

基于斩波轮技术的K波段接收机噪声校准研究*

王 凯^{1,2†} 王 洋^{1,2} 陈卯蒸^{1,2} 段雪峰^{1,2} 闫 浩^{1,2} 马 军^{1,2}
陈晨雨^{1,2} 曹 亮^{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 210033)

摘要 接收机是射电天文中用于探测微弱射电信号的重要接收设备. 接收机的强度校准就是将接收机对射电源的响应转换为天文意义上的流量密度. 常规方法就是使用经典的冷热负载法, 将接收机自身的强度响应转换为一个等效的温度值, 之后再据此对射电源做进一步标定. 通过搭建基于斩波轮技术的K波段接收机强度校准平台, 使用斩波轮法测试K波段常温接收机的噪声温度, 并与传统冷热负载法的测试结果进行比对. 结果显示, 在晴好天气条件下, 斩波轮法在30°、90°仰角下噪声温度的最大测试误差为7.5%和8.4%, 可以很好地应用于实际噪声温度测试中; 但在5°仰角测试中, 由于过低仰角引入了地面噪声, 使得斩波轮法的测试误差上升至20%-30%之间而无法使用. 希望在此基础上进一步开展K波段天空亮温度的理论计算与实测, 从而完善斩波轮技术的应用, 使之可以满足在不同气象条件下的噪声校准测试需求.

关键词 望远镜, 天文仪器, 技术: 斩波轮, 方法: 数据分析

中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

射电天文是利用射电望远镜系统接收、测量和分析天体无线电波以研究天体的一种手段^[1-2]. 而微波接收机是射电望远镜系统中专门用于接收射电信号的设备^[3]. 以卡塞格林式射电望远镜为例, 天体辐射的原始射电(Radio Frequency, RF)信号经天线主反射面一次反射、再经副反射面二次反射至接收机馈源处^[4], 然后经接收机的极化器(Polarizer, POL)^[5]、低噪声放大器(Low Noise Amplifier, LNA)等器件处理后传输至数据终端, 信号传输链路如图1所示.

2019-05-07收到原稿, 2019-07-23收到修改稿

*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, 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2019D01A99)资助

†wangkai@xao.ac.cn

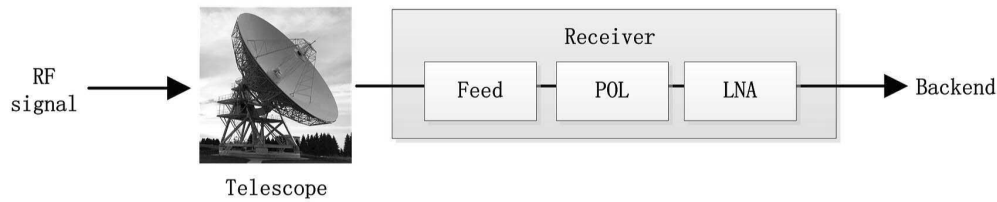


图 1 微波接收机信号传输链路

Fig. 1 Signal transmission link of microwave receiver

为了更好地开展射电天文观测,提升观测设备性能尤为关键.射电望远镜两个重要的指标是视场和接收面积:大视场可提高天线大面积巡天的观测效率,而大的接收面积则可使天线具有更高的灵敏度.

一个完整的射电望远镜系统主要由天线和接收机组成,灵敏度是射电望远镜系统最主要的技术指标,灵敏度越高,可探测微弱信号的能力就越强,而灵敏度与天线效率、接收机噪声、天线噪声、天空背景等因素相关.在现有射电望远镜口径已无法拓展的前提下,更多地采取减小接收机噪声温度的方式来提升整个射电望远镜系统的观测性能.

2 强度校准的方法

射电天文强度校准就是通过建立一个温度标尺,将接收机对射电源的强度响应等效转换为一个温度值,之后再结合天线相关参数最终将其转换为天文意义上的流量密度^[6-7].

当原始射电信号经接收机传输时,接收机自身的噪声会添加到信号中,导致无法探测微弱的信号.一般将接收机自身产生的热噪声称之为接收机等效噪声温度,也就是接收机自身的强度响应经校准后的等效温度值.噪声温度越低,意味着接收机的灵敏度越高^[8].因此,对接收机噪声温度的测试尤为重要.

