

TM65 m射电望远镜Ku、K、Ka和Q频段天线性能测量*

王锦清^{1,2,3†} 虞林峰^{1,2} 蒋甬斌^{1,2} 赵融冰^{1,2} 孙正雄^{1,2}
李 斌^{1,2} 仲伟业^{1,2} 董 健^{1,2} MICHAEL Kesteven¹ 夏 博^{1,2}
左秀婷^{1,2} 苟 伟^{1,2} 郭 文^{1,2} 陆雪江^{1,2} 刘庆会^{1,2} 范庆元^{1,2}
蒋栋荣^{1,2} 钱志瀚^{1,2}

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)

(2 中国科学院射电天文重点实验室 南京 210008)

(3 上海市空间导航与定位技术重点实验室 上海 200030)

摘要 讨论了TM65 m射电望远镜Ku、K、Ka和Q 4个高频段天线效率、灵敏度以及系统噪声温度的性能测量工作. 首先介绍了TM65 m接收系统4个高频段的关键指标, 接着对测量工作中需要注意的方面进行了论述, 主要包括望远镜指向和副面位姿模型的构建、噪声源的定标以及大气的影响. 最后给出了TM65 m在这4个频段的效率、灵敏度以及系统噪声温度的实测结果. 测量结果表明: 在最佳俯仰角 45° – 65° 范围内, Ku、K、Ka和Q 4个波段天线效率均可以达到约50%, 而在较高和较低的俯仰角上, 由于主面变形的缘故, 效率有明显的下降现象. 当俯仰角为 50° 左右时, 4个波段的灵敏度分别为38 Jy、120 Jy、200 Jy和110 Jy.

关键词 大气效应, 望远镜, 技术: 雷达天文, 宇宙背景辐射, 方法: 观测

中图分类号: P111; **文献标识码:** A

1 概述

上海天马65 m射电望远镜(简称TM65 m)是目前国内口径最大的实面全可动射电望远镜, 其工作波段覆盖L、S、C、X、Ku、K、Ka及Q 8个波段, 基本覆盖50 GHz以下70%频率范围, 也是目前国内波段最全的射电望远镜. 该射电望远镜采用卡塞格林式天线结构, 主面直径65 m, 具有主动面系统, 用于高频观测时补偿主面面形的重力变形. 副面直径6.5 m, 安装于一六杆机构平台上, 可以根据不同的俯仰角度调整副面姿态, 以补偿由于重力和撑腿形变导致的副面相对主面的位姿变化. 当前, 该天线已经配备了所

2016-12-21收到原稿, 2017-01-22收到修改稿

*国家自然科学基金项目(11303076、U1531135)资助

[†]jqwang@shao.ac.cn

有波段的致冷接收机, 其中S/X和X/Ka为双频馈源, K和Q为双波束馈源, 其余均为单频馈源.

关于射电法测量天线的效率和灵敏度的方法以及TM65 m上L、S、C、X 4个低频段的性能情况已经有过报道^[1-4], 这里不再赘述. 本文主要针对Ku、K、Ka和Q 4个高频段的性能测量工作和测量结果进行阐述, 涉及这4个频段的设计指标、实测情况, 以及测试过程中需要注意的方面.

天线效率和灵敏度是射电望远镜的两项关键指标. 影响抛物面天线效率的关键因素主要有: 天线口面的照明设计、天线面精度误差、副面及其撑腿等遮挡、对焦误差、天线的指向误差、天线面的欧姆损耗以及周围的噪声情况. 在射电天文领域, 天线的灵敏度通常采用系统等效流量密度(system equivalent flux density, SEFD)来衡量, 定义为系统噪声温度和单位流量天线温度(degrees per flux unit, DPFU)的比值. 因此, 灵敏度的提高可以通过降低系统噪声温度来实现, 也可以通过提高单位流量天线温度来实现.

本文先给出了TM65 m上述4个波段的设计指标, 见表1; 然后论述了在这4个频段上进行性能测试的准备工作, 这主要包括对焦和指向模型以及大气亮温辐射等方面; 最后给出了TM65 m射电望远镜这4个频段的实际测试情况, 并对测量的性能进行了一定的分析.

表 1 Ku、K、Ka和Q频段关键设计指标
Table 1 The critical design indicators of the Ku, K, Ka, and Q bands

Parameter	Band			
	Ku	K	Ka	Q
Frequency range/GHz	12–18	18–26.5	30–34	40–46
Number of beam	1	2	1	2
Noise temperature of receiver/K	15	20	30	30–45
Noise temperature of system/K	27	46	60	66–108
Efficiency of the antenna/%	40	20 ^a	50 ^b	45 ^b

^a When the active surface is not enabled and surface flatness is better than 0.6 mm;

^b When the active surface is enabled and surface flatness is better than 0.3 mm.

2 性能测试准备工作

在进行高频段性能测试前, 必须先要实现良好的主面面形精度, 并使副面准确对焦, 即对副面模型进行准确的测定, 使之在各个方位、俯仰位置上都工作在最佳位姿; 然后开启副面模型进行指向模型测定, 以保证天线的指向误差好于1/10波束宽度. 此外, 需要准确的噪声源定标值, 否则测量所得系统噪声温度和效率就会有系统性偏差; 最后对于大气亮温也要有大致合理的估计.

2.1 对焦、指向和主面误差

对焦和指向校准是对天线机械方面的系统性偏差进行校准, 我们可以选取一个频段进行精细的建模工作. 由于接收机馈源安装的位置差异, 在不同的馈源切换到工位时,

副面模型和指向模型依然会有一个固定的偏差值,但是在特定的接收机上这个偏差值是不变的.我们可以在前面建模的基础上检测这个偏差,然后作为特定接收机的模型进行偏差置入,也可以重新调节馈源的安装位置,使其位于工位时相心一致,但是这个工作并不容易,除非馈源的安装机构可以灵活调节且可提供足够的刚度和稳定性.在TM65 m上的实践表明,前一方法更为有效可行.

