文台站设备更新及重大仪器设备运行专项经费资助

[†]wangkai@xao.ac.cn

高频射电范围,毫米波天文观测已为天文学各领域做出令人瞩目的贡献^[3],成为探测冷暗宇宙的一个主要窗口.以探测分子云的分布、年轻恒星的形成为代表的一系列重要发现,使得毫米波射电天文学和“星际分子云与恒星形成”成为国际天文界最热门的研究领域之一.

射电望远镜是射电天文重要的观测工具,它将宇宙天体辐射而来的微弱的电磁波信号反射至焦点接收机的馈源,然后再经过放大和滤波后输送至终端系统,如图1所示.

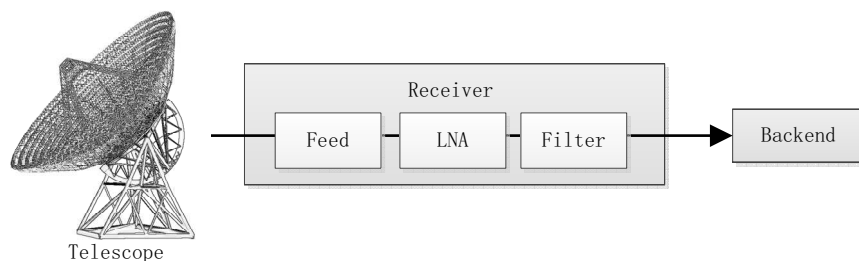


图 1 射电望远镜信号传输链路

Fig. 1 Signal transmission link of radio telescope

当射电望远镜观测“冷空”,也就是观测没有天文辐射的天空区域时,在接收机输出的频谱上可以看到1个带通信号,如图2 (左图),这个带通信号表现的是“系统噪声”,也就是接收机内部噪声和天空噪声之和.而当射电望远镜指向1个射电源时,会在原有带通信号的基础上多出1个很窄的信号,如图2 (右图).一般来说,可以用这两种带通响应之间的不同来区别天体辐射与接收机及天空背景噪声.

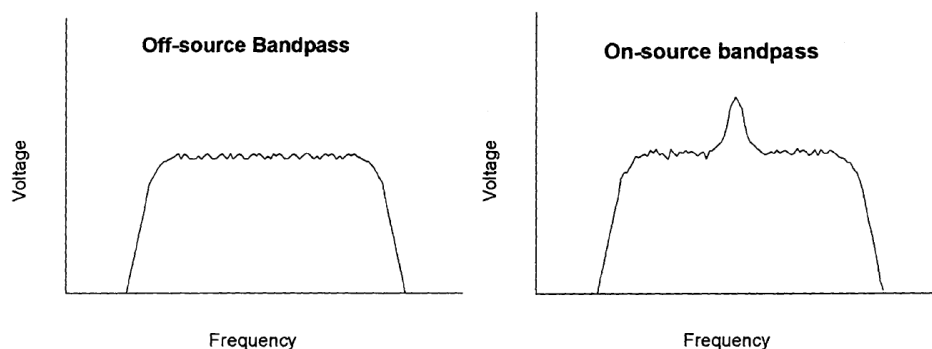


图 2 指向和偏开源时接收机的带通响应

Fig. 2 On-source and off-source receiver bandpasses

上述响应结果之间的不同 ΔV 就是待测量射电源的信息,如(1)式所示:

$$\Delta V = V_{\text{on}} - V_{\text{off}}, \quad (1)$$

其中 V_{on} 为指向源的强度, V_{off} 为偏开源的强度.但这些原始数据在接收机输出端只是一些未加工的电压值、功率值或计算机计数,没有经过任何的校准.射电天文强度校准的

目的,就是要将接收机对射电源的响应转换为天文意义上的流量. 由于观测信号频率不同,毫米波校准与厘米波校准又有一些不同,这些不同在于校准的技术手段,还有大气等一些因素对毫米波校准的影响^[4].

2 强度校准的方法

虽然某些强度校准实例是通过1个已知亮温度或者流量密度的射电源来对待观测的天文数据进行标定,但一般的校准方法还是先通过建立1个天线等效的温度标尺,以此来对数据进行标定.

通常先使用两个不同物理温度、宽带的辐射源(比如冷、热黑体负载),将它们分别放置在接收机第1级放大器或者混频器的前面,使其辐射注入到接收机的馈源或者波导里,其产生的带通信号如图3所示.

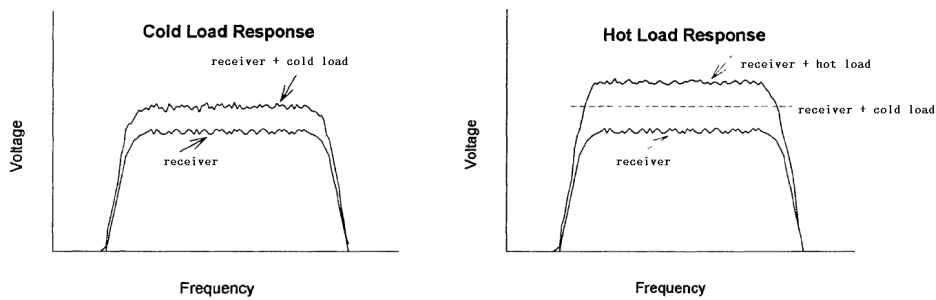


图3 冷、热负载下接收机的带通响应

Fig.3 Cold-load and hot-load system responses

利用冷负载温度 T_{cold} 和热负载温度 T_{hot} 以及对应的接收机输出,可以得到1个转换因子 g ,如(2)式所示:

$$g = \frac{T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}}{(V_{\text{Rx}} + V_{\text{hot}}) - (V_{\text{Rx}} + V_{\text{cold}})}, \quad (2)$$