众所周知,即使在同一环境、同一测试平台下对接收机射频微波器件进行测试,不同时间里都会存在一定差异.如果将实验室测试到的噪声温度直接应用于观测站的天线及接收机系统中,便会导致校准不够准确.因此,接收机强度校准更应该具备实时性.

2.1 冷热负载法

对于接收机噪声温度的测试,最常用也是最经典的方法是冷热负载法,也就是Y因子法.该方法就是使用两个不同物理温度、宽带的辐射源(比如冷、热黑体),将它们分别放置在接收机第1级放大器或者混频器的前级,使其辐射注入到接收机的馈源或者波导里.而Y因子就是当热、冷负载分别放置到馈源前级时接收机的功率响应比率,定义如下

$$Y = \frac{V_{\text{amb}}}{V_{\text{cold}}}, \quad (1)$$

其中,低温负载强度输出为 V_{cold} ,常温负载强度输出为 V_{amb} .

在冷热负载法的实际操作中,热负载一般使用常温状态下的黑体,冷负载则采用将黑体放置于盛满液氮的泡沫器皿内,以此将黑体温度降至液氮温度,将它们分别放置于

接收机馈源前级, 如图2所示, 记录对应的黑体温度和接收机功率输出, 以此便可以得出接收机等效的噪声温度.

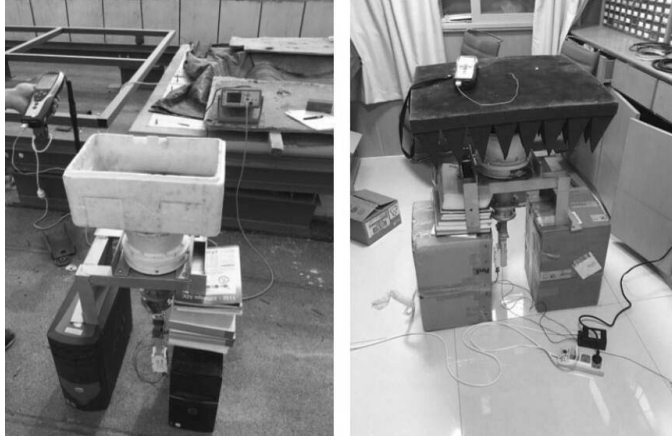


图 2 冷热负载法测试噪声温度

Fig. 2 Noise temperature test by cold and ambient load method

接收机的噪声温度 T_{Rx} 即接收机自身强度响应等效的温度值, 计算如下

$$T_{Rx} = \frac{T_{amb} - Y T_{cold}}{Y - 1}, \quad (2)$$

其中, 低温负载温度为 T_{cold} , 常温负载温度为 T_{amb} . 如果接收机没有饱和, 强度及温度响应比率将是一个较为恒定的值, 即

$$\frac{V_{amb} - V_{cold}}{T_{amb} - T_{cold}} = \frac{V_{on} - V_{off}}{T_A}, \quad (3)$$

其中, V_{on} 为天线对向射电源时的强度输出, V_{off} 为天线偏开射电源时的强度输出, 上式左边部分即为接收机强度及温度的响应比率. 应用在天线系统对射电源的观测时, 射电源等效的噪声温度 T_A 便可以由(3)式计算. 对应射电源的流量密度 S_v 为

$$S_v = \frac{2kT_A}{\eta_A A_p}, \quad (4)$$

其中, k 为玻尔兹曼常数, η_A 为天线效率, A_p 为天线孔径^[9-10].

虽然经典的冷热负载法可以准确测试接收机的噪声温度, 被认为是最好的强度校准方式, 但由于该方法无法在天线观测过程中随时进行, 特别是无法在天线仰角倾斜时为接收机提供冷负载, 故噪声温度测试一般只能在观测前将天线仰角调整到 90° , 由接收机工程师手动操作, 观测过程中则无法进行, 使用条件受限. 如何实时测试接收机的噪声温度是系统强度校准的关键, 在实现这一步后, 便可以将测试到的接收机噪声温度应用于射电观测, 从而对待观测的射电源进行进一步校准, 并最终计算出射电源的流量密度.