我们对副面的 X 、 Y 、 Z 方向位姿进行建模^[5],定义 X 方向为俯仰轴方向, Y 方向为垂直 X 方向,而 Z 方向为光轴方向.从拟合误差最小化出发,对 X 和 Y 方向模型构造采用傅里叶函数,与传统的副面模型相比,它的拟合误差更小, Z 方向依然采用传统模型构造.模型系数拟合误差好于1 mm,见表2,表中 A 、 B 、 $\cdots$ 、 H 为模型系数; ω_X 、 ω_Y 分别为拟合的圆周频率.此外,对 X 和 Y 方向单位位置偏移引起指向偏差进行了精细测量,并进行模型化,与之前传统的方法(采用比例常数)相比,也更加准确,见表3,表中 Ω_X 、 Ω_Y 分别表示单位毫米副面移动引起的指向偏差; $p1$ – $p6$ 为指向补偿系数.表2–3中俯仰角 el 的单位均为弧度.

表 2 副面模型的各项系数及其误差
Table 2 Parameters and their errors of the sub-reflector model

Shift in X direction/mm	$dX = A + B \cos(\omega_X \times \text{el}) + C \sin(\omega_X \times \text{el})$						$\omega_X=3.797$	
Shift in Y direction/mm	$dY = D + E \cos(\omega_Y \times \text{el}) + F \sin(\omega_Y \times \text{el})$						$\omega_Y=3.032$	
Shift in Z direction/mm	$dZ = G + H \sin \text{el}$							
Parameter	A	B	C	D	E	F	G	H
Value	−0.45	−0.06	−0.03	10.10	13.65	16.42	−29.61	32.86
Error	0.11	0.16	0.12	0.62	0.76	0.78	0.52	0.71

表 3 指向补偿系数及其误差
Table 3 Parameters and their errors of the pointing compensation

$\Omega_X / ''$		$p4 + p5 \cos el + p6 \sin el$					
$\Omega_Y / ''$		$p1 + p2 \cos el + p3 \sin el$					
Parameter	$p1$	$p2$	$p3$	$p4$	$p5$	$p6$	
Value	3.02	1.52	2.95	6.87	−0.50	−0.24	
Error	0.18	0.18	0.18	0.09	0.10	0.09	

在副面随动时,在Ku波段13.5 GHz进行指向测试和拟合,采用十字扫描方法进行单点指向偏差检测,模型拟合采用22参数,与传统的8参数模型相比,可以获得更小的拟合残差;模型代入后,经过检测,误差大约为8''(指RMS, root mean square),这一精度对Ku波段尚可胜任;而在Ka波段上盲指1/10波束宽度为4''左右,因此当前的误差是不可接受的.为了解决这一问题,对Ka波段和Q波段我们均采用预扫描附近强源的方法,准实时修正指向误差,通过该手段,我们预计可以达到好于5''(接近4'')的指向误差.

对于K和Q两个双波束频段,我们设置同一波段采用相同的副面模型,安装时使两波束相心连线平行于俯仰轴,两波束的俯仰偏差相同,而方位偏差只是一个固定常数.

此外,我们采用俯仰角 53° 上的同步卫星信标信号,采用相位干涉微波全息法结合主动面调整,使系统主面精度达到了0.3 mm (RMS).

2.2 大气的影响

频率接近22.3 GHz水分子吸收线频率时,大气亮温会明显上升,这将导致系统噪声温度的显著恶化,这在Ku波段上端和K波段以及Ka波段的下端变得十分明显,图1给出了上海地区大气亮温随频率和天顶角的变化情况.

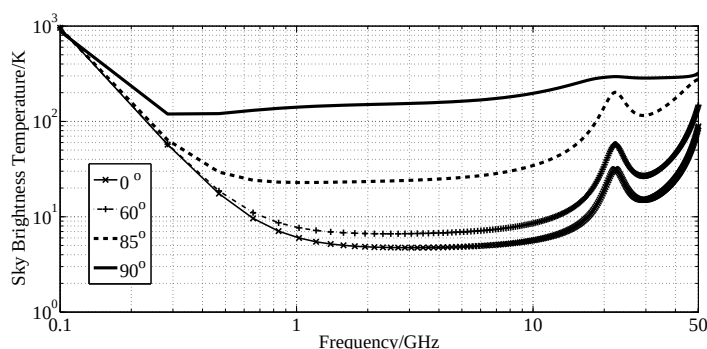


图 1 上海地区大气亮温随天顶角的变化

Fig. 1 The changes of Shanghai atomospheric brightness temperature with zenith angle

黑体的辐射温度与辐射频率相关^[6],严格的噪声标定式为采用近似算法的误差公式(详见(1)–(2)式),可用于高频测量时的校正.

$$T_N = \frac{hf}{k(e^{\frac{hf}{kT}} - 1)}, \quad (1)$$

$$T_C = T - \frac{hf}{k(e^{\frac{hf}{kT}} - 1)}, \quad (2)$$

其中 f 为频率; h 为普朗克衡量 6.6262×10^{-34} J·s; k 为玻尔兹曼常数 $1.3806488 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹; T_N 为与频率相关的黑体辐射温度; T 为物理温度; T_C 为近似算法的误差.

随着频率的上升, T_C 误差将加大(T_C 定义详见(2)式), 参见图2. 在X频段8 GHz以下时, 误差只有0.2 K左右, 只有在系统噪声温度本身很低(几K量级)或高精度测量时需要予以考虑, 而到Q频段43 GHz时, 这个误差为1 K左右.

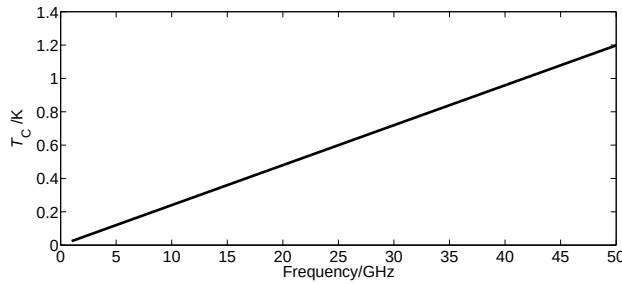


图2 噪声温度近似算法误差随频率变化情况

Fig. 2 Approximation algorithm error of noise temperature vs. frequency

大气不透明度的算法可以归结为对系统噪声温度随俯仰角的拟合^[7], 如(3)式所示:

$$T_{\text{sys}} - T_{\text{spill}} = T_{\text{rec}} + T_{\text{atm}} (1 - e^{-\tau_0 \text{airmass}}), \quad (3)$$

式中 T_{sys} 为系统噪声温度; T_{rec} 为接收机噪声温度; T_{spill} 为从后瓣和旁瓣进入的地面辐射, 一般小于几K; T_{atm} 为大气绝对物理温度, 在粗略情况下, 取 -15°C 为高层大气的平均温度; τ_0 为天顶方向大气不透明度(又称光深), 在精确情况下, 需要模型代入; airmass表示大气的归一化厚度, 取 $\text{airmass} = 1/\sin \text{el}$. 在厘米波段, 当 τ_0 很小的情况下, 对上式进行泰勒展开, 并取第1项, 且认为 T_{spill} 近似为0, 则可以用如下(4)式进行近似:

$$T_{\text{sys}} \approx T_{\text{rec}} + T_{\text{atm}} \frac{\tau_0}{\sin \text{el}}. \quad (4)$$

在 T_{atm} 已知的情况下, 通过一组不同俯仰角上的 T_{sys} , 可以拟合出 T_{rec} 和 τ_0 .