单位是K/V, 其中 V_{Rx} 为接收机自身的强度输出, V_{hot} 为热负载的强度输出, V_{cold} 为冷负载的强度输出. 而“Y因子”就是当冷、热负载被放置到馈源前级时的接收机的1个功率响应比率,如(3)式所示:

$$Y = \frac{V_{\text{Rx}} + V_{\text{hot}}}{V_{\text{Rx}} + V_{\text{cold}}}. \quad (3)$$

一旦建立了Y因子,就可以以此来计算接收机的噪声温度 T_{Rx} ,如(4)式所示:

$$T_{\text{Rx}} = \frac{T_{\text{hot}} - YT_{\text{cold}}}{Y - 1}, \quad (4)$$

还可以对1个稳定的校准源(1个脉冲的噪声二极管或者黑体负载)进行2次校准,得到第2级校准源的等效温度 T_{cal} ,如(5)式所示:

$$T_{\text{cal}} = \frac{V_{\text{cold-on}} - V_{\text{cold-off}}}{V_{\text{hot-off}} - V_{\text{cold-off}}} \times (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}), \quad (5)$$

其中 $V_{\text{cold-on}}$ 为冷负载覆盖下开启噪声源的强度输出, $V_{\text{cold-off}}$ 为冷负载覆盖下关闭噪声源的强度输出, $V_{\text{hot-off}}$ 为热负载覆盖下关闭噪声源的强度输出. 之后使用这个第2级校准源来测试天线的系统温度 T_{sys} , 如(6)式所示:

$$T_{\text{sys}} = \frac{V_{\text{sys}}}{(V_{\text{sys}} + V_{\text{cal}}) - V_{\text{sys}}} \times T_{\text{cal}}, \quad (6)$$

其中 V_{sys} 为天线指向1个没有射电源天区的强度输出, V_{cal} 为第2级校准源的强度输出. 最后再对待观测的射电源进行ON/OFF观测, 就可以得出射电源等效的天线温度 T_A , 如(7)式所示:

$$T_A = \frac{V_{\text{on}} - V_{\text{off}}}{V_{\text{off}}} \times T_{\text{sys}}. \quad (7)$$

第2级校准源打开前后, 接收机带通信号的变化如图4所示.

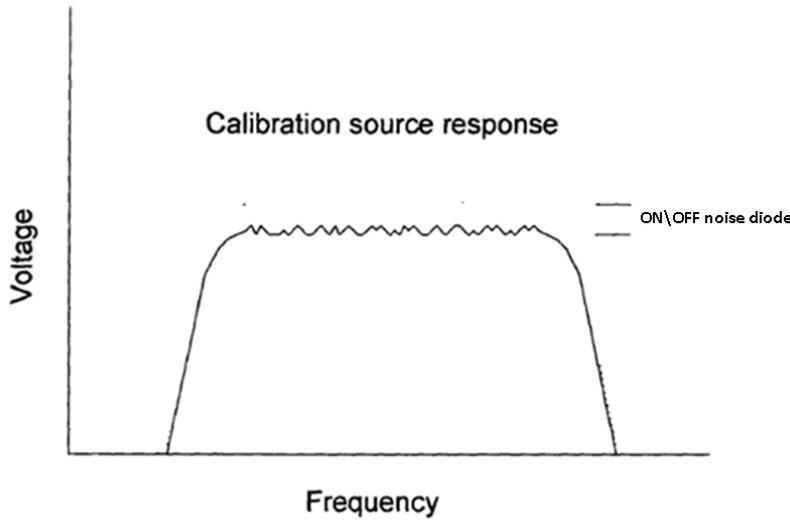


图 4 使用噪声二极管校准的系统响应

Fig. 4 System response of the calibration with a noise diode

上述方式校准后得到的 T_A 没经过任何修正, 在毫米波观测中, 强度校准还需要考虑天线效率和大气影响. 天线效率包括衍射损耗、反射损耗(欧姆损耗、遮挡、误差波束响应)和照射损耗, 因为它们都会以不同方式影响校准; 而大气影响是由于大气的水汽和氧分子会衰减天文信号并引入噪声^[5-6]. 因此, T_{A*} 就是修正了大气衰减、辐射损耗、后向散射和溢出的射电源的天线温度, 如(8)式所示:

$$T_{A*} = \frac{T_A \exp(A\tau_0)}{\eta_r \eta_{\text{rss}}}, \quad (8)$$

其中 A 为大气光学深度, τ_0 为大气不透明度, η_r 为天线的辐射效率, η_{rss} 为天线的后向散射和溢出效率. 最后, 根据射电源的不同, 将 T_{A*} 转换为绝对亮温度 T_{R*} , 如(9)式所示:

$$T_{R*} = \frac{T_{A*}}{\eta_{\text{fss}}}, \quad (9)$$

其中 η_{iss} 为天线前向散射和溢出效率. 或者将 T_{A*} 转换为主波束亮温度 T_{MB} , 如(10)式所示:

$$T_{\text{MB}} = \frac{T_{A*}}{\eta_{\text{M}}}, \quad (10)$$

其中 η_{M} 为天线的主波束效率. 或者将 T_{A*} 转换为流量密度 S_{V} , 如(11)式所示:

$$S_{\text{V}} = \frac{\eta T_{A*}}{\eta_{\text{A}}} \times \frac{2k}{A_{\text{p}}}, \quad (11)$$

其中 η_{h} 为天线的后向遮挡、散射和溢出效率, η_{A} 为天线效率, A_{p} 为天线孔径, k 为玻尔兹曼常量.

