

基于冷空观测单元的综合孔径微波 辐射计幅度定标方法*

全 星^{1,2} 牛立杰¹ 韩东浩¹ 刘 浩¹

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 微波辐射计通过定标获取目标准确的亮温,是数据量化应用的必要手段.综合孔径微波辐射计由多个辐射计单元组成,定标需求从单一接收机扩展至所有接收单元.噪声注入是包括综合孔径微波辐射计在内的固定波束指向辐射计所常用的定标方法.作为定标参考的噪声二极管在轨会受到温度影响发生短期波动,并受器件老化影响发生长期漂移,从而导致系统定标精度恶化.针对上述问题,提出一种基于冷空观测单元的综合孔径辐射计幅度定标方法.通过设计专门的冷空观测辐射计通道,对综合孔径辐射计的公共噪声源进行实时标定,减小其噪声温度不确定性对综合孔径辐射计系统所有观测通道幅度定标的影响.结合中国海洋盐度探测卫星主被动探测仪中K波段一维综合孔径辐射计的实际系统方案,建立了辐射计系统模型及定标模型,开展了数值仿真及样机定标实验验证.仿真及实验结果验证了方法的有效性.

关键词 综合孔径微波辐射计,幅度定标,冷空定标,噪声注入

中图分类号 TP73

Amplitude Calibration Method for Synthetic Aperture Radiometer Based on Cold-sky Observation Unit

TONG Xing^{1,2} NIU Lijie¹ HAN Donghao¹ LIU Hao¹

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Microwave radiometers obtain the accurate brightness temperature of the target scene through calibration, which is a necessary means for quantitative data application. The synthetic aperture microwave radiometer consists of multiple radiometer units, and the calibration requirement extends from a single receiver to all units. Noise injection is a calibration method for fixed antenna beam radiometers, including synthetic aperture microwave radiometers. However, the noise diode used as the calibration reference encounters issues such as short-term fluctuation caused by temperature and long-

* 国家自然科学基金项目资助 (42206185)

2023-11-14 收到原稿, 2024-02-12 收到修定稿

term drift resulting from the aging of the device, leading to the deterioration of the system's calibration accuracy. To address the aforementioned problems, this paper proposes a method of amplitude calibration for synthetic aperture radiometers based on a special cold-sky observation unit. By designing a dedicated cold-sky observation radiometer channel, the common noise source of the synthetic aperture radiometer is calibrated in real-time, reducing the influence of noise temperature uncertainty on the amplitude calibration of all observation channels in the synthetic aperture radiometer system. Based on the system scheme of the K-band one-dimensional synthetic aperture radiometer in the Microwave Imager Combined Active and Passive of China's Ocean Salinity Detection Satellite, the radiometer system model and calibration model are established, and numerical simulations and prototype calibration experiments are carried out. Simulation and experimental results validate the effectiveness of the proposed method.

Key words Synthetic aperture microwave radiometer, Amplitude calibration, Cold-sky calibration, Noise injection

0 引言

海洋盐度是关键的海洋参数之一,与全球气候变化以及水循环密切相关^[1].海洋盐度对密度驱动的全球海洋环流具有重要影响,北大西洋次极区新鲜表盐层能够抑制强大气和低盐的入侵,从而影响深层温盐环流以及热循环^[2,3].以往的海洋盐度测量主要通过浮标和实地采样进行,海洋盐度的测量数据极其匮乏,在过往的一百多年间,有27%的海面无盐度测量数据(以 1° 为网格划分的全球海面),70%的海面也仅有少于10次的海洋盐度测量数据^[4].随着星载微波遥感技术的发展,对地观测的效率得到极大的提高,使得全球海洋快速测量成为可能.

微波遥感技术分为主动微波遥感和被动微波遥感,微波辐射计通过接收目标自身向外辐射的信号,是被动式微波遥感技术的应用手段之一.微波辐射计获取的目标信息被称为亮温,海面的亮温与海洋盐度、海水温度、海面粗糙度、极化以及观测角度相关.在海洋盐度最敏感的L波段,大洋中1 PSU的海洋盐度变化对亮温的贡献也仅为 $0.2\sim 0.7\text{ K}$ ^[5,6].同时,海面温度以及海面粗糙程度对海面亮温的贡献与海洋盐度的贡献相当,消除上述两个因素的影响对海洋盐度反演具有重要意义.

主被动探测(MICAP: Microwave Imager Combined Active and Passive)是中国海洋盐度探测卫星的主载荷之一.由L/C/K波段一维综合孔径微波辐射计以及L波段数字波束形成散射计组成.通过主被动结合、多频段联合的观测体制,实现对海面盐度、

海面温度及海面风场的多要素联合探测^[7-9].

辐射计通过定标快速建立起接收机输入与输出的关系,在此基础上提高定标的精度能提升数据的质量.根据普朗克黑体辐射定律在低频的瑞利-金近似,天线收到的功率与物理温度呈线性关系.灰体与黑体的差异在于谱亮度的方向性,其谱亮度与等效辐射温度具有线性的关系,等效辐射温度又称亮温.两点即可确定一条直线,因此两点定标成为了辐射计常用的定标方法,通过两个已知的不同亮温目标即可快速的获得目标的亮温.冷空是两点定标过程中常用的低温参考目标,能提供一个稳定且平坦的目标(大约 2.7 K)^[10].高温参考目标通常是内部匹配负载,能提供等效于物理温度的噪声温度.推扫式微波辐射计无机械扫描结构,对地观测时无法直接对冷空进行观测,不能将冷空直接作为定标参考源.此外,还有部分使用公共噪声作为参考目标的辐射计.杰森微波辐射计(Jason Microwave Radiometer, JMR)是首个使用噪声二极管作为参考源的星载微波辐射计^[11].由于噪声二极管存在长期漂移,使得JMR对地球物理参量的反演产生了误差.为了校正长期漂移的影响,JMR采用以亚马逊雨林、开阔海面为目标的替代定标方法以及多星载辐射计交叉定标的方法,取得了一定的效果^[12-14].宝瓶座(Aquarius/SAC-D)以及土壤湿度主被动卫星(Soil Moisture Active Passive, SMAP)的L波段辐射计均采用噪声源作为两点定标的参考源之一,且两者均通过周期性的翻转进行冷空定标,从而校正噪声源的长期漂移^[15-18].除此之外,TOPEX/Poseidon微波辐射计(TOPEX/Poseidon

Microwave Radiometer, TMR) 以及大气校正辐射计 (Atmospheric Correction Microwave Radiometer, ACMR) 通过定标开关切换指向冷空的定标天线引入冷空作为定标参考源之一^[19,20].