2.2 斩波轮法

斩波轮法是通过在馈源顶部交替引入和移除一个常温黑体,使接收机交替测试常温黑体和天空的辐射,以此测试接收机噪声温度的方法^[11-13].其原理与冷热负载法相同,只是将冷负载用冷空代替,校准时只需引入常温负载便可测试接收机的噪声温度.由此,斩波轮法的接收机噪声温度如下

$$T_{\text{Rx}} = \frac{T_{\text{amb}} - \frac{V_{\text{amb}}}{V_{\text{sky}}} T_{\text{sky}}}{\frac{V_{\text{amb}}}{V_{\text{sky}}} - 1}, \quad (5)$$

其中, V_{sky} 为天线在当前俯仰角度时对向冷空的强度输出, T_{sky} 为当前仰角下对应波段的天空亮温度值.

由于斩波轮校准简单易行,仅需在接收机馈源口面设置一个具备斩波功能的黑体,如图3所示,校准时结合对应波段不同仰角下的天空亮温度值,控制该黑体覆盖至馈源口面或者从馈源口面移除.由于大气吸收的变化可以在 T_{sky} 中得以体现,因此斩波轮方法在毫米波强度校准中被广泛应用.中国科学院紫金山天文台在青海德令哈13.7 m毫米波望远镜便采用斩波轮的方式进行强度校准.

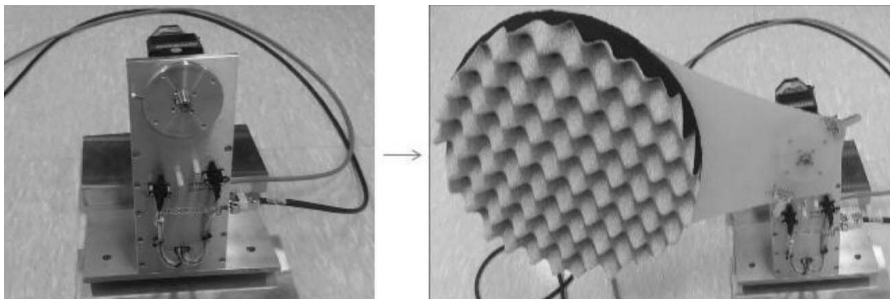


图3 斩波轮校准机构

Fig. 3 Calibration mechanism of chopper wheel

斩波轮方法的应用中最为关键的一点是需要实时了解测试波段对应的天空亮温度,即冷空负载的温度.由于天空亮温度随大气条件而变化,为了降低校准误差,该方式一般在晴朗夜空进行,因为此时天空亮温度及环境温度(常温黑体温度)均比较稳定.但如果具备实时测试天空亮温度的设备,同样可以在不同的气象条件下提供不同仰角下的天空亮温度.

对于不同波段天空亮温度的实时获取,已经有一系列理论研究^[14-16],但现有天空亮温模型在实际应用中会引入大量计算,且需要知道沿垂直方向上的气象参数分布情况,而相关参数则受制于对流层下层的地面扰动而难以准确测量.因此,在工程应用中更为行之有效的是利用地面气象参数及气象参数随垂直方向的变化规律来对天空亮温度模型进行简化.

天空亮温度的主要贡献来自大气中水汽和氧的微波热辐射,亮温理论模型如下

$$T_{\text{sky}} = \sec \theta \int_0^{\infty} a(z) T(z) e^{-\sec \theta \int_0^z a(z') dz'} dz, \quad (6)$$

其中, $T(z)$ 为大气的热力学温度, z 为垂直高度, $a(z)$ 为大气吸收系数, θ 为天顶角.