在具体实现方式上, 厘米波段强度校准主要使用的是噪声注入模式(波导或自由空间注入), 即第2级校准源是使用1个噪声二极管输出的脉冲信号, 经波导耦合器或者外部自由空间注入到接收机波导器件或者馈源内部, 以此建立温度标尺的校准方法.

新疆天文台南山26 m射电望远镜1.3 cm波段接收机选用的是波导注入模式, 就是将1个标准噪声信号从馈源之后的波导耦合器(如图5左图中部器件)注入到接收机内部, 再经过正交模耦合器、低噪声放大器进行校准.

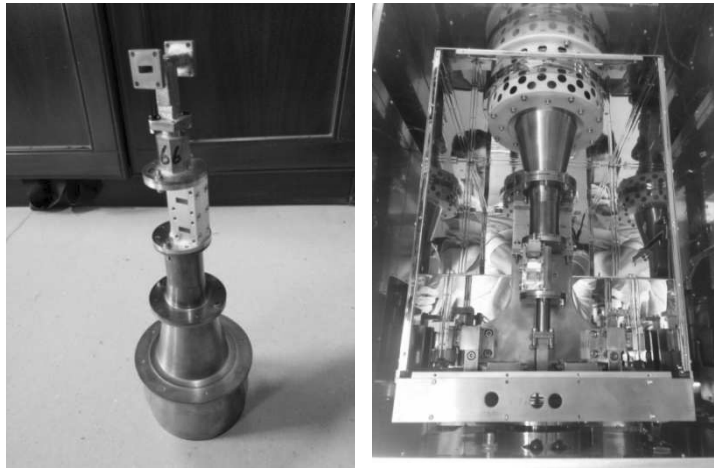


图5 新疆天文台1.3 cm波段接收机噪声注入模式

Fig. 5 Noise injection mode of the Xinjiang Astronomical Observatory 1.3 cm band receiver

首先用冷热负载分别覆盖1.3 cm接收机馈源口面, 记录冷热负载的温度和对应接收机输出的功率值; 然后记录在冷负载覆盖馈源时, 开启第2级标准噪声源对应接收机输出的功率值, 以此计算接收机的噪声温度和第2级校准源等效温度. 例如, 冷负载温度75 K、功率计对应功率输出为0.720 mW, 热负载温度290.2 K、对应输出功率为2.4 mW, 冷负载下开启第2级校准源时对应功率输出为0.738 mW, 经计算得出, T_{Rx} 为17.2 K, T_{cal} 为2.3 K. 有了 T_{cal} 值之后, 就可计算天线整体的系统温度. 例如, 在天线方位为310°、俯仰为60°时, 接收机输出端通过记录仪输出为55.8, 在开启标准噪声源后记录仪输出为60.2, 将之前 T_{cal} 值(2.3 K)代入可以得出在该位置处天线的系统温度为29.2 K. 再对射电源做ON/OFF观测, 就可计算出射电源等效的天线温度. 例如, 当天线指向某一射电

源时接收机输出端通过记录仪输出为86.6,当天线偏开源时接收机输出端通过记录仪输出为82.3,当天线偏开源且开启第2级校准源时接收机输出端通过记录仪输出为88.4,将之前 T_{cal} 值(2.3 K)代入计算,可得出该射电源等效的天线温度 T_A 近似为1.62 K.

毫米波段微波器件的小型化导致噪声注入模式(波导、自由空间)不容易实现,加之该方法可能引入噪声,BTL (Bell Telephone Laboratory)于1973年最早提出使用斩波轮技术进行毫米波校准.斩波轮校准方法就是通过在馈源的顶部交替引入和移除1个常温吸波材料,使接收机交替测试常温吸波材料和天空的辐射,以常温吸波材料的温度与天空亮温度之间的差值来建立温度标尺的校准方法.这个技术的优点在于它可以自动补偿大气吸收的变化,在校准时仅仅需要提供常温黑体的温度和大气沿着波束方向的平均温度,该方法特别适合大气条件快速变化的情况.由于斩波轮校准方法仅需要设计1个简单的机械结构将常温黑体覆盖至馈源口面或者从馈源口面移开(图6),且不需要为紧凑的毫米波接收机系统单独提供第2级校准源,而用常温吸波材料的温度 T_{load} 与天空亮温度 T_{sky} 之间的差值来代替第2级校准源的等效温度 T_{cal} ,如(12)式所示:

$$\Delta T_{\text{cal}} \equiv T_{\text{load}} - T_{\text{sky}} . \quad (12)$$

因此,在其后一段时间内被大部分毫米波射电天文校准机构所采纳^[7-9].