综合孔径微波辐射计由多个辐射计单元构成, 具有高空间分辨率的优势, 但多通道的特点也使得其定标过程更加复杂. 噪声注入是目前常用的综合孔径微波辐射计定标方法之一, 而噪声注入也分为中心式噪声注入和分布式噪声注入. MIRAS (Microwave Imaging Radiometer by Aperture Synthesis) 是目前唯一在轨运行的综合孔径微波辐射计系统, 采用分布式噪声网络进行噪声注入, 通过中心向四周辐射的方式逐级进行定标. 分布式噪声注入不可避免地每个层级之间引入一定的定标误差, 随着定标过程的递进, 这种误差会不断积累, 外围单元的定标精度会产生一定的恶化. MIRAS 引入了高稳定度的噪声注入辐射计 (Noise Injection Radiometer, NIR) 用于检测噪声源的波动, 而 NIR 的定标则需要定期翻转进行冷空观测, 即冷空定标^[21]. 除了初始公共噪声的瞬态变化外, 用于定标的公共噪声在 6 年内出现了 0.2%~1% 的波动^[22,23]. 本文提出了将中心式噪声注入与专用的冷空观测单元结合的定标方法对主被动探测仪中 C/K 波段一维综合孔径微波辐射计进行定标. 中心式噪声注入通过一个公共噪声源以及噪声功分网络对所有接收机进行噪声注入. 冷空观测单元持续以冷空为定标参考源之一完成自身的定标, 同时完成公共噪声的实时监测.

本文基于噪声传输的正向模型和中心式噪声网络模型建立定标模型以及推导相应的定标方程. 对定标方法进行仿真, 在主被动探测仪的 K 波段综合孔径微波辐射计系统上完成相应的验证, 并使用定标数据平均技术^[24]减小实时定标引入的定标噪声, 对系统性能进行初步的分析.

1 系统模型和定标方法

1.1 基于冷空观测单元定标的系统结构及幅度定标过程

如图 1 所示, 基于冷空观测单元定标的系统由三部分构成, 分别是冷空观测单元、定标网络以及一维综合孔径微波辐射计系统. 冷空观测单元实质上是一个实孔径微波辐射计系统, 其天线始终对准冷空, 主要功能是通过不断地自定标从而完成公共噪声的实时监测. 冷空观测单元通过定标开关切换的方式在匹配负载、冷空以及公共噪声三种状态间切换, 冷空和匹配负载状态即为定标参考. 定标网络由公共噪声源以及噪声功分网络构成, 公共噪声源用于提供幅相定标的参考, 功分网络使得每个通道注入的噪声来源于同一个噪声源. 一维综合孔径微波辐射计系统用于对目标场景的不间断观测.

海洋盐度卫星在轨运行如图 2 所示, 主被动探测仪位于卫星前部, 抛物柱形反射面天线与辐射计观测馈源阵列共同形成多个扇形波束指向观测刈幅区域, C/K 波段辐射计冷空定标单元天线指向冷空. C/K

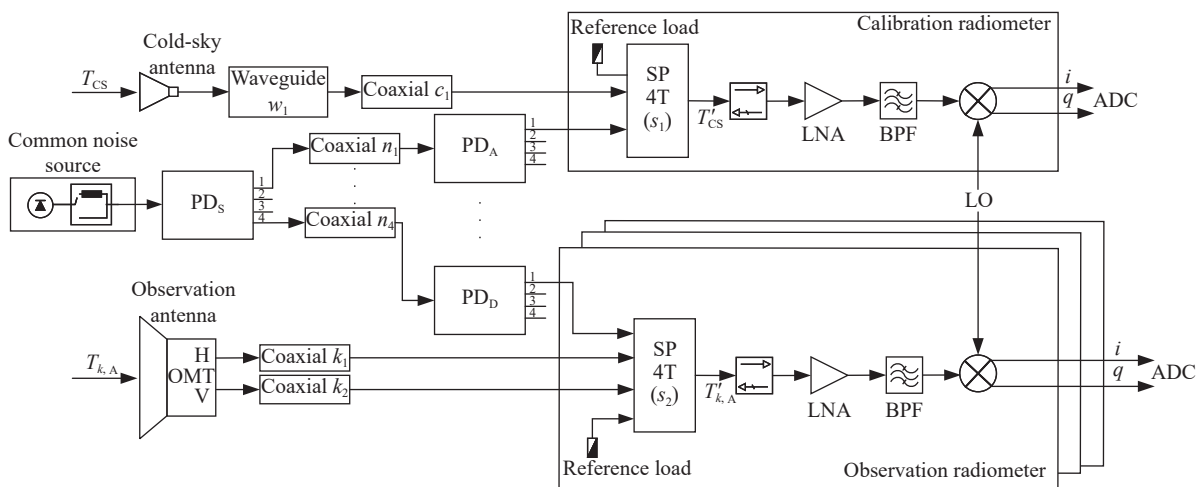


图 1 基于冷空观测单元定标系统的结构

Fig. 1 System structure block diagram based on cold-sky observation unit calibration

波段综合孔径辐射计接收机的幅度定标过程可以分为以下三个阶段: (1) 冷空观测单元的自定标阶段, 将冷空匹配负载作为两个参考点进行两点定标, 获得接收机的增益以及等效噪声温度; (2) 通过冷空观测单元对公共噪声温度进行实时定标; (3) 使用公共噪声与匹配负载完成综合孔径辐射计中各个观测单元的幅度定标。

C/K 波段辐射计生成亮温所需的数据可以分为三类, 分别是遥感数据、物理温度数据以及地面定标数据。遥感数据分为冷空观测单元的遥感数据和综合孔径辐射计各通道的遥感数据, 其中冷空状态、匹配负载状态以及公共噪声状态用于接收机的定标。物理温度数据包含了多个关键点位的物理温度, 同样用于接收机的定标。地面定标数据是在轨难以获得的定标参数, 主要包括非线性系数、不同链路上温度修正系数以及各个观测单元的公共噪声修正系数。



图 2 海洋盐度探测卫星在轨运行

Fig. 2 In-orbit diagram of the ocean salinity satellite

数据处理流程如图 3 所示, 其中 CS 代表冷空, RL 代表匹配负载, CN 代表公共噪声, CR 代表定标通道, NR 代表观测通道。对于冷空观测单元, 首先将物理温度、物理温度修正系数与冷空亮温结合, 得到冷空在接收机输入端面的等效亮温, 随后与匹配负载的物理温度结合, 使用两点定标获得冷空观测单元的增益和接收机等效噪声温度。通过接收机增益和等效噪声温度可以计算出冷空观测单元接收机输入端面的等效噪声温度, 随后通过地面参数中公共噪声修正系数获得综合孔径微波辐射计各个单元接收机输入端面的公共噪声温度。对于综合孔径微波辐射计的各个单元, 通过接收机输入端面的公共噪声温度和开关物理温度即可获得天线状态的等效噪声温度, 最后结合物理温度修正系数和物理温度即可计算得出天线端口的亮温。

辐射计的定标状态与观测状态通过开关周期性的切换实现, 其工作周期如图 4 所示。图 4 中每个状态持续 10 ms, 分别为天线状态、匹配负载状态、高公共噪声状态以及低公共噪声状态。其中天线状态的周期 N 占比可以根据实际需求进行调节, 从而平衡观测噪声和定标噪声。

1.2 定标模型

辐射计接收机前端由天线、波导等无源器件组成。为了简化模型, 将前端的无源器件看作多个衰减器级联, 采用与 TMR 和 SMAP 相同的建模方法^[18], 冷空观测单元天线支路的前向模型可以表示为