当频率上升至毫米波段时, 采用非线性拟合将更加真实地获得 τ_0 . 表4给出了线性拟合和非线性拟合的情况. 图3中给出了不同 τ_0 时, (3)式完全模型和(4)式近似模型之差随俯仰角的变化, 可以看到, 当 τ_0 大于0.1时, 在低仰角上近似模型计算得到的 T_{sys} 明显比实际值偏大, 因此在高频段时, 我们采用了非线性拟合方法以获得 τ_0 , 这是因为在毫米波段随着 τ_0 的增大, 上述近似的线性拟合误差将增加, 而采用非线性拟合可以很好地获得 τ_0 和 T_{rec} . 在高频段大气的影响更加剧烈, 每隔20 min左右进行天线倾斜观测, 以获取尽量实时的 τ_0 , 然后对中间时间的数据进行内插修正.

表4 线性拟合和非线性拟合比较

Table 4 The comparison between linear and nonlinear fittings

Method	Ku		Ka	
	T_{rec}	τ_0	T_{rec}	τ_0
Linear fitting	17.93	0.0324	40.0	0.1013
Nonlinear fitting	17.15	0.0352	27.5	0.1467
Error of linear fitting/%	4.3	8.6	31.3	44.8

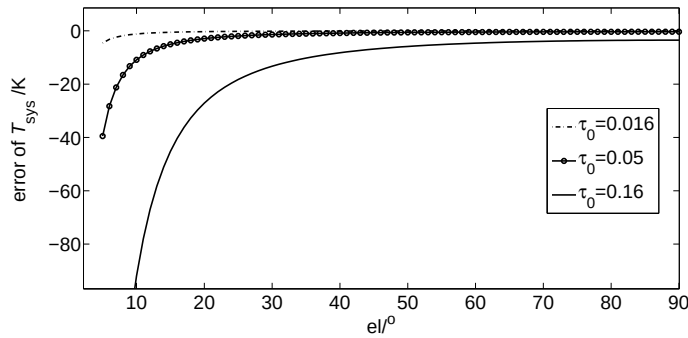


图 3 不同的大气不透明度情况下, 近似模型和完全模型对系统噪声温度测量的差异

Fig. 3 The differences of the approximate model and full model in the system noise temperature measurement with different atmospheric opacities

2.3 噪声源标定

系统噪声温度测量通常采用 Y 因子法, 即先对系统输入一个已知噪声温度的白噪声信号, 得到一个输出功率; 再让天线对向冷空, 得到第2个输出功率; 两者的比值即为 Y 因子, 通过 Y 因子可以计算出系统噪声温度. 通常定标值是在实验室采用冷(液氮温度77 K)热(常温300 K)负载法定标的, 偏差约1–2 K. 为了更准确地确定噪声定标值, 可以在接收机安装到天线上后, 采用冷空和常温负载构成的 Y 因子法校核实验室的噪声定标值. 由于冷空的温度比77 K更低, 因此该 Y 因子比实验室采用液氮冷负载定标时的 Y 因子更大, 当达到8 dB以上时, 标定误差会很小. 采用常温 T_{300} 和冷空两个负载获得 Y 因子后, 包含大气的系统噪声温度可以表示如下:

$$T_{\text{sys}} = \frac{T_{300}}{Y} + \frac{T_R + T_{\text{feed}}}{Y}, \quad (5)$$

其中 T_{300} 为常温负载的物理温度; $T_R + T_{\text{feed}}$ 为接收机和馈源实验室测量值, 允许带有一定的误差. $T_R + T_{\text{feed}}$ 有一定偏差, 对 T_{sys} 值有一定影响, 但是如 Y 因子8 dB以上时, 这种误差将被弱化7倍以上. 通常实验室的标定误差为1–2 K左右, T_{300} 值是黑体的物理温度, 采用温度计测量普遍可以精确到0.5°以内, 由此可以估算 T_{sys} 的实际测量偏差大约只有0.2 K左右. 但是当 Y 因子下降至小于4 dB时, T_{300} 和 $T_R + T_{\text{feed}}$ 的误差同样影响较大. 所幸的是: 射电天文普遍采用致冷接收机, TM65 m的上述4个频段上, Y 因子普遍可以达到8 dB以上, 因此采用常温和冷空 Y 因子法测量系统温度具有很高的准确度.

图4给出了Ku波段左右旋噪声定标值、实验室标定和天线上标定的偏差分布, 其中LCP和RCP分别为左右旋天线标定; LCP-Lab和RCP-Lab分别为左右旋实验室标定; 图中约1.3 GHz处有部分无线电干扰. 可以看到: 随频率的变化, 两种方法获得的 T_{cal} 趋势完全一致, 在低频处, 两种标定结果符合度更好些, 17 GHz以下差异小于5% (注意: 13 GHz处有干扰信号); 随着频率的升高, 标定偏差逐渐增大, 在17 GHz以上偏差变大. 这种偏差主要源于现场测量 Y 因子时, 在高频处 Y 因子明显下降, 参见图5, 这主要是由于频段接近22.3 GHz大气水分子吸收线, 大气亮温上升导致. 从图1可以看到, 在天顶方向(天顶角为0°), 从12 GHz到18 GHz, 大气亮温从6 K上升到了将近20 K, 因此在高频端

采用实验室定标值具有相当的可信度.