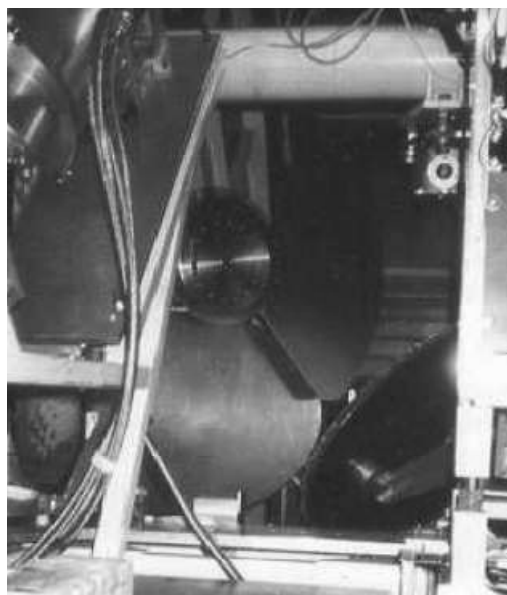


图6 IRAM (Institut de Radioastronomie Millimétrique)斩波轮校准系统

Fig. 6 The chopper wheel calibration system of IRAM

基于斩波轮校准方法,BIMA (Berkeley Illinois Maryland Association Array)于1998年设计了1种双温度负载的毫米波校准方法(如图7),该方法是传统斩波轮技术的改良,就是将校准负载放在BIMA天线卡塞格伦副反射面中心的后面,负载覆盖接收机波束的0.8%,两个负载的温度分别为300 K和400 K,由天线的校准机构来实现波束在两个温度负载及天空方向的切换^[10].由于两个温度负载和切换机构必须被装配在副反射面的

后面, 机械设计方面非常难以实现, 因此BIMA的双温度负载毫米波校准方法并不适合所有的射电望远镜.

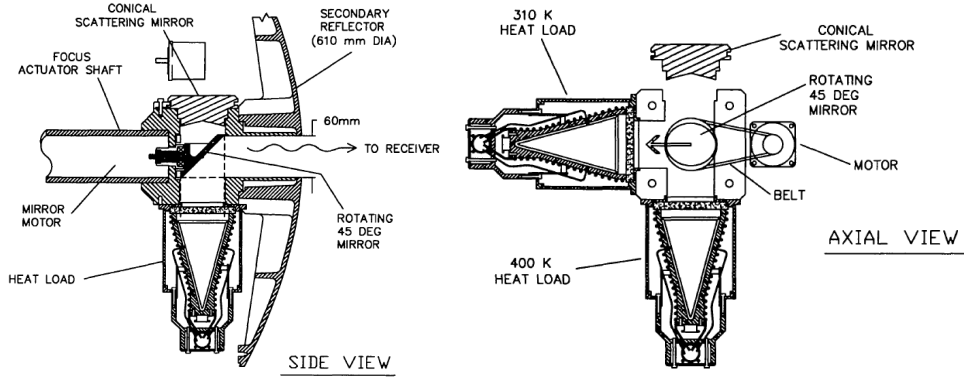


图 7 BIMA副反射面结构剖面图

Fig. 7 Sectional view of the BIMA subreflector assembly

3 单、双负载毫米波强度校准方法精度比对

ALMA (Atacama Large Millimeter Array)在选择强度校准方式之前, 对单(传统斩波轮)、双温度负载强度校准方式的精度做了计算. 在所有精度对比计算中, 有关指向误差、不同俯仰角下天线波束变化、大气或设备相位噪声所产生的损耗、SIS (Superconductor-Insulator-Superconductor)混频器或放大器的增益压缩、接收机波束到校准负载之间耦合性均暂不考虑.

假设待测信号仅存在于信号边带, 信号边带增益 G_s 和 η_l 是已知的, 可以得到1个标准的等式, 如(13)式所示:

$$T_{A*} = \frac{V_{\text{source}} - V_{\text{sky}}}{K G_s \eta_l \exp(-\tau_s)}, \quad (13)$$

其中 V_{source} 为天线指向射电源时的强度输出, V_{sky} 为天线偏开射电源时的强度输出, K 为强度输出和对应温度的比值, G_s 为信号边带的增益, τ_s 为信号边带大气不透明度. 下面来讨论两种斩波轮技术.

3.1 单负载斩波轮方式

在这部分计算中, 假设 V_{source} 、 V_{sky} 及常温黑体覆盖时的强度输出 V_{load} 均可以精确测试. 单负载 T_{A*} 的方差 $\sigma(T_{A*})^{\text{one-load}}$ 如下:

$$\begin{aligned} \sigma^2(T_{A*})^{\text{one-load}} = & \sigma^2(T_m) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial T_m} \right)^2 + \sigma^2(T_{\text{load}}) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial T_{\text{load}}} \right)^2 + \sigma^2(\eta_l) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial \eta_l} \right)^2 + \\ & \sigma^2(R_i) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial R_i} \right)^2 + \sigma^2(T_{\text{spill}}) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial T_{\text{spill}}} \right)^2 + \sigma^2(\tau_s) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial \tau_s} \right)^2 + \sigma^2(\tau_i) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial \tau_i} \right)^2, \quad (14) \end{aligned}$$

其中, 变量为大气温度 T_m 、 T_{load} 、 η 、镜像边带与信号边带增益比值 R_i 、有效溢出温度 T_{spill} 、 τ_s 和镜像边带大气不透明度 τ_i . 然后对(13)式求偏导数, 其中 K 如下所示:

$$K = \frac{V_{\text{load}} - V_{\text{sky}}}{T_{\text{load}} - T_{\text{sky}} - T_{\text{Rx}}}, \quad (15)$$

最终可以计算出单负载斩波轮精度:

$$\left(\frac{\sigma(T_{A*})}{T_{A*}} \right)^{\text{one-load}} = \frac{\sqrt{\sigma^2(T_m)[1 - \exp(\tau_s) + R_i]^2 + \sigma^2(T_m)[(1 + R_i) \exp(\tau_s)]^2}}{T_m + R_i}. \quad (16)$$