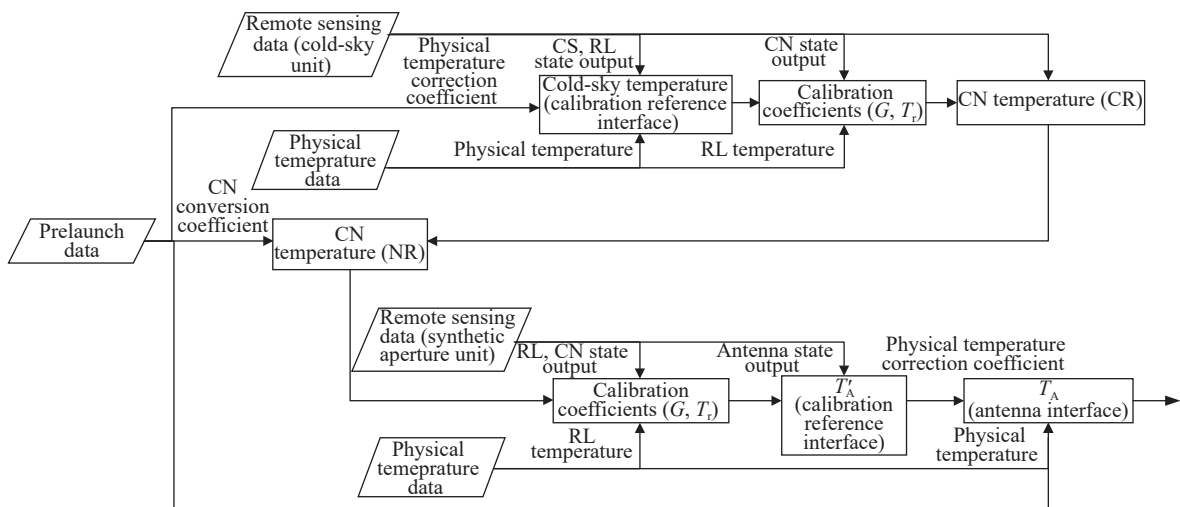


图 3 数据处理流程

Fig. 3 Data processing flow chart

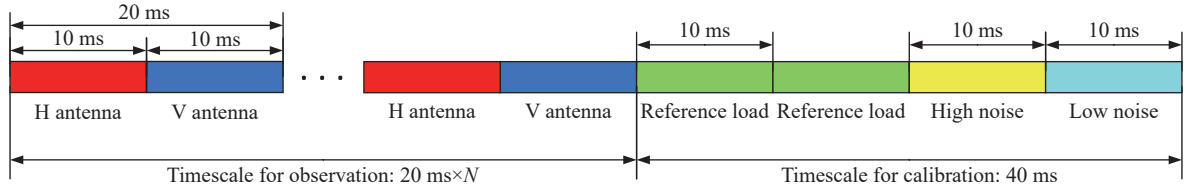


图 4 辐射计接收机的工作周期

Fig. 4 Radiometer receiver operating cycle diagram

$$T'_{C,CS} = \frac{T_{CS}}{L_{CSA} L_{w1} L_{c1} L_{s1}} + \frac{T_{ph,c1} (L_{c1} - 1)}{L_{c1} L_{s1}} + \frac{T_{ph,w1} (L_{w1} - 1)}{L_{w1} L_{s1} L_{c1}} + \frac{T_{ph,CSA} (L_{CSA} - 1)}{L_{CSA} L_{w1} L_{s1} L_{c1}} + \frac{T_{ph,s1} (L_{s1} - 1)}{L_{s1}}. \quad (1)$$

式 (1) 由三类参数构成, 其中第一类是目标在天线口面的亮温, 对于冷空观测单元, 天线口面的也就是冷空亮温 T_{CS} ; 第二类是前端各个器件的物理温度 $T_{ph,x}$, 分别是天线及 OMT、波导、同轴线缆以及定标开关; 第三类是器件的损耗参数 L_x . $T'_{C,CS}$ 为冷空观测单元在观测冷空时接收机输入端面的亮温.

当接收机开关切换至匹配负载支路时, 输入接收机的噪声温度与式 (1) 的形式相同, 即

$$T'_{C,M1} = \frac{T_{ph,M1}}{L_{s1}} + T_{ph,s1} (1 - L_{s1}) = T_{ph,M1}. \quad (2)$$

其中, M1 为指定标通道的匹配负载; s1 为指定标通道的定标开关. 匹配负载与定标开关位于接收机内部, 且位于同一温控区域内, 通常认为匹配负载的物理温度与定标开关的物理温度相同, 因此可以认为定标开关切换在匹配负载支路时接收机输入端口的噪声温度即为匹配负载的物理温度.

此时根据两点定标原理, 冷空观测单元接收机输入端口的公共噪声的温度可表示为

$$T''_{C,CN} = \frac{v_{C,CN} - v_{C,M}}{v_{C,M} - v_{C,CS}} (T_{ph,M1} - T'_{C,CS}) + T_{ph,M}. \quad (3)$$

式中, $v_{C,mod}$ 表示冷空观测单元各状态的输出功率, mod 为 CN 时表示公共噪声状态, mod 为 M 表示匹配负载状态, mod 为 CS 表示天线状态; $T''_{C,CN}$ 为冷空观测单元所获取的公共噪声温度.

由于传输路径的差异, 不同接收机端口的公共噪声温度具有一定的差异, 这种差异与路径上的损耗和物理温度相关, 输入冷空观测单元的公共噪声前向模型可表示为

$$T'_{C,CN} = \frac{T_{CN}}{L_{S,1} L_{A,1} L_{s1} L_{n1}} + \frac{T_{ph,S} (L_{S,1} - 1)}{L_{S,1} L_{A,1} L_{s1} L_{n1}} + \frac{T_{ph,A} (L_{A,1} - 1)}{L_{A,1} L_{s1}} + \frac{T_{ph,n1} (L_{n1} - 1)}{L_{A,1} L_{s1} L_{n1}} + \frac{T_{ph,s1} (L_{s1} - 1)}{L_{s1}}. \quad (4)$$

式中, T_{CN} 为公共噪声源输出的噪声温度. 在实际工作中, 公共噪声传输路径上器件的损耗几乎不随温度发生变化, 不同路径上的物理温度会产生一定的差异, 这种差异是不可忽略的. 载荷在轨运行时系统有完善的温控措施, 短时间内公共噪声路径上的温度几乎不会产生剧烈的变化, 因此使用两种水平的噪声温度作差后, 有

$$\Delta T'_{C,CN} = \Delta T'_{C,HCN} - \Delta T'_{C,LCN} = \frac{T_{HCN} - T_{LCN}}{L_{S,1} L_{A,1} L_{s1} L_{n1}}. \quad (5)$$

式中, T_{HCN} 和 T_{LCN} 分别为高公共噪声和低公共噪声的噪声温度. 不难发现, 式 (5) 仅与公共噪声源输出的两种噪声温度水平和路径上的损耗相关, 对于任意综合孔径微波辐射计单元, 则有

$$\Delta T'_{k,CN} = T'_{k,HCN} - T'_{k,LCN} = T''_{k,HCN} - T''_{k,LCN} = \frac{T_{HCN} - T_{LCN}}{L_{S,4} L_{D,1} L_{s2} L_{n2}}. \quad (6)$$

其中, k 表示不同的综合孔径辐射计单元. 此时, 不同通道间公共噪声温度差具有较为稳定的关系, 可以表示为

$$\mu_k = \frac{\Delta T'_{k,CN}}{\Delta T'_{C,CN}} = \frac{\alpha_k}{\alpha_C} = \frac{L_{S,1} L_{A,1} L_{s1} L_{n1}}{L_{S,4} L_{D,1} L_{s2} L_{n2}}. \quad (7)$$

式 (7) 表示的是不同公共噪声路径上的损耗比, μ_k 即为公共噪声修正系数.