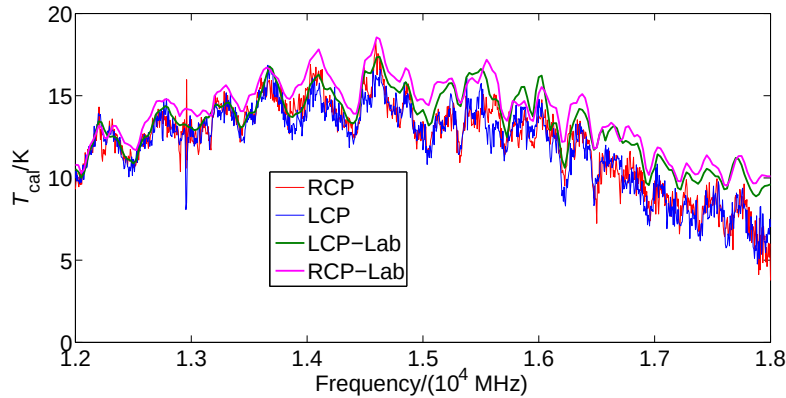


图4 T_{cal} 实验室标定和现场标定

Fig. 4 The T_{cal} calibration in laboratory and field

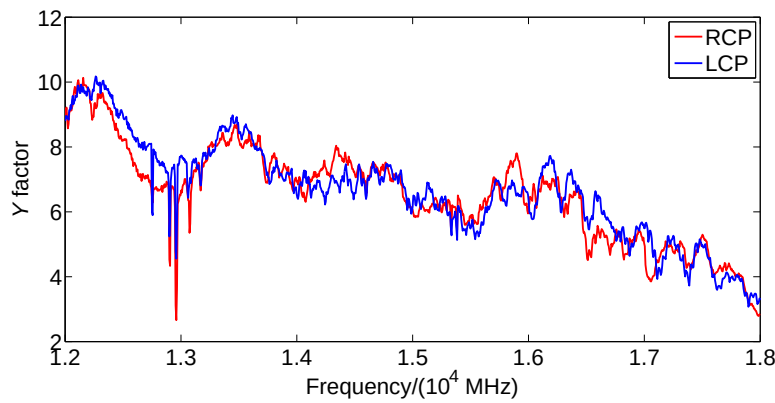


图5 现场定标Y因子

Fig. 5 The Y factor calibrated in the field

2.4 射电源选择

为了尽量避免温度等环境因素对天线性能测量的影响, 我们选择晴朗的夜晚, 在Ku波段采用3C286、3C123等标准流量射电源, 在K和Ka波段采用了DR21为校准射电源. 这些校准源在10–36 GHz上的辐射流量^[8–12]曲线见图6. Q波段则采用NGC 7027和3C273^[13]为校准源, 利用该流量值和前述噪声定标值, 在整个俯仰角范围内对4个波段的左右旋接收链路进行天线效率、灵敏度和系统噪声温度测量.

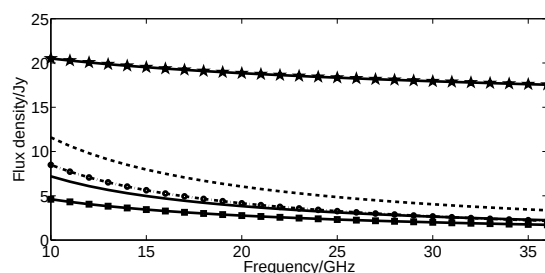


图 6 校准射电源的流量密度

Fig. 6 Flux densities of the calibrated radio sources

3 天线性能测试

3.1 观测模式设计

在测试过程中, 我们需要设计天线的扫描方式, 见图7. 先采用十字扫描法(AZ scan和EL scan)进行指向误差确认, 以保证测量过程中指向误差控制在1/10波束以内; 然后控制天线指向射电源(OnSource)、偏开射电源(OffSource)和开启噪声源(Noise cal ON), 以实时收集积分功率值. 在指向偏差较大的情况下, 可以采用实时修正指向再次测量, 也可以对功率随时间的变化曲线采用高斯拟合, 然后对指向偏差对应的功率下降进行事后补偿. 在K、Ka和Q波段, 由于大气短时变化很大, 需要实时测量大气不透明度. 具体的手段是采用每15 min进行一次天线倾斜观测. 在倾斜过程中噪声源启动周期模式, 用于快速测量高低俯仰角上的系统温度, 然后对俯仰角和系统噪声温度进行拟合处理, 得到天顶方向光深值, 并用于不同俯仰角上效率曲线的修正.

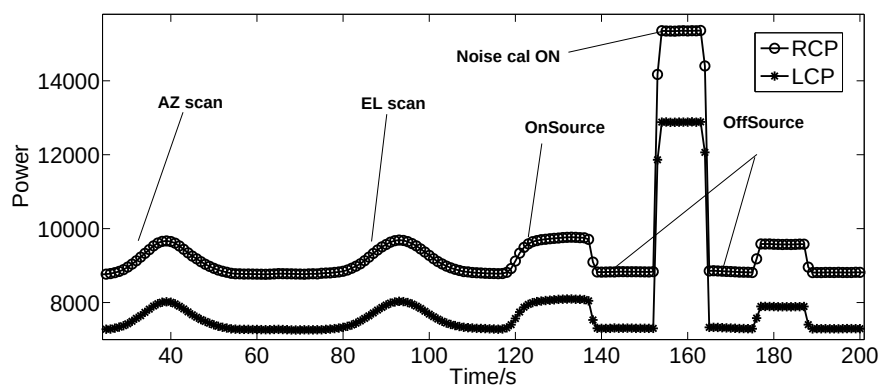


图 7 测试记录

Fig. 7 Test record

3.2 天线效率测量

在天线效率测量过程中, 我们选用3C286和3C123等校准射电源^[9-11], 这些源

在Ku波段的流量密度都在3 Jy以上; 在Ka波段采用DR21^[12,14], 该源的流量密度达到15 Jy以上. 这些源都是致密源, 角径小、流量稳定且可以由模型计算. 为了得到整个俯仰角范围内的效率、灵敏度和系统噪声温度, 需要在多个仰角位置进行多次测量. 图8-11分别给出了上述4个波段的效率随仰角的变化情况. 可以看出: 尽管开启了副面模型, Ku和Ka波段天线效率随仰角的变化十分明显, 这主要是因为主面的重力变形对这两个波段影响异常明显. 图8表明: 在Ku波段上, 俯仰角10°以下和85°以上效率下降为原来的25%–30%左右, 高俯仰角上恶化更加严重. 在Q波段上, 俯仰角10°以下和80°以上效率下降至原来的10%左右, 见图11. 表5给出了4个波段的归一化效率曲线, 以及测试的频率、DPFU以及绝对效率和最佳俯仰角度.