在实际工程应用中, 可利用地面气象参数(温度、气压和湿度)及对流层中气象参数的变化规律, 采用积分中值定理来近似计算天空亮温度. 首先通过地面气象参数计算出水汽和氧的吸收系数, 并沿垂直高度积分, 可以得到总天顶的吸收系数或天顶穿透率 a_0

$$a_0 = e^{-\int_0^\infty a(z)dz}, \quad (7)$$

再连同取10 km积分得到的大气温度 T_m 代入下式:

$$T_{\text{sky}} = T_m \left(1 - e^{-\sec\theta \int_0^\infty a(z)dz} \right) = T_m \left(1 - a_0^{\sec\theta} \right), \quad (8)$$

便可最终求得 T_{sky} , 但该工程方法仅适用于晴天无云或晴天卷云情况.

3 K波段斩波轮校准测试系统的组建及测试

由于斩波轮法可以在天线观测过程中对接收机进行实时的强度校准, 且比传统冷热负载法简单易行. 为此, 我们在实验室搭建K波段斩波轮校准测试系统, 并在其上开展基于斩波轮技术的K波段接收机强度校准方法研究与验证.

3.1 系统组建

首先, 组建K波段常温接收机, 接收机系统组成如图4所示. 该接收机工作频率为22-24.2 GHz, 由馈源、正交模耦合器、波导同轴转换器和低噪声放大器(噪声系数4 dB, 增益30 dB)组成. 射频信号经馈源后被正交模耦合器(OrthoMode Transducer, OMT)分离为两路左右旋圆极化信号, 之后再经波同转换后同轴输出给LNA, 最后经LNA放大后输出至功率计直接进行采集.

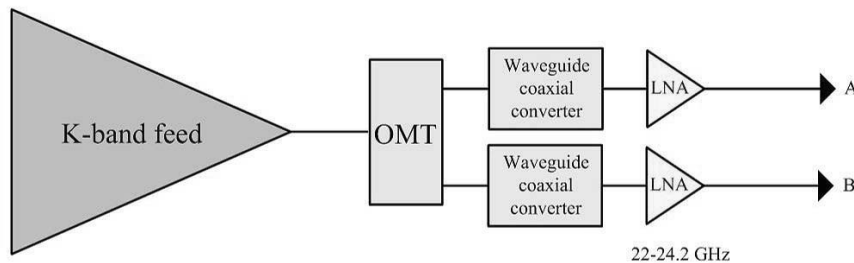


图4 K波段接收机系统组成

Fig. 4 K-band receiver system composition

K波段常温接收机实物图如图5所示. 由于K波段接收机属于短厘米波段, 微波器件尺寸较长厘米波段(例如L波段接收机)更小, 便于开展斩波轮法与冷热负载法测试结果之间的比对.

强度校准黑体选用南京科频电子科技有限公司生产的平板黑体, 该黑体采用两层设计结构, 如图6所示. 该黑体垂直入射的反射系数30 dB (@18 GHz), 35 dB (@40 GHz), 完全满足K波段的测试需求.

在SolidWorks软件下建立了K波段斩波轮校准平台模型, 如图7所示, 由K波段常温接收机、平台座架、俯仰调整机构和常温黑体斩波机构组成, 该平台可以实现K波段接

收机波束在 0° – 90° 俯仰角范围内调整, 并实现常温黑体斩波校准功能. K波段斩波轮校准平台组建后实物图如图8所示.