通过公共噪声差的方式可以获得接收机的增益 G , 无法获得接收机的等效噪声温度, 因此还需要结合匹配负载状态获取, 最终的定标方程可表示为

$$T'_{k,A} = \frac{v_{k,A} - v_{k,M}}{v_{k,HCN} - v_{k,LCN}} (T'_{k,HCN} - T'_{k,LCN}) + T_{ph,MO}. \quad (8)$$

其中, $T'_{k,A}$ 为综合孔径单元在接收机输入端面上的天线亮温; $T_{ph,MO}$ 为综合孔径单元接收机的匹配负载物理温度; $v_{k,A}$ 和 $v_{k,M}$ 分别为接收机定标开关指向天线、匹配负载时输出的功率. 将式 (7) 中综合孔径微波辐射计单元的公共噪声温度差与冷空观测单元的公共噪声温度差的关系代入后, 接收机输入端口的定标方程可表示为

$$T'_{k,A} = \frac{v_{k,A} - v_{k,M}}{v_{k,HCN} - v_{k,LCN}} \mu_k \Delta T'_{C,CN} + T_{ph,MO}. \quad (9)$$

接收机输入端口的噪声温度需要转换至天线端口, 对于综合孔径微波辐射计单元, 其天线支路的前向方程可逆向表示为

$$T_A = T'_{k,A} L_{OA} L_{k1} L_{s2} - T_{ph,OA} (L_{OA} - 1) - T_{ph,k1} (L_{k1} - 1) L_{OA} - T_{ph,s2} (L_{s2} - 1) L_{OA} L_{k1}. \quad (10)$$

将式 (10) 中非物理温度的项简化为系数的形式, 定标方程可表示为

$$T_A = \beta_t T'_{k,A} + \beta_h T_{ph,OA} + \beta_l T_{ph,k1} + \beta_s T_{ph,s2}. \quad (11)$$

其中, β_t , β_h , β_l 以及 β_s 为不同亮温的修正系数, 该系数需要在地面的热真空实验中获得.

2 幅度定标误差数值仿真

通过引入专门的冷空观测单元, 一方面能够实现综合孔径辐射计公共噪声源的实时定标, 另一方面也导致定标环节增加, 引入了新的潜在的定标误差环节. 使用部分器件的典型参数以及部分实测参数, 以源到接收机定标开关的前向模型、噪声波模型^[25]以及非线性模型对完整的系统进行建模. 基于模型对影响该定标方法的两项主要误差影响进行了仿真分析, 包括冷空观测单元与综合孔径观测单元非线性特性的不一致性和公共噪声功分网络传输参数的不确定性.

2.1 非线性

理想的辐射计接收机输入与输出具有良好的线性. 在实际应用中, 辐射计接收机不可避免地具有一定的非线性, 这种非线性通常用二阶模型进行描述^[26,27], 可以表示为

$$v_{out} = G_k T_{sys} + a_k T_{sys}^2. \quad (12)$$

其中, G_k 为一阶系数 (或接收机增益); a_k 为二阶系数; T_{sys} 为系统总噪声温度. 式 (12) 中第二项为非线

性项, 是引起非线性误差的主要因素.

冷空观测单元实质上是实孔径辐射计, 这意味着非线性对冷空观测单元的影响与传统辐射计相同. 非线性对冷空观测单元的影响作用在公共噪声温度差的计算中, 此项误差可表示为

$$\Delta T'_{C,CN} = \Delta T''_{C,CN} + \delta T'_{C,CN}. \quad (13)$$

其中, $\delta T'_{C,CN}$ 是定标通道公共噪声的非线性误差项. 综合孔径微波辐射计单元天线端口的亮温可表示为

$$T'_{k,A} = \frac{v_{k,A} - v_{k,M}}{v_{k,HCN} - v_{k,LCN}} \mu_k (\Delta T''_{C,CN} + \delta T'_{C,CN}) + T_{ph,MO} + \delta T'_{k,CN}. \quad (14)$$

其中, $\delta T'_{k,CN}$ 是综合孔径单元自身定标时公共噪声的非线性误差项. 星载微波辐射计在发射前通常在模拟的环境 (通常是热真空环境) 中进行一系列的定标实验, 非线性修正项同样在热真空实验中获取.

图 5 给出了冷空观测单元与综合孔径观测单元在不同非线性下的目标亮温计算误差, 图 5(a)~(c) 分别为冷空通道的非线性为 0.9995, 0.9999, 0.99999, 综合孔径单元非线性为 0.9995~0.99999 时目标亮温的计算误差. 图 5 中 CSU 指冷空观测单元, OU 指综合孔径观测单元. 对比图 5(a)~(c) 中 CSU 与 OU 非线性相同时的曲线不难看出, 冷空观测单元与综合孔径单元的非线性特性相同时, 综合孔径观测单元的非线性误差与传统辐射计相同. 与传统辐射计非线性误差相同的特点可以分为以下两个方面: 首先是随着非线性的改善, 目标亮温的最大误差由 0.4 K 减小至 0.1 K; 其次是在定标参考点无非线性误差 (分别对应匹配负载与低温参考, 300 K 以及 100 K), 当目标亮温由 100 K 变化至 200 K 时 (或目标亮温由 300 K 变化至 200 K), 目标亮温的误差逐渐增大, 也就是当目标亮温远离定标参考点时定标误差逐渐增大. 对比图 5 中 CSU 与 OU 非线性不同的误差曲线不难看出, 综合孔径观测单元与冷空观测单元的非线性特性不同时, 非线性误差出现了不同程度的放大.