3.2 双负载斩波轮方式

在这部分计算中, 假设 V_{source} 、 V_{sky} 、高温黑体覆盖时的强度输出 $V_{\text{load},1}$ 、低温黑体覆盖时的强度输出 $V_{\text{load},2}$ 均可以精确测试. 根据(17)式计算双负载 T_{A*} 的方差 $\sigma(T_{A*})^{\text{two-load}}$ 为:

$$\begin{aligned} \sigma^2(T_{A*})^{\text{two-load}} = & \sigma^2(T_{\text{load},1}) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial T_{\text{load},1}} \right)^2 + \sigma^2(T_{\text{load},2}) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial T_{\text{load},2}} \right)^2 + \\ & \sigma^2(G_s) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial G_s} \right)^2 + \sigma^2(\eta) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial \eta} \right)^2 + \sigma^2(\tau_s) \left(\frac{\partial T_{A*}}{\partial \tau_s} \right)^2, \end{aligned} \quad (17)$$

其中, 变量为高温黑体温度 $T_{\text{load},1}$ 、低温黑体温度 $T_{\text{load},2}$ 、 G_s 、 η 和 τ_s . T_{A*} 表达式如下:

$$T_{A*} = \left(\frac{T_{\text{load},1} - T_{\text{load},2}}{V_{\text{load},1} - V_{\text{load},2}} \right) \frac{V_{\text{source}} - V_{\text{sky}}}{G_s \eta \exp(-\tau_s)}, \quad (18)$$

对上式求偏导数, 最终可以计算出双负载斩波轮精度(假设 $\eta \approx 1$):

$$\left(\frac{\sigma(T_{A*})}{T_{A*}} \right)^{\text{two-load}} = \sqrt{\frac{\sigma^2(T_{\text{load},1}) + \sigma^2(T_{\text{load},2})}{(T_{\text{load},1} - T_{\text{load},2})^2} + \frac{\sigma^2(G_s)}{G_s^2} + \frac{\sigma^2(\eta)}{\eta^2} + \sigma^2(\tau_s)}. \quad (19)$$

3.3 单、双负载斩波轮方式之间精度比对

假设ALMA台址位置降水量为1 mm, 观测俯仰为45°, 接收机系统为双边带, 负载温度测试精度为0.1%, 以此对单、双负载斩波轮方式的精度进行比对. 表1罗列了单、双温度负载斩波轮方式的精度计算结果, 分别在230 GHz、490 GHz、650 GHz进行计算, 每个频率测试4组. 其中第1组数据为最好的情况, 第2组数据中 T_m 的精度变差, 第3组数据中负载温度的精度变差, 第4组数据中大气不透明度的精度变差. 从表1里可以看出, 在使用单负载(传统斩波轮)斩波轮校准方式中, 230 GHz时最佳条件下精度在0.6%, 490 GHz时最佳条件下精度在7.8%, 650 GHz时最佳条件下精度在7.9%; 在使用双温度负载斩波轮校准方式中, 230 GHz时最佳条件下精度在1.4%, 490 GHz时最佳条件下精度在1.7%, 650 GHz时最佳条件下精度在1.7%. 根据第2-4组数据的计算结果可以得出, 在单负载斩波轮方式中, 频段越高, 大气温度和大气不透明度对整个精度影响越大; 在双负载斩波轮方式中, 大气不透明度的测试精度至少要达到1%, 才能将整个不确定性控制在2%的范围内. ALMA最终得出结论: 双负载斩波轮方式在 T_{A*} 温度标尺计算中有潜力实现1%的校准精度, 但缺点是需要独立测试大气不透明度.

表 1 单、双负载斩波轮校准精度
Table 1 The one-load and two-load chopper wheel calibration accuracies

Frequency	T_m	T_{load}	T_{spill}	τ_s	$T_{load,1}$	$T_{load,2}$	$\left(\frac{\sigma(T_{A*})}{T_{A*}}\right)^{one-load}$	$\left(\frac{\sigma(T_{A*})}{T_{A*}}\right)^{two-load}$
/GHz	/K	/K	/K		/K	/K		
230	$\frac{10}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{1}{0.95T_m}$	$\frac{0.0007}{0.07}$	$\frac{0.001}{6.0}$	$\frac{0.001}{8.0}$	0.6%	1.4%
230	$\frac{20}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{1}{0.95T_m}$	$\frac{0.0007}{0.07}$	$\frac{0.001}{6.0}$	$\frac{0.001}{8.0}$	0.7%	1.4%
230	$\frac{10}{268}$	$\frac{1.0}{268}$	$\frac{1}{0.95T_m}$	$\frac{0.0007}{0.07}$	$\frac{0.01}{6.0}$	$\frac{0.01}{8.0}$	0.7%	1.6%
230	$\frac{10}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{1}{0.95T_m}$	$\frac{0.007}{0.07}$	$\frac{0.001}{6.0}$	$\frac{0.001}{8.0}$	0.7%	1.6%
490	$\frac{10}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{10}{0.95T_m}$	$\frac{0.01}{1.1}$	$\frac{0.001}{6.0}$	$\frac{0.001}{8.0}$	7.8%	1.7%
490	$\frac{20}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{10}{0.95T_m}$	$\frac{0.01}{1.1}$	$\frac{0.001}{6.0}$	$\frac{0.001}{8.0}$	15.6%	1.7%
490	$\frac{10}{268}$	$\frac{1.0}{268}$	$\frac{10}{0.95T_m}$	$\frac{0.01}{1.1}$	$\frac{0.01}{6.0}$	$\frac{0.01}{8.0}$	7.8%	1.9%
490	$\frac{10}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{10}{0.95T_m}$	$\frac{0.1}{1.1}$	$\frac{0.0001}{6.0}$	$\frac{0.0001}{8.0}$	10.5%	10.1%
650	$\frac{10}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{10}{0.95T_m}$	$\frac{0.01}{1.1}$	$\frac{0.001}{6.0}$	$\frac{0.001}{8.0}$	7.9%	1.7%
650	$\frac{20}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{10}{0.95T_m}$	$\frac{0.01}{1.1}$	$\frac{0.001}{6.0}$	$\frac{0.001}{8.0}$	15.8%	1.7%
650	$\frac{10}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{10}{0.95T_m}$	$\frac{0.01}{1.1}$	$\frac{0.01}{6.0}$	$\frac{0.01}{8.0}$	8.0%	1.9%
650	$\frac{10}{268}$	$\frac{0.1}{268}$	$\frac{10}{0.95T_m}$	$\frac{0.1}{1.1}$	$\frac{0.001}{6.0}$	$\frac{0.001}{8.0}$	10.6%	10.1%