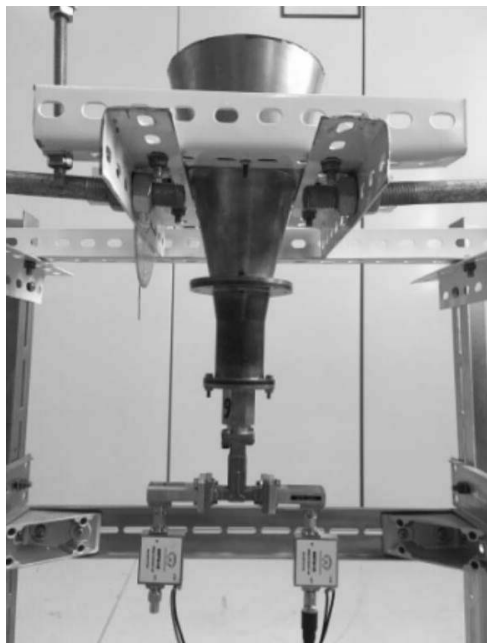


图 5 K波段接收机系统组成

Fig. 5 K-band receiver system composition

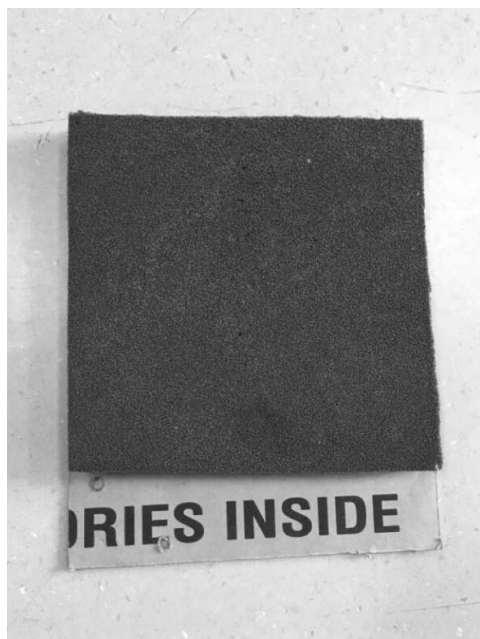


图 6 测试所用平板黑体负载

Fig. 6 Flat blackbody load for testing

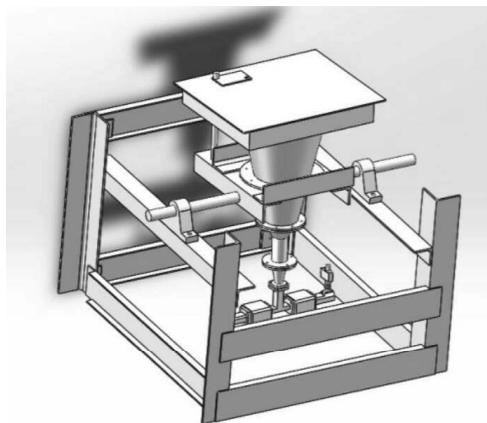


图 7 测试校准平台模型建立

Fig. 7 Establishment of test and calibration platform model

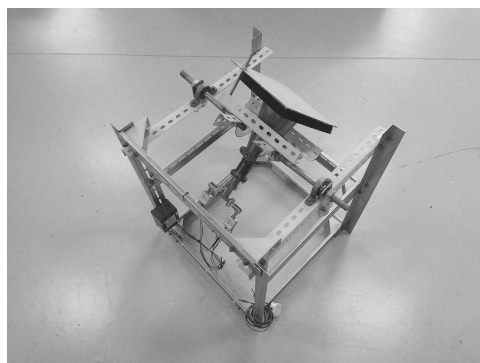


图 8 校准平台实物图

Fig. 8 Physical chart of calibration platform

3.2 K波段天空亮温度

结合南山观测站水汽辐射计在对应时段内在23.8 GHz的测试数据, 在仰角为 90° 、 30° 和 5° 时K波段天空亮温度分别取为19.2 K、31.8 K和178.8 K.

3.3 系统测试

在中国科学院新疆天文台南山观测站晴朗夜空环境下, 对K波段接收机进行冷热负载法及不同仰角下的斩波轮法噪声温度测试. 图9为在90°仰角下对K波段接收机进行冷空及常温黑体的斩波轮测试.