2.2 公共噪声修正系数定标误差分析

在理想状态下, 噪声功分网络在不同端口的输出是完全相同的, 这意味着各个端口的公共噪声修正系数 $\mu_k = 1$. 实际上, 公共噪声在传输路径上的损耗不是完全理想一致的, 这项参数需要在地面定标获取. 然而地面定标过程同样会存在一定的误差, 在仿真过程中对公共噪声修正系数加入误差, 从而模拟实际地

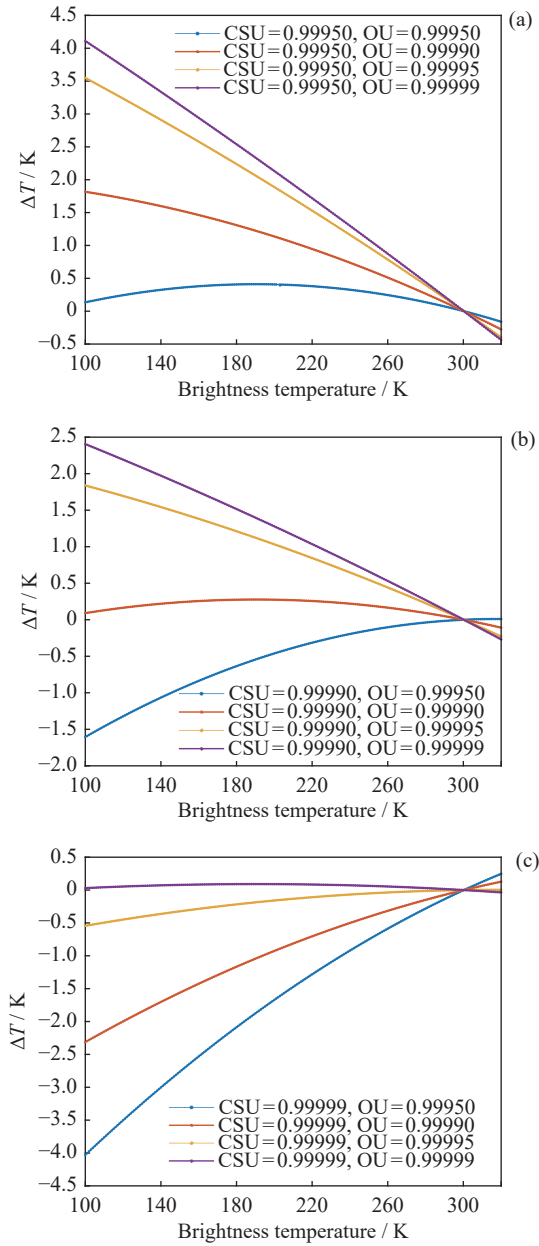


图5 非线性差异对目标亮温的影响

Fig. 5 Influence of different nonlinear on the target brightness temperature

面定标误差对接收机幅度定标的影响. 公共噪声修正系数的测量值可表示为

$$\mu'_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_c} + \Delta\alpha = (1 + \varepsilon) \mu_k. \quad (15)$$

其中, μ'_k 为仿真过程中设置的实测值; μ_k 为真实值. 根据公共噪声源与接收机的实测结果设置数值仿真中公共噪声路径损耗参数和公共噪声温度差参数, 具体参数列于表1.

图6给出了使用表1中参数的数值仿真的结果.

表1 公共噪声网络修正系数定标误差仿真参数

Table 1 Common noise network correction coefficient calibration error simulation parameters

参数	数值
公共噪声至冷空观测单元 路径损耗/dB	16.502
公共噪声至综合孔径单元 路径损耗/dB	18.52
公共噪声温度差/K	330~380
定标参数误差/(%)	±4
目标亮温/K	100~320
接收机非线性	0.9999

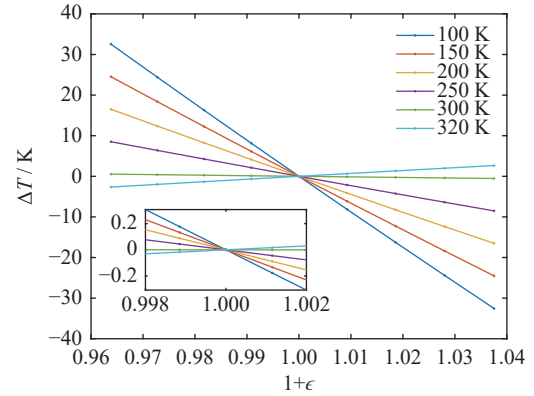


图6 公共噪声修正系数定标误差对幅度定标的影响

Fig. 6 Influence of common noise correction factor calibration error on amplitude calibration

从图6中可以看出, 当目标亮温接近热参考点时亮温的误差始终较小. 主被动微波探测仪的目标主要是海洋场景, 而 C/K 波段海洋场景的目标亮温约为 100 K. 对于 100 K 的目标而言, 公共噪声修正系数的定标误差为 1% 时有 2 K 的误差, 此时地面定标过程中公共噪声温度的定标精度为

$$\Delta T_{\text{error,CN}} = \varepsilon \Delta T'_{\text{CN}} = 3.3 \sim 3.8 \text{ K}. \quad (16)$$

从图6中的局部放大图中不难看出, 当公共噪声修正的残余误差小于 0.2% 时, 综合孔径单元 (也就是零基线) 对于任意目标亮温误差均小于 0.3 K.

3 公共噪声实时修正分析与实验验证

噪声二极管在长周期运行过程中不可避免地出现老化以及环境变化, 从而引起公共噪声输出的变

化, 这种变化既包括公共噪声的长期漂移, 也包括温度、供电电压等波动引起的短期变化. 在地面真实的模拟冷空观测单元、综合孔径辐射计观测单元以及公共噪声源的实际在轨工作状态较为困难, 需要载荷在大型真空罐中进行. 结合载荷实际参数, 对公共噪声源在轨长期漂移对观测单元天线亮温的误差影响进行了模拟仿真及定量分析. 利用 K 波段辐射计实际系统在微波暗室中开展了实验验证. 在该实验中, 利用辐射计开机后公共噪声源噪声温度输出逐步达成稳定前的状态模拟其在轨变化, 利用冷空观测单元对液氮定标源的观测模拟在轨冷空观测, 同时在微波暗室环境下构建不同的亮温场景, 模拟综合孔径辐射计观测单元的在轨对地观测目标. 以微波暗室环境实测物理温度为参考, 比对实时与非实时修正公共噪声温度情况下综合孔径辐射计观测单元天线亮温的差异, 对基于冷空观测单元的综合孔径辐射计幅度定标方法进行评估.

3.1 公共噪声温度漂移

Brown 等^[12,13]对 JMR 与 AWVRs (Advanced Water Vapor Radiometers) 噪声二极管长期漂移分析的结果表明, 在 4 年的工作周期内, 两者的噪声二极管都显示出了 0.2%~3% 的不稳定性. Piepmeier 等^[18]对 SMAP L 波段辐射计噪声二极管的分析结果表明噪声二极管最大有 1% 的年际变化. 结合上述系统的实测结果以及主被动探测仪系统的需求对公共噪声漂移的影响进行分析, 仿真参数列于表 2.

图 7(a) 为数值仿真过程中接收机端口公共噪声温度差随时间逐渐稳定的曲线, 公共噪声温度差由

324 K 逐渐减小至 321 K. 图 7(b) 为表 2 仿真参数下未对公共噪声进行实时修正引入的额外定标误差.

根据图 7 结果不难看出, 随着公共噪声源噪声温度在轨漂移随时间变化逐渐趋于稳定, 综合孔径辐射计观测单元所获取目标亮温误差的增加逐渐趋于稳定. 其中 300 K 目标与仿真过程中的匹配负载温度接近, 受到公共噪声误差的影响较小. 当公共噪声具有 1% 的长期在轨漂移误差时, 对于 150 K 的目标亮温漂移差有 1.3 K.