4 毫米波强度校准实例

4.1 ALMA机械臂式双温度负载校准机构

2007年, ALMA经过多年调研, 在对斩波轮/叶片校准技术和叶片/双温度负载相结合校准技术评估后, 最终采用了全波束覆盖的双温度负载斩波轮校准技术, 该校准机构采用机械臂式设计, 使用常温(300 K)负载和热(400 K)负载, 通过机械臂旋转将常温或热负载移动至目标接收机的馈源口面处, 如图8所示.

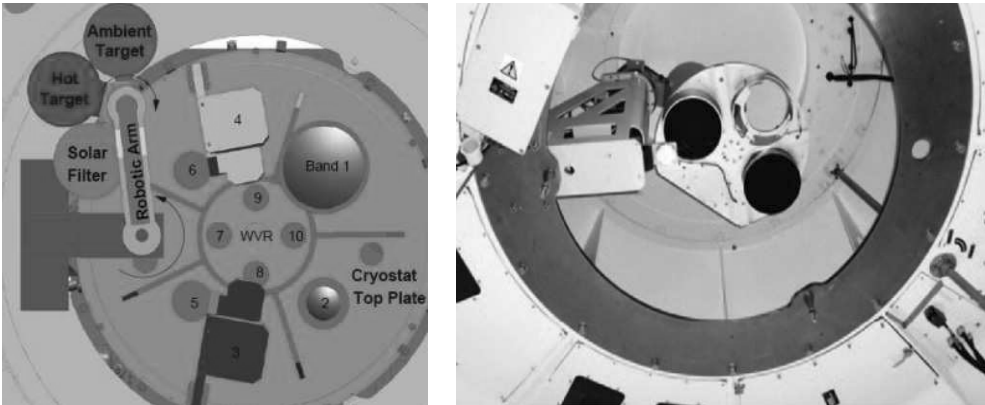


图 8 ALMA双负载斩波轮校准系统

Fig.8 The two-load chopper wheel calibration system of ALMA

ALMA设计在1个巨大的杜瓦腔内放置10个不同波段的接收机, 分别覆盖30–950 GHz. ALMA机械臂式双温度斩波轮校准机构作为10个波段接收机公用校准机构, 可分别为每个波段接收机进行强度校准, 其优点是接收机杜瓦设计完全独立.

2010年, ALMA尝试使用冷负载代替原来的热负载, 就是将黑体负载放置在1个类似杜瓦的真空腔体内, 通过将腔体制冷, 使得黑体负载的温度达到80 K, 如图9所示. 比起使用液氮冷却到80 K, ALMA冷负载设计不用担心液氮从载体内溢出造成危险. 另外, 与原有的400 K热负载相比, 80 K冷负载与常温负载之间温差变大, 使得整个测试精度得到提升. 但80 K负载所需的低温腔体会导致整个校准机构愈加复杂.

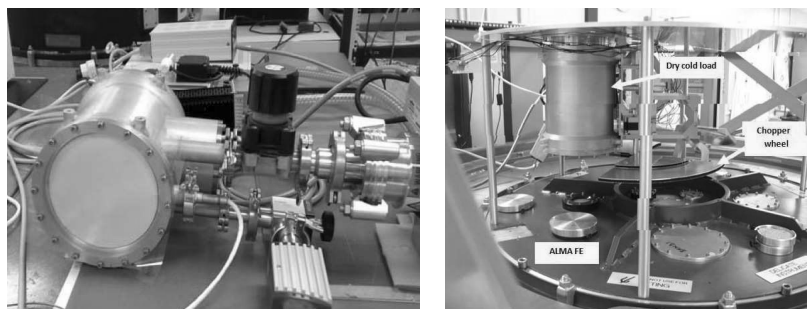


图9 ALMA 80 K冷负载设计

Fig. 9 The 80 K cold load design of ALMA

ALMA机械臂式双温度斩波轮校准机构是传统斩波轮技术的升级, 在原有1个常温负载的机械结构基础上加入1个高温(低温)负载, 该设计同样不需要第2级校准源, 利用可以精确测试的冷、热负载温度 and 对应输出功率即可进行校准, 使校准精度有了很大提升. 且该校准机构仅在校准时使用, 正常观测时不会对接收机信号链路产生额外影响.