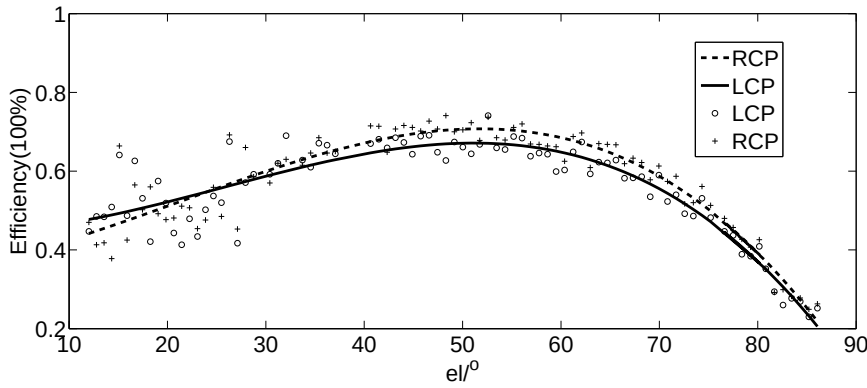


图 8 Ku波段效率测试@3C286, 15.6 GHz, 20 MHz带宽

Fig. 8 The efficiency test of Ku band @3C286, 15.6 GHz, 20 MHz bandwidth

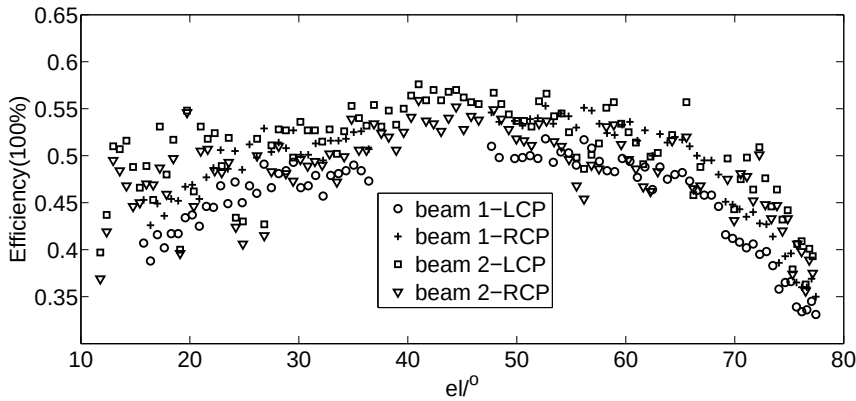


图 9 K波段双波束效率测试@DR21, 19.45 GHz, 20 MHz带宽

Fig. 9 The dual beam efficiency test of K band @DR21, 19.45 GHz, 20 MHz bandwidth

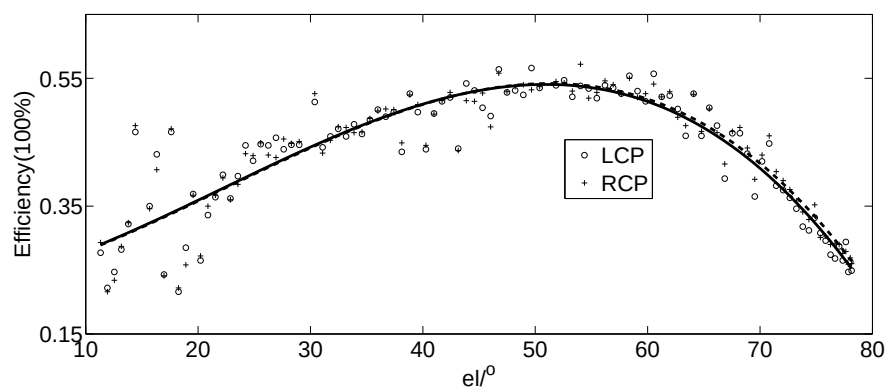


图 10 Ka波段效率测试@DR21, 31.1 GHz, 20 MHz带宽

Fig. 10 The efficiency test of Ka band @DR21, 31.1 GHz, 20 MHz bandwidth

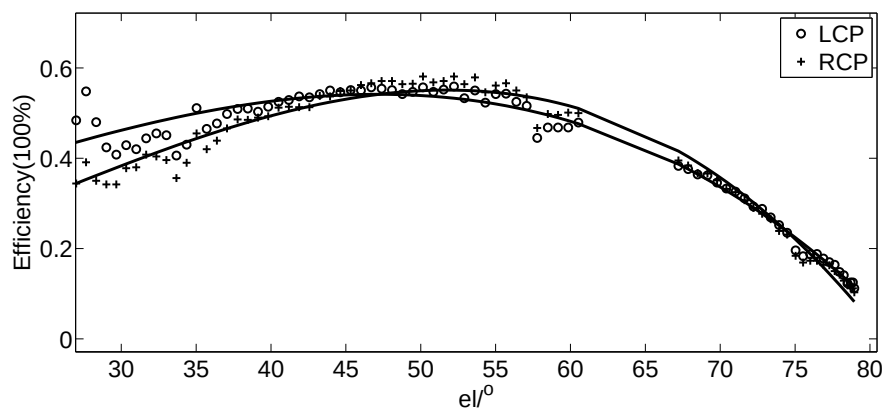


图 11 Q波段波束2效率测试@NGC7027, 43 GHz, 20 MHz带宽

Fig. 11 The beam2 efficiency test of Q band @NGC7027, 43 GHz, 20 MHz bandwidth

表 5 Ku、K、Ka、Q波段副面随动时性能

Table 5 The performance of Ku, K, Ka and Q bands with sub-reflector model

Band	Frequency /MHz	DPFU /(K/Jy)	Efficiency maximum	$el/^\circ$	Normalization Polynomial ($a el^3 + b el^2 + c el + d$)			
					a	b	c	d
Ku	15600	0.807	0.67	50.877	-5.13×10^{-6}	3.9693×10^{-4}	-3.89840×10^{-4}	0.6673468
K1	19450	0.671	0.56	49.266	-4.03×10^{-6}	3.5360×10^{-4}	-0.00534241	0.88706250
K2	19450	0.663	0.55	48.58	-3.38×10^{-6}	2.5645×10^{-4}	-0.00101342	0.83124121
Ka	31100	0.653	0.54	48.937	-6.35×10^{-6}	2.6943×10^{-4}	0.01925549	0.15628293
Q1	41000	0.639	0.53	48.572	-5.68×10^{-6}	1.9052×10^{-4}	0.02196677	0.13430961
Q2	43000	0.662	0.55	51.531	-1.04×10^{-5}	7.4671×10^{-4}	0.00631029	0.11507907

3.3 灵敏度测量

图12–15给出了4个波段的SEFD测试情况, 在低仰角处, 由于系统温度的上升占主导因素, SEFD将变大(即灵敏度下降); 而在高仰角处, 由于效率下降占主导因素, 同样导致了SEFD变大. 在俯仰角为 40° – 70° 范围内, 4个波段的SEFD分别为38 Jy、120 Jy、200 Jy和110 Jy左右.