3.2 实验验证与结果

利用主被动探测仪 K 波段综合孔径子系统的部分观测通道在常温暗室中对提出的幅度定标方法进行验证. 定标实验分为两阶段, 第一阶段获取公共噪声修正系数, 第二阶段观测在微波暗室中进行模拟亮温场景.

根据式 (6) 可知, 公共噪声温度差仅与源和公共噪声传输路径上的损耗相关, 冷空观测单元与综合孔

表 2 公共噪声漂移仿真设置参数
Table 2 Common noise drift simulation set parameters

参数	数值
公共噪声路径损耗/dB	16.502
公共噪声漂移/(%)	1
高公共噪声温度/K	674
低公共噪声温度/K	350
目标亮温/K	100~320
接收机非线性	0.9999

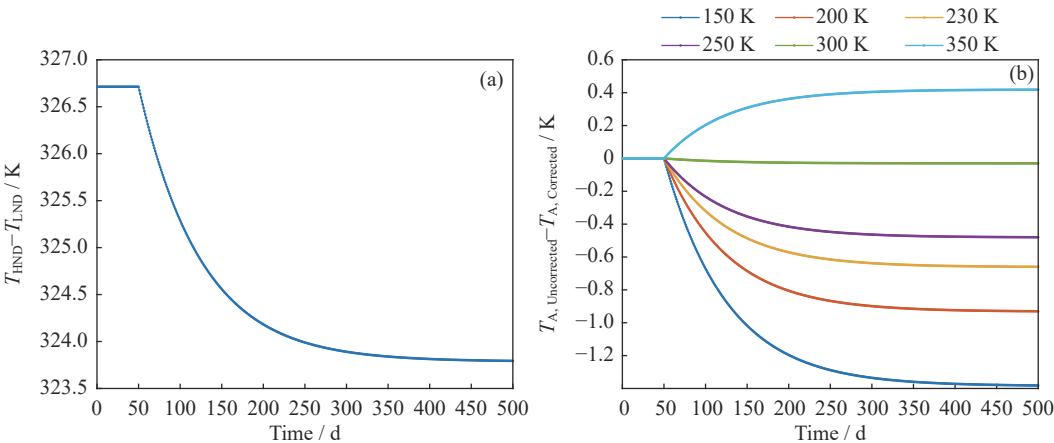


图 7 公共噪声变化曲线 (a) 与目标亮温误差 (b)

Fig. 7 Common noise variation curve (a) and target brightness temperature error (b)

径单元的公共噪声温度差之比即为公共噪声修正系数. 因此, 第一部分实验就是通过使用两个液氮定标源同时对冷空观测单元以及综合孔径观测单元进行幅度定标, 通过幅度定标获取相同时刻的公共噪声温度, 实验结果如图 8 所示.

第二部分是 K 波段综合孔径辐射计实时定标实验, 主要用于验证实时修正公共噪声效果. 第二部分实验过程中使用液氮定标源模拟冷空, 同时使用黑体墙以及黑体墙背景下的液氮定标源分别模拟高亮温以及低亮温两种观测场景, 对基于冷空定标单元的幅度定标方法进行定量化验证.

3.2.1 高亮温场景模拟观测实验

为了避免外界电磁环境的干扰, 定标实验在微波暗室中进行. 液氮标定源是地面常用的定标参考源之一. 液氮定标源可以提供一个亮温约 77 K 的目标, 在

实验中用于模拟冷空. 定标实验场景如图 9 所示, 冷空天线始终对准定标源, 模拟在轨冷空观测单元持续对自身定标. 冷空观测单元连接的天线又被称为定标天线.

图 10 中 RL1 与 RL2 分别代表冷空观测单元和一个综合孔径观测单元的匹配负载物理温度; Co1 与 Co2 为天线与接收机之间同轴电缆的物理温度; CAS 与 OA 为定标天线与综合孔径单元天线的物理温度. 在 16:20 UTC 时温度的抖动是因为定标源 1 在液氮加注时液氮飞溅以及水气的影响导致的天线温度下降.

图 11 给出了冷空观测通道实时定标后获取的公共噪声温度. 从图 11 可以看出, 高公共噪声状态的噪声温度几乎不发生变化, 低公共噪声状态的公共噪声温度由 342 K 上升至 344 K. 随着公共噪声路径上的

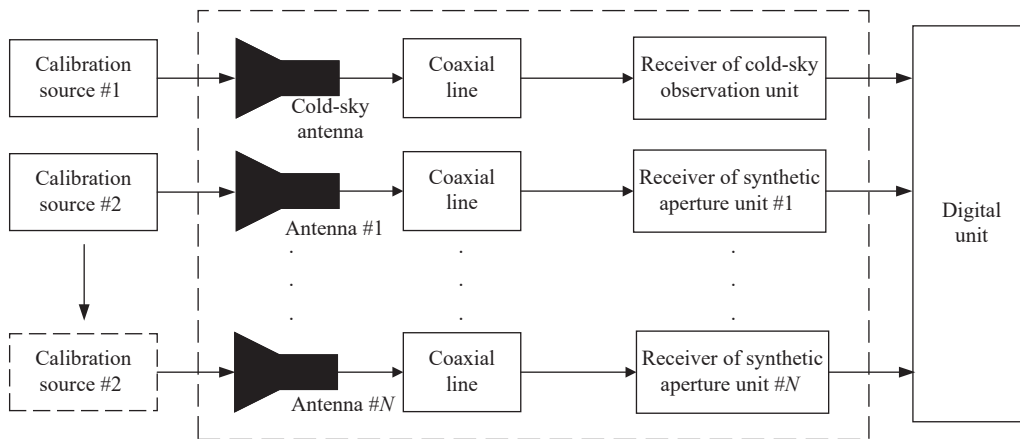


图 8 公共噪声修正系数定标实验

Fig. 8 Schematic diagram of common noise correction coefficient calibration experiment

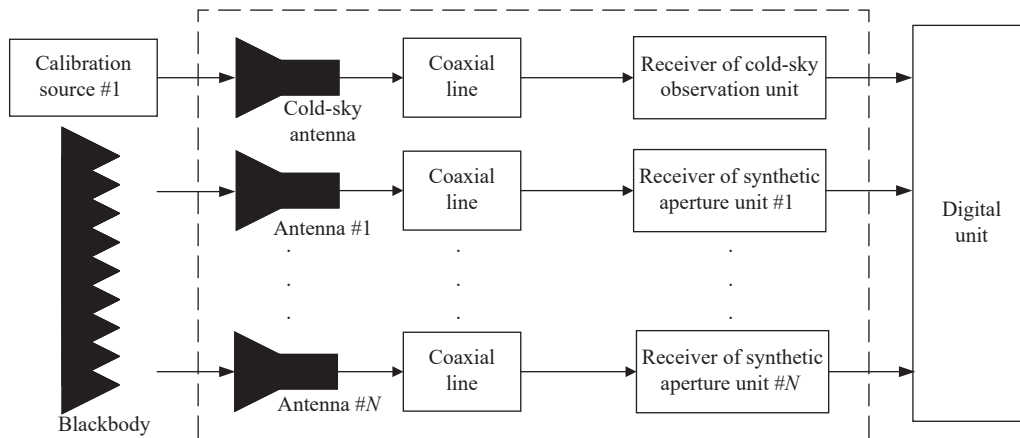


图 9 高亮温场景 (黑体墙) 定标实验

Fig. 9 Schematic diagram of calibration experiment for high brightness temperature scene (Blackbody wall)