4.2 GBT 4 mm波段接收机旋转盘式双温度负载校准机构

GBT (Green Bank Telescope)于2011年开始研制的4 mm波段双波束制冷接收机, 其采用1种旋转盘式双温度负载强度校准机械结构. 该校准机构是在1个圆形的金属盘面外围均匀开设6个圆形窗口, 6个窗口处依次为空负载、冷负载反射镜、线极化转圆极化变换器、空负载、常温负载、空负载, 金属盘面外围设计转动机构, 在电机驱动下可以顺时针旋转, 如图10所示. 转动机构安装于4 mm接收机的顶部, 使得金属盘面其中两个窗口分别对向接收机的两个波束.



图10 GBT 4 mm接收机双负载校准系统

Fig. 10 The two-load calibration system of GBT 4 mm receiver

该校准机构利用4 mm接收机自身80 K冷级, 将冷负载放置在80 K冷屏处, 位于两个分离的波束中间位置, 接收机在冷负载及两个波束馈源位置处均开设1个真空窗, 在冷负载真空窗上方的金属圆盘中心位置处放置另一个冷负载反射镜, 这样通过二次反射便可以将冷负载的辐射反射至接收机其中1个波束内, 如图11所示. 当校准过程需要热负载时, 只需要顺时针驱动旋转180°, 将热负载转动至该波束位置即可. 当需要观测冷空或者射电源时, 继续驱动旋转盘, 将旋转盘没有遮挡的位置(也就是空负载)转动至该波束位置即可.

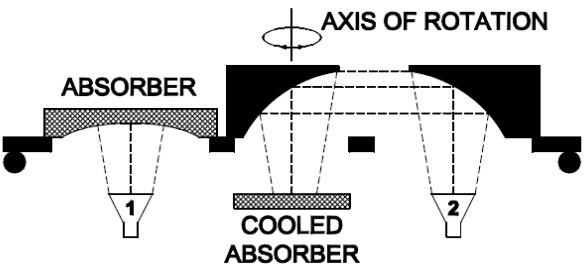


图 11 GBT 4 mm接收机80 K冷负载设计

Fig. 11 The 80 K cold load design of GBT 4 mm receiver

如图12所示, 当旋转盘在位置0时, 4 mm接收机的两个波束前均没有遮挡; 旋转至位置1时, 冷负载覆盖波束1, 常温负载覆盖波束2; 旋转至位置2时, 波束1转化成圆极化, 波束2无遮挡; 旋转至位置3时, 两个波束前均没有遮挡; 旋转至位置4时, 常温负载覆盖波束1, 冷温负载覆盖波束2; 旋转至位置5时, 波束1无遮挡, 波束2转化成圆极化; 之后以此循环.

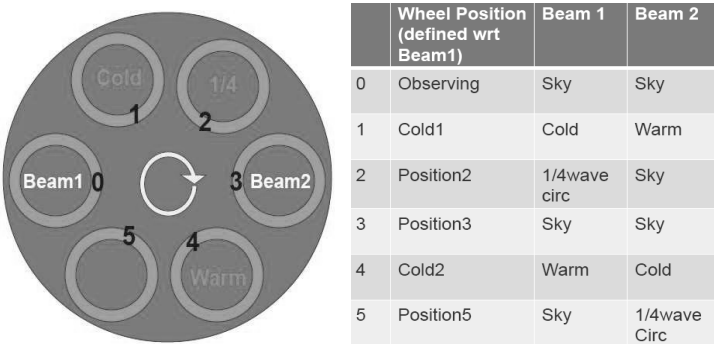


图 12 GBT 4 mm接收机校准旋转盘位置

Fig. 12 The positions of GBT 4 mm receiver calibration wheel

GBT 4 mm波段接收机旋转盘式双温度负载强度校准机械结构利用准光学设计, 将位于杜瓦80 K 冷级的低温负载的辐射经二次反射后注入到接收机馈源内, 常温负载则仍是利用机构旋转直接覆盖至馈源口面, 从而完成了对接收机冷热负载的定标过程. 比起ALMA的双温度负载设计, GBT 4 mm波段接收机校准机构的优点在于不需要单独给冷负载提供80 K低温环境, 使得校准机构有所简化, 但附带的是接收机设计需要提前考虑冷负载的放置并开设更多的真空窗口, 且冷负载经过二次反射后会有一定程度损耗.

4.3 OSO 3 mm波段接收机波束切换式双温度负载校准机构

OSO (Onsala Space Observatory)于2014年开始研制的3 mm波段接收机,其采用1种波束切换式双温度负载强度校准机械结构^[11-12].该校准机构由两面可以旋转的平面反射镜以及可前后移动的两个相互垂直的平面反射镜所组成.通过旋转和移动对应的反射镜,使得位于接收机80 K冷级的冷负载和位于接收机杜瓦外侧的常温负载的辐射可以反射至接收机馈源内,同样通过该机构,还可以实现接收机的ON/OFF观测,如图13所示.



图 13 OSO 3 mm接收机双负载校准系统

Fig. 13 The two-load calibration system of OSO 3 mm receiver

与GBT的校准机构相似,OSO也将冷负载放置在3 mm接收机内部的80 K冷级,在80 K冷负载和接收机馈源位置处分别开设1个真空窗.常温负载与冷负载位于接收机杜瓦信号入射处的两侧,它们正上方分别对应校准机构中可旋转的反射镜F3L、F3R,两面反射镜之间相隔5倍的波束宽度.校准机构中部可前后移动的F1和F2组合镜位于信号入射处的正上方,如图14所示.当接收机需要冷负载校准时,F3R旋转至P2位置,F1移动至信号入射位置;当接收机需要常温负载校准时,F3L旋转至P1位置,F2移动至信号入射位置;当接收机需要指向源(ON)时,F3R旋转至P1位置,F1移动至信号入射位置;当接收机需要指向冷空(OFF)时,F3L旋转至P2位置,F2移动至信号入射位置.