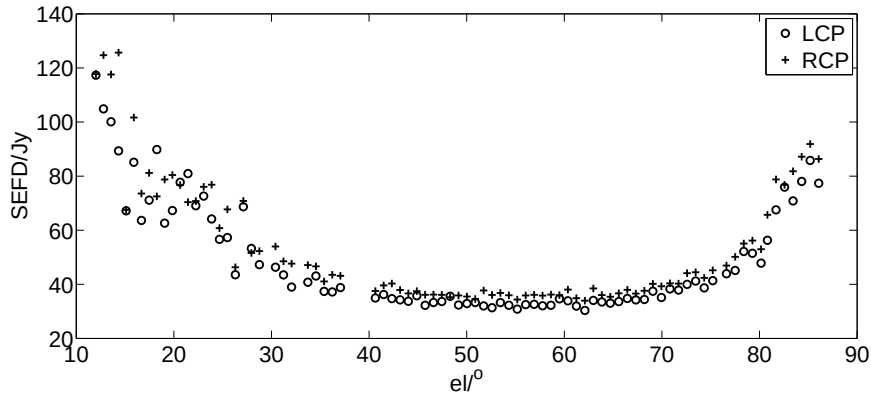


图 12 Ku波段SEFD测试@3C286, 15.6 GHz, 20 MHz带宽

Fig. 12 The SEFD test of Ku band @3C286, 15.6 GHz, 20 MHz bandwidth

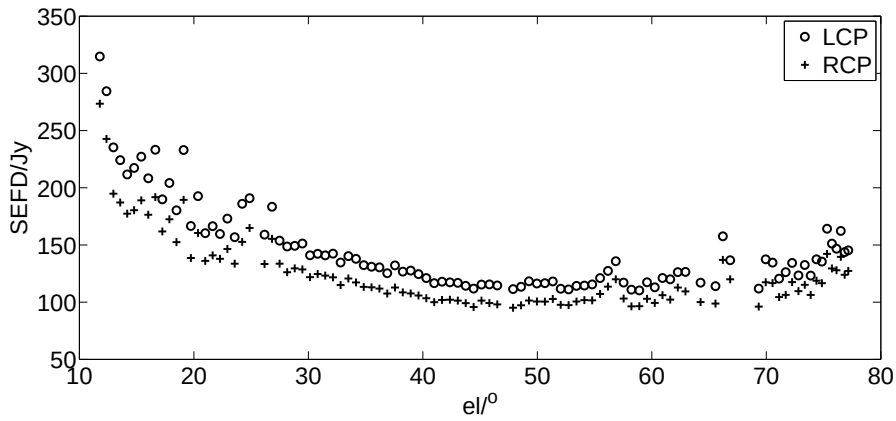


图 13 K波段波束2 SEFD测试@DR21, 19.45 GHz, 20 MHz带宽

Fig. 13 The beam2 SEFD test of K band @DR21, 19.45 GHz, 20 MHz bandwidth

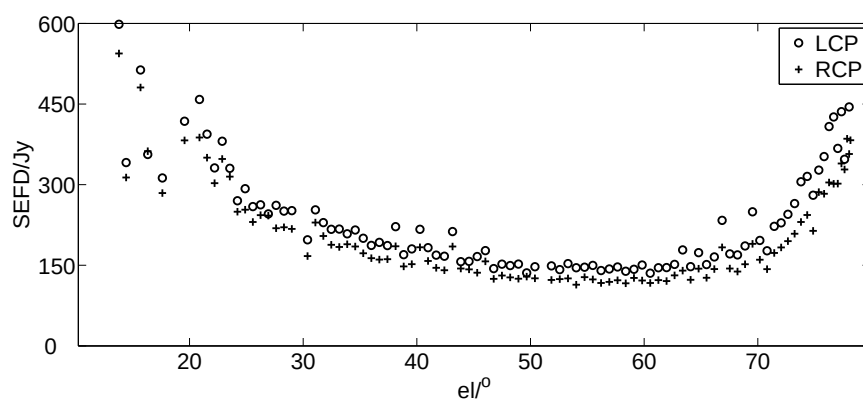


图 14 Ka波段SEFD测试@31.1 GHz, 20 MHz带宽

Fig. 14 The SEFD test of Ka band @31.1 GHz, 20 MHz bandwidth

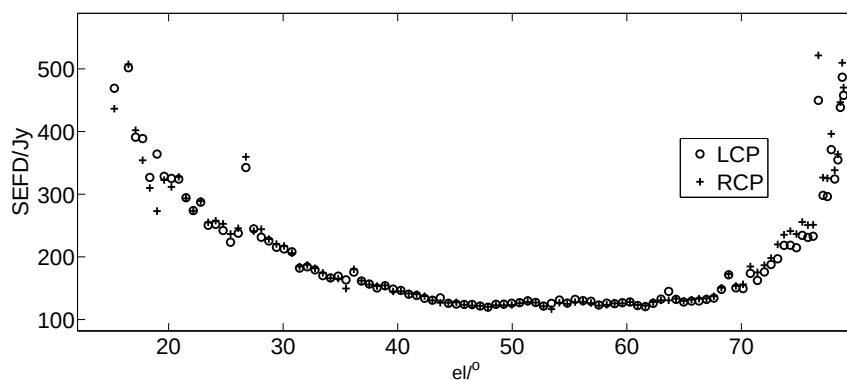


图 15 Q波段波束1 SEFD测试@41 GHz, 20 MHz带宽

Fig. 15 The beam1 SEFD test of Q band @41 GHz, 20 MHz bandwidth

3.4 接收机及系统噪声温度测量

图16–19分别给出了4个频段接收机左右旋噪声温度以及包含大气的系统噪声温度实际测试结果, 其中图18中横坐标为中频频率, 各个波段的测试带宽均为20 MHz, 测试频率依次为15.6 GHz、19.45 GHz、31.1 GHz以及43 GHz. 图16表明: 在Ku波段12–18 GHz, 接收机噪声温度平均在8–10 K, 频段两端略高, 为10–12 K; 16 GHz以下平均系统噪声温度约42 K; 从16.5 GHz往上开始明显抬升, 到18 GHz时达到90 K左右, 这主要来源于大气亮温辐射的上升. 图17给出了K波段两个波束接收机左右旋的噪声温度和系统噪声温度结果. 