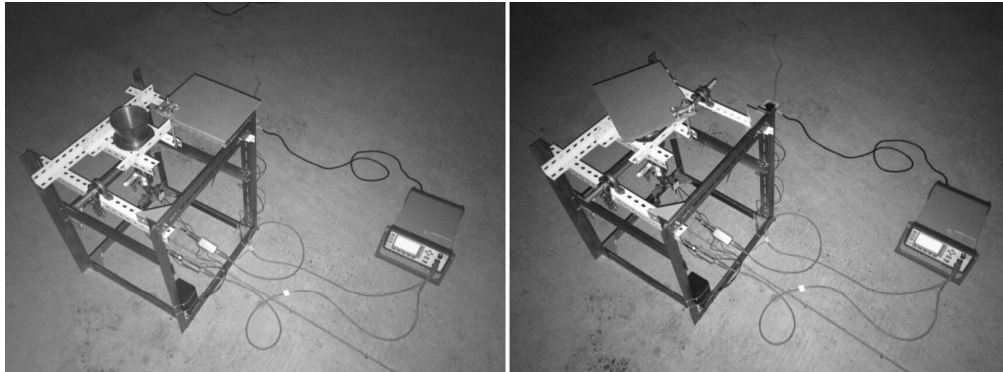


图9 90°仰角下斩波轮校准测试

Fig.9 Calibration test of chopper wheel at an elevation of 90°

由于接收机最终输出为A、B两路信号, 为了减少数据量, 本论文在此仅罗列通道A的测试数据及结果, 其中温度单位为K, 功率单位为nW, T_{r1} 为冷热负载法测试的接收机噪声温度, T_{r2} 为斩波轮法测试的接收机噪声温度, E_1 为斩波轮法与冷热负载法测试的接收机噪声温度相对误差.

在90°仰角下, 分别采取冷热负载法和斩波轮法进行5组对比测试, 通道A测试数据及对比结果如表1所示.

表1 90°仰角下的测试数据及对比结果

Table 1 Test data and comparison results at an elevation of 90°

T_{amb}	V_{amb}	T_{cold}	V_{cold}	T_{r1}	T_{sky}	V_{sky}	T_{r2}	E_1
/K	/nW	/K	/nW	/K	/K	/nW	/K	/%
293.85	134.9	75.85	103.5	642.7	19.2	94.1	614.2	4.4
293.85	134	75.85	102.7	639.4	19.2	92.7	597.3	6.6
293.85	132.7	75.85	102.4	660.9	19.2	92.5	612.8	7.3
293.85	131.2	75.85	103.1	724	19.2	93.8	669.6	7.5
293.85	130.2	75.85	101.9	709.1	19.2	92.1	644.7	8.4

在30°和5°仰角下, 分别采取冷热负载法、30°斩波轮法和5°斩波轮法进行5组对比测试, 通道A测试数据及对比结果如表2、3所示.

本论文在进行数据分析时, 将经典的冷热负载法测试到的噪声温度标定为当时真实的接收机的噪声温度, 斩波轮法测试的温度用于与冷热负载法测试的噪声温度进行比对. 在仰角为90°、30°、5°下斩波轮法进行的噪声温度测试中, 90°仰角下最大误差为8.4%, 30°仰角下最大误差为7.5%, 均完全满足强度校准测试需求(误差在10%以内);

5°仰角下误差在19.8%–28.8%之间,分析原因主要是由于在低仰角情况下,接收机不光接收的是冷空辐射,地面的噪声也会进入接收链路中.这也是K波段实际观测一般选择在射电源仰角高于20°时进行的原因.在此仅罗列5°仰角下的测试数据,在实际观测中则不会采用.

表 2 30°仰角下的测试数据及比对结果

Table 2 Test data and comparison results at an elevation of 30°

T_{amb}	V_{amb}	T_{cold}	V_{cold}	T_{r1}	T_{sky}	V_{sky}	T_{r2}	E_1
/K	/nW	/K	/nW	/K	/K	/nW	/K	/%
291.35	129.8	77.05	102.2	708	31.8	96.3	714.3	0.89
291.35	130.3	77.05	102.1	690.5	31.8	95.8	688.9	0.23
291.35	130.3	77.05	102.9	719.2	31.8	95.6	683.3	5
291.35	129.9	77.05	101.1	667.1	31.8	95.5	688.8	3.3
291.35	129.7	77.05	103.2	748.7	31.8	95.5	692.9	7.5

表 3 5°仰角下的测试数据及比对结果

Table 3 Test data and comparison results at an elevation of 5°

T_{amb}	V_{amb}	T_{cold}	V_{cold}	T_{r1}	T_{sky}	V_{sky}	T_{r2}	E_1
/K	/nW	/K	/nW	/K	/K	/nW	/K	/%
291.35	129.8	77.05	102.2	708	178.8	112.8	568	19.8
291.35	130.3	77.05	102.1	690.5	178.8	112.8	546.7	20.8
291.35	130.3	77.05	102.9	719.2	178.8	112.2	518.9	27.9
291.35	129.9	77.05	101.1	667.1	178.8	111.8	516.4	22.6
291.35	129.7	77.05	103.2	748.7	178.8	112	506.3	28.8