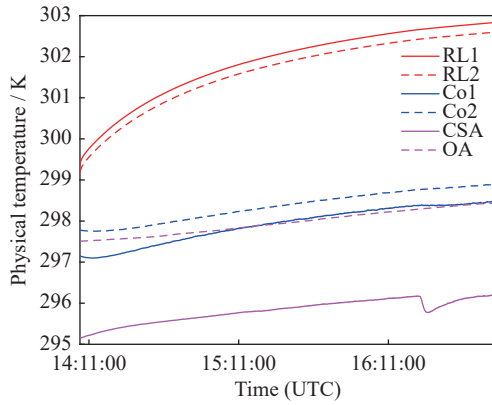


图 10 高亮温场景定标实验过程中天线及接收机物理温度变化

Fig. 10 Physical temperature change of antenna and receiver during calibration experiment of high brightness temperature scene

物理温度升高, 接收机输入端口的公共噪声温度随之升高. 公共噪声自身输出的噪声温度随着时间的推移逐渐减小, 两种趋势互相抵消. 低公共噪声是高公共噪声通过衰减得到的, 噪声源自身的变化趋势在低公共噪声状态下不能与路径上噪声变化趋势抵消, 因此出现高低公共噪声趋势的差异. 图 11 中蓝色曲线是实时定标后的亮温结果, 红线是采用定标数据平均技术^[24]后的亮温结果. 其中高公共噪声在定标平均前后的灵敏度分别为 1.35 K 和 0.79 K, 低公共噪声为 0.6 K 和 0.53 K, 可以看到定标数据平均能有效地减小实时定标引入的定标噪声.

使用最后接近稳定阶段的公共噪声温度差作为非实时修正条件下使用的公共噪声温度. 图 12 给出了高亮温场景下公共噪声源温度修正前后综合孔径辐射计观测单元的定标结果对比, 同时给出了原始测量结果的滑动平均曲线便于更清晰的对比. 其中图 12(a) 为接收机增益的对比, 图 12(b) 为黑体墙观测亮温变化对比, 图 12(c) 为黑体温度变化与观测亮温变化的对比, 图 12(d) 为修正与未修正两者的观测亮温差. 图 12(b) 中黑体墙的亮温有 0.3 K 的变化, 图 12(c) 中黑体的温度变化为 0.15 K, 两者在变化趋势上较为一致, 但在绝对亮温上有 1.5 K 差异, 这种差异是常温环境下定标参数 β_x 与 μ'_k 不准确导致的. 观测亮温差异趋势与数值仿真趋势一致, 由于黑体墙的亮温与匹配负载的物理温度较接近, 因此公共噪声实时修正的效果并不明显 (0.05 K), 与理论预期一致.

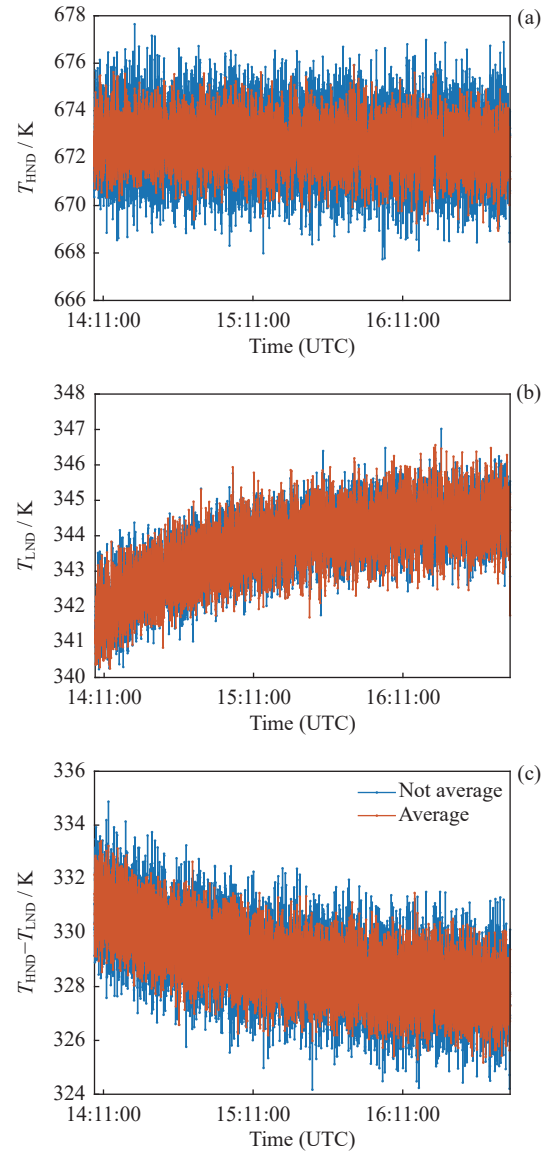


图 11 冷空定标单元实时定标所获取的公共噪声源噪声温度变化. (a) 高公共噪声, (b) 低公共噪声, (c) 公共噪声温度差

Fig. 11 Noise temperature change of common noise source obtained by real-time calibration of cold-sky calibration unit. (a) High common noise, (b) low common noise, (c) difference of high and low

3.2.2 低温目标观测

根据对公共噪声温度漂移分析, 当目标亮温低于匹配负载的温度时公共噪声修正的效果更加明显. 如图 13 所示, 冷空观测单元保持对定标源的观测, 综合孔径辐射计的单元天线对准低温目标.