4个通道接收机的噪声普遍在20 K左右, 系统噪声为40–75 K, 最大噪声在22.3 GHz附近的水分子吸收线上; 另外, 在24.3 GHz处, 波束1的左旋有一个明显的噪声恶化频带, 这主要是由于该通道的放大器恶化所致. 图18为Ka波段接收机和系统噪声温度, 在30–34 GHz (对应中频4–8 GHz)接收机的平均噪声温度为30 K左右, 系统噪声温度基本在55–60 K之间. 图19给出了Q波段双波束4个通道的接收机和系统噪声温

度, 在39–47 GHz频率范围内, 接收机噪声温度普遍在30–40 K之间, 系统噪声温度50–90 K之间, 系统噪声温度的升高主要是由于频率高端接近氧分子吸收线60 GHz. 当然, 4个波段系统噪声温度的测量与天气情况有很大的依赖关系, 晴朗天气测试与云层很厚的阴天测试在天顶方向可能相差20 K以上. 图20给出了3个波段全俯仰角上的左右旋系统噪声温度, 比较可以看到, Ku波段在高低俯仰上的系统噪声温度落差在45 K左右, 而Ka波段的系统噪声落差达到100 K以上, 因此频率越高, 高低俯仰角上系统噪声变化也越大, 拟合得到的天顶方向大气不透明度也越大.

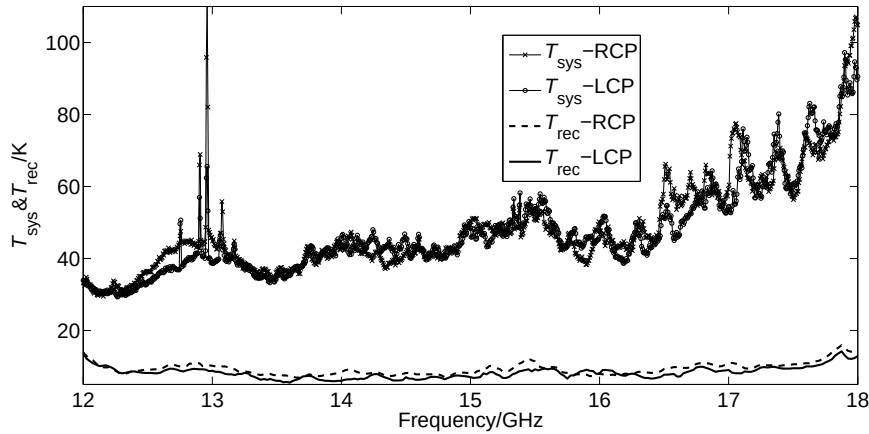


图 16 Ku波段接收机和系统噪声温度

Fig. 16 The receiver and system noise temperature of Ku band

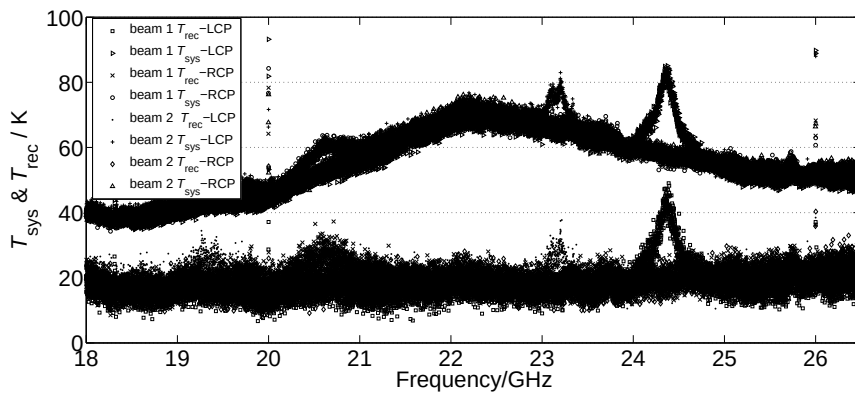


图 17 K波段接收机和系统噪声温度

Fig. 17 The receiver and system noise temperature of K band

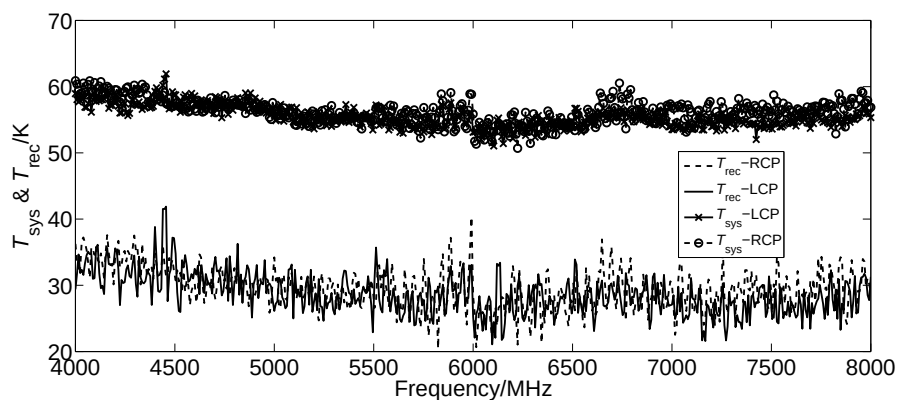


图 18 Ka波段接收机和系统噪声温度(横坐标为中频频率)

Fig. 18 The receiver and system noise temperatures of Ka band (abscissa is the intermediate frequency)