4 总结

本论文通过组建K波段常温接收机及噪声校准测试平台,在其上开展了斩波轮法的测试研究.通过与冷热负载法的实测结果相比对,得出斩波轮法在90°、30°仰角下的最大测试误差分别为8.4%和7.5%,完全可以满足噪声校准的测试需求;但在5°的低仰角下,由于引入了地面噪声,使得误差上升至20%–30%之间而无法使用.斩波轮法的不足之处在于需要在晴好天气下进行,当天气情况快速变化时,由于无法实时获取准确的天空亮温度而无法精确定标.本论文也希望在此基础上进一步开展K波段天空亮温度的理论计算与实测,从而完善斩波轮技术的应用,使之可以满足在不同气象条件下的噪声校准测试需求.

参 考 文 献

- [1] 杨戟. 中国科学院院刊, 2011, 26: 511
- [2] 王娜. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44: 783
- [3] 陈卯蒸, 刘奇, 马军, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2017, 47: 059504
- [4] 项斌斌, 王从思, 王伟, 等. 系统工程与电子技术, 2018, 40: 489
- [5] 陈卯蒸, 马军, 覃律, 等. 电子科技大学学报, 2018, 47: 178
- [6] 王凯, 陈卯蒸, 马军, 等. 天文学报, 2018, 59: 42
- [7] Jewell P R. *Single-dish Radio Astronomy: Techniques and Applications*, 2002, 278: 313
- [8] 陈勇, 孙正文, 袁建平, 等. 天文研究与技术, 2012, 9: 129
- [9] 杨戟. 天体物理学报, 1999, 19: 55
- [10] Archibald E N, Jenness T, Holland W S, et al. *MNRAS*, 2002, 336: 1
- [11] Penzias A A, Burrus C A. *ARA&A*, 1973, 11: 51
- [12] Ulich B L, Haas R W. *ApJS*, 1976, 30: 247
- [13] Ulich B L. *AJ*, 1981, 86: 1619
- [14] 陈向东, 张祖荫, 林士杰, 等. 华中工学院学报, 1985, 13: 105
- [15] 桂良启, 张祖荫, 郭伟. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33: 73
- [16] 劳保强, 王锦清, 王俊义, 等. 中国科学院上海天文台年刊, 2014: 21

Research on K-band Receiver Noise Calibration Based on Chopper Wheel Technology

WANG Kai^{1,2} WANG Yang^{1,2} CHEN Mao-zheng^{1,2} DUAN Xue-feng^{1,2}
YAN Hao^{1,2} MA Jun^{1,2} CHEN Chen-yu^{1,2} CAO Liang^{1,2}

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

(2 *Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210033*)

ABSTRACT The receiver is an important device for detecting weak radio signals in radio astronomy. The amplitude calibration of the receiver is to convert the response of the receiver for radio source into the flux density in astronomy. The conventional method is to convert the amplitude response of the receiver itself into an equivalent temperature value using the classical cold and ambient load method, and then further calibrate the radio source. The K-band receiver amplitude calibration platform based on the chopper wheel technology is built, and the noise temperature of the K-band normal temperature receiver is tested by the chopper wheel method, and compared with the test results of the conventional cold and ambient load method. From the results, under the fine weather conditions, the maximum test error of the noise temperature at the 30° and 90° elevation is 7.5% and 8.4%, which can be well applied to the actual noise temperature test; but at the 5° elevation test, the ground noise was introduced due to the low elevation angle, so the test error of the chopper wheel method was increased to about 20%–30% and could not be used. This paper also hopes to further develop the theoretical calculation and actual measurement of the K-band sky brightness temperature on this basis, so as to improve the application of the chopper wheel technology, so that it can satisfy the noise calibration test requirements under different meteorological conditions.

Key words telescopes, astronomical instrumentation, techniques: chopper wheel, methods: data analysis