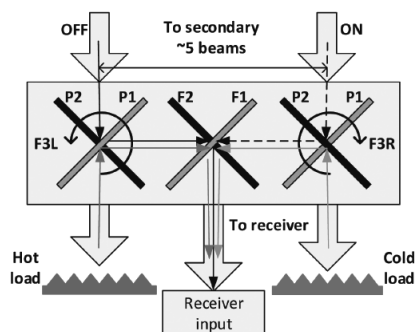


图 14 OSO 3 mm接收机波束切换原理

Fig. 14 The beam switch principle of OSO 3 mm receiver

OSO 3 mm波段接收机波束切换式双温度校准机构在冷负载设计方面与GBT 4 mm波段接收机相似, 但其将双温度负载校准与ON/OFF切换观测相结合是设计上的突破, 即该机构既可以完成冷热负载校准, 又不需要转动天线便可完成ON/OFF观测, 但观测射电源时仍然使用二次反射结构会对原始信号有相当程度的损耗, 不适合单天线观测.

5 总结

由于毫米波微波器件小型化使得噪声注入模式非常难以实现, 斩波轮技术更适用于毫米波校准, 紫金山天文台13.7 m毫米波望远镜及GBT 3 mm接收机均采用这种校准方式. ALMA通过对单、双温度负载强度校准方式精度的计算, 认为双温度负载方式有潜力实现1%的校准精度. 随着ALMA、GBT 4 mm波段接收机和OSO 3 mm波段接收机双温度负载的强度校准机构的实现, 这种方式已经越来越多应用于毫米波强度校准中. 除了强度校准的方式外, 接收机总功率终端稳定性、大气不透明度、天线效率、大气光学厚度等都会在一定程度上影响校准精度. 为了精确校准, 这些参数的获取也同样重要, 尤其是双温度负载校准方式, 需要单独测试大气不透明度, 而大气不透明度则是更高频段对精度影响最主要的因素. 中国科学院新疆天文台QTT (Qi Tai Telescope)项目的启动推动了毫米波接收机的研制, 为提高毫米波强度校准精度, 相关的技术预研已经开始.

参考文献

- [1] 杨戟. 中国科学院院刊, 2011, 26: 511
- [2] 王援朝, 刘吉盛. 电波科学学报, 1991, 6: 44
- [3] 向德琳, 黄光力. 天文学进展, 1994, 12: 259
- [4] Jewell P R. Single-dish Radio Astronomy: Techniques and Applications, 2002, 278: 313
- [5] 杨戟. 天体物理学报, 1999, 19: 55
- [6] Archibald E N, Jenness T, Holland W S, et al. MNRAS, 2002, 336: 1
- [7] Penzias A A, Burrus C A. ARA&A, 1973, 11: 51
- [8] Ulich B L, Haas R W. ApJS, 1976, 30: 247
- [9] Ulich B L. AJ, 1981, 86: 1619
- [10] Welch W J, Bock D C J, Fleming M C, et al. ASPC, 2000, 217: 309
- [11] Belitsky V, Lapkin I, Fredrixon M, et al. A&A, 2015, 580: A29
- [12] Holland W S, Robson E I, Gear W K, et al. MNRAS, 1999, 303: 659

The Amplitude Calibration of Radio Astronomy Millimeter Wave Receiver

WANG Kai^{1,2} CHEN Mao-zheng^{1,2} MA Jun^{1,2} LI Xiao-fei^{1,2} YAN Hao^{1,2}
XIANG Bin-bin^{1,2}

(1 *Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011*)

(2 *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008*)

ABSTRACT The purpose of radio astronomical amplitude calibration is to convert the response of the receiving equipment to flux density for radio sources. In usual methods of radio astronomical amplitude calibration, the centimeter wave calibration mainly uses noise injection mode, which is to inject a standard noise signal into the receiver after the feed and polarizer to calibrate inside. Due to the miniaturization of millimeter wave microwave devices, the mode of noise injection is not easy to be realized, and the injection mode may introduce noise. So BTL (Bell Telephone Laboratory) first proposed to use the chopper wheel technique for millimeter wave calibration, which is to alternately place or remove the room temperature blackbody on top of the feed of receiver for calibration. Then BIMA (Berkeley Illinois Maryland Association Array) also proposed to use room temperature and thermal load to calibrate; ALMA (Atacama Large Millimeter Array) calculated the accuracy of one or two load calibration methods, and it is considered that the two load calibration method has the potential to realize the calibration accuracy of 1%, and finally it designs the mechanical arm type calibration mechanism with two temperature load; after that, the GBT (Green Bank Telescope) 4 mm band cryogenic receiver designs rotary table of calibration mechanism with two temperature load; the latest development of 3 mm band cryogenic receiver from OSO (Onsala Space Observatory) designs the beam switching of calibration mechanism with two temperature load. The QTT (Qi Tai Telescope) project of the Xinjiang Astronomical Observatory of Chinese Academy of Sciences has promoted the development process of millimeter wave receiver. In order to improve the amplitude calibration accuracy of millimeter wave, the related pre-research has begun.

Key words telescopes, techniques: radar astronomy, methods: observational