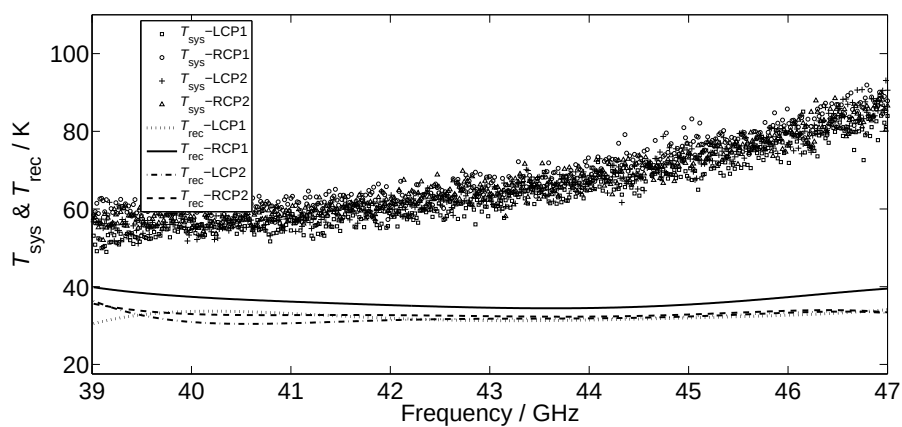


图 19 Q波段双波束接收机和系统噪声温度

Fig. 19 The dual beam receiver and system noise temperatures of Q band

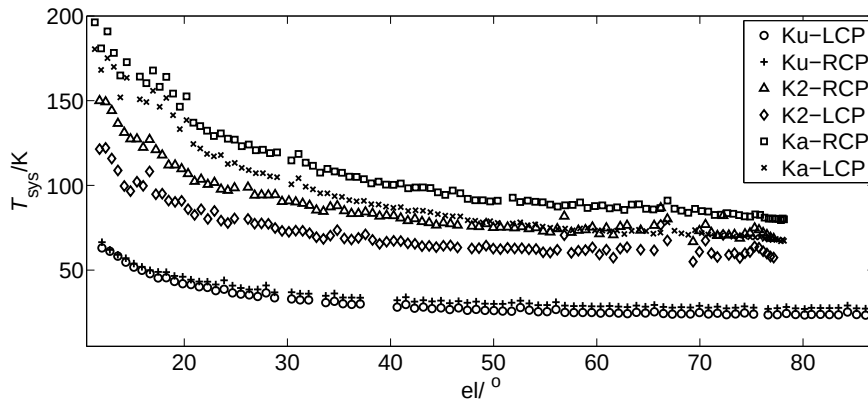


图 20 Ku、K、Ka波段系统噪声温度随俯仰变化情况

Fig. 20 The system noise temperatures of Ku, K, and Ka bands vs. elevation

4 总结

本文重点介绍了TM65 m射电望远镜上4个高频段接收系统的性能测试工作, 分析介绍了各种影响因素及其优选测量方法, 最后给出了测量结果和天线增益曲线. 测试过程中副面随动, 主面面形精度在最佳俯仰角 40° – 65° 上约为0.3 mm. 测试结果表明: Ku、K、Ka和Q波段在最佳仰角上的效率均可以达到50%以上, SEFD分别为38 Jy、120 Jy、200 Jy和110 Jy左右; 当俯仰角为 50° 左右时, 4个波段在天顶方向上系统噪声温度分别约为40 K、60 K、90 K和80 K.

参考文献

- [1] 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 天文学报, 2015, 56: 63
- [2] Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. ChA&A, 2015, 39: 394
- [3] 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 天文学报, 2015, 56: 278
- [4] Wang J Q, Yu L F, Zhao R B, et al. ChA&A, 2016, 40: 108
- [5] 王锦清, 虞林峰, 赵融冰, 等. 中国科学G辑, 2014, 44: 1232
- [6] Stelzried C T. Correction of High-frequency Noise-temperature Inaccuracy. TDA Progress Report, November 15, 1992: 42
- [7] 劳保强, 王锦清, 王俊义, 等. 中国科学院上海天文台年刊, 2014, 35: 1
- [8] Baars J W M, Genzel R, Pauliny-Toth I I K, et al. A&A, 1977, 61: 99
- [9] Ott M, Witzel A, Quirrenbach A, et al. A&A, 1994, 284: 331
- [10] Richter P. Radio Source List for Antenna Calibration. JPL D-3801, Pasadena, October 15, 1994
- [11] Multiple Mirror Telescope Observatory, University of Arizona. AJ, 1981, 86: 11
- [12] Ulich B L, Haas R W. ApJS, 1976, 30: 247
- [13] Partridge B, Lopez M, Perley R A, et al. Physics, 2015, 821: 61
- [14] 钱志翰, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用. 北京: 中国科学技术出版社, 2012

Antenna Performance Measurements in Ku, K, Ka, and Q Bands for the TM65 m Radio Telescope

WANG Jin-qing^{1,2,3} YU Lin-feng^{1,2} JIANG Yong-bin^{1,2} ZHAO Rong-bing^{1,2}
SUN Zheng-xiong^{1,2} LI Bin^{1,2} ZHONG Wei-ye^{1,2} DONG Jian^{1,2}
MICHAEL Kesteven¹ XIA Bo^{1,2} ZUO Xiu-ting^{1,2} GOU Wei^{1,2}
GUO Wen^{1,2} LU Xue-jiang^{1,2} LIU Qing-hui^{1,2} FAN Qing-yuan^{1,2}
JIANG Dong-rong^{1,2} QIAN Zhi-han^{1,2}

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

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

(3 Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030)

ABSTRACT The critical performance indicators of the TM65 m radio telescope are described. We report the antenna efficiency, sensitivity, and system noise temperature performance measurements in Ku, K, Ka, and Q bands. The key indicators of the four bands' receiving systems are introduced firstly. The issues which are critical to the measurements are discussed. These include pointing, sub-reflector model, noise diode calibration, and the atmosphere. The current antenna efficiency, sensitivity, and system noise temperature of the four bands are reported. The measurement results show that 50% efficiencies can be achieved in all four bands at the mid-point of the elevation range. Currently, at higher and lower elevations, there is a significant decline in the efficiency as a result of the main surface deformation with elevation. The sensitivities of the four bands in the mid-elevation about 50° are 38 Jy, 120 Jy, 200 Jy, and 110 Jy, respectively.

Key words atmospheric effects, telescopes, techniques: radar astronomy, cosmic background radiation, methods: observational