图 14 给出了低温目标观测实验的实际场景照片. 图中给出了液氮定标源的口面尺寸及其与观测天线

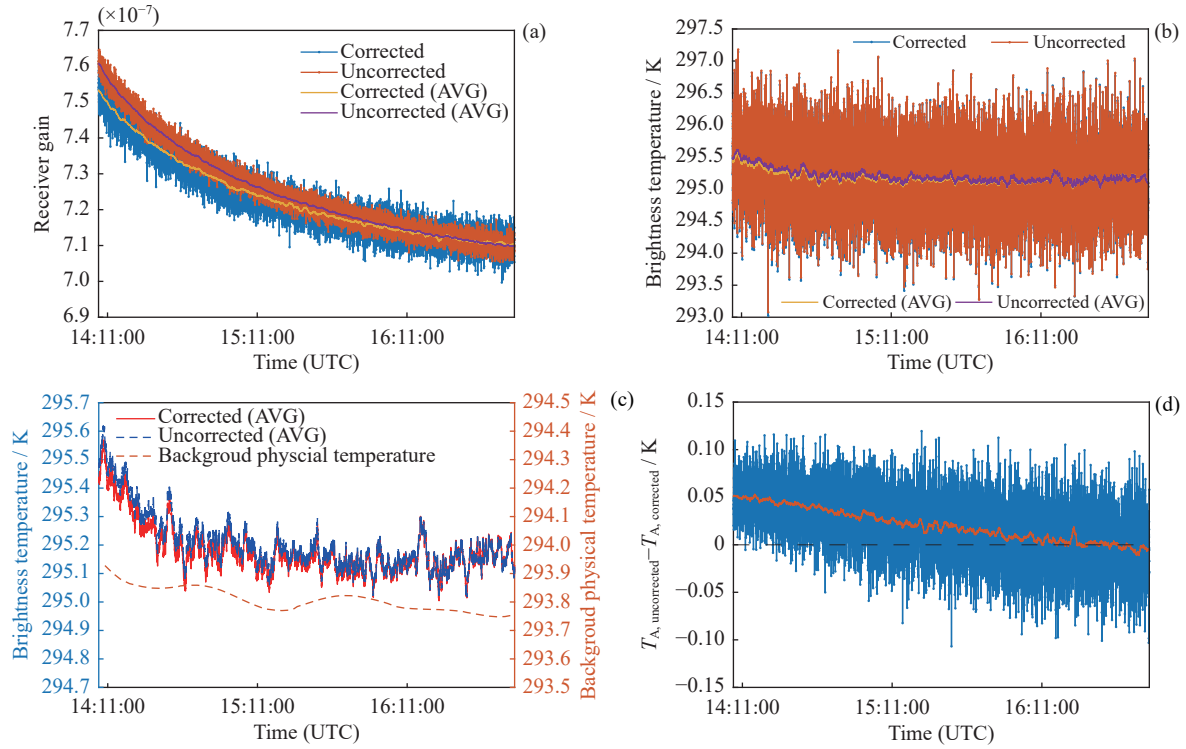


图 12 高亮温场景定标实验结果. (a) 观测单元接收机增益, (b) 目标亮温结果, (c) 背景温度与亮温对比, (d) 公共噪声修正的效果

Fig. 12 Calibration experiment result of high brightness temperature scene. (a) Observation unit receiver gain, (b) result of target brightness temperature, (c) contrast between background temperature and brightness temperature, (d) effect of common noise correction

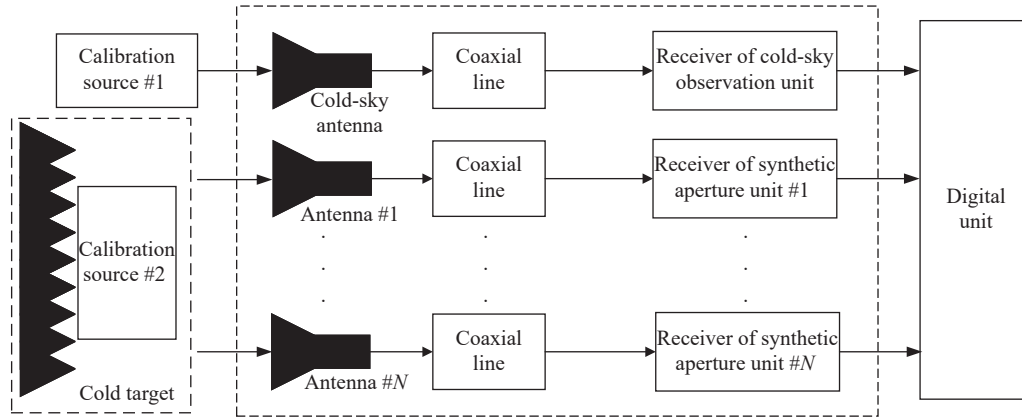


图 13 低亮温场景 (黑体墙背景下的液氮定标源) 定标实验

Fig. 13 Schematic diagram of calibration experiment for low brightness temperature scene (Liquid nitrogen calibration source under blackbody wall background)

之间的观测几何尺寸关系. 根据上述尺寸估算, 定标源口面覆盖了观测天线方位角 $-33^{\circ} \sim 46^{\circ}$, 俯仰角 $-35^{\circ} \sim 43^{\circ}$ 的区域. 结合观测天线实测方向图进行计算, 天线接收波束约 36% 由定标冷源覆盖, 64% 由室

温背景覆盖.

图 15 给出了观测低温目标时物理温度的变化. 图 16(a) 给出了公共噪声源噪声温度修正前后低温目标高压北侧亮温结果的对比, 图 16(b) 给出了实验过

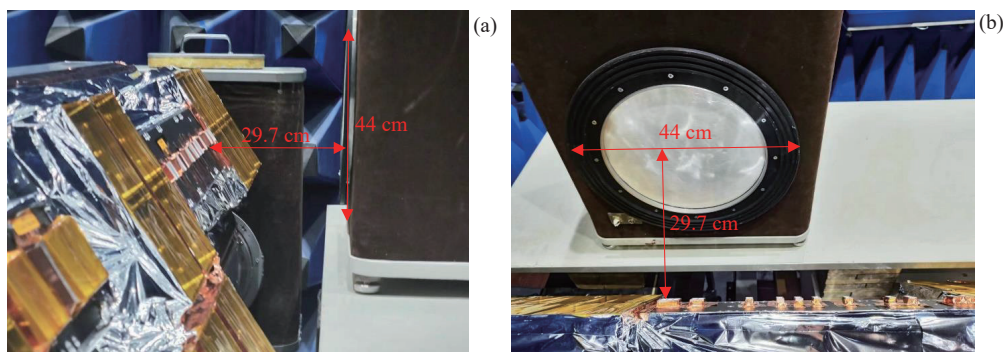


图 14 低温目标观测实验场景图. (a) 低温目标与天线的位置关系 (侧视图), (b) 低温目标与天线的位置关系 (俯视图)

Fig. 14 Cold target observation experiment scene. (a) Positional relationship between the cold target and the antenna (side view), (b) position relationship between cold target and antenna (top view)

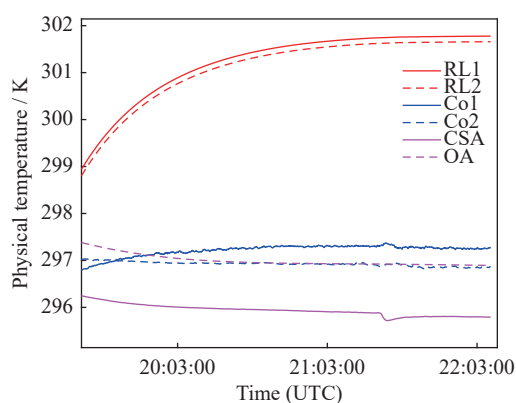


图 15 低亮温场景定标实验过程中辐射计天线及接收机物理温度变化

Fig. 15 Physical temperature change of antenna and receiver during calibration experiment of low brightness temperature scene

程中黑体物理温度的变化与观测亮温的对比, 图 16(c) 给出了整个实验过程中观测亮温的修正量. 低温目标由高亮温的黑体墙以及定标源共同组成, 定标源的亮温即为液氮的温度, 黑体的亮温即为黑体的物理温度. 根据图 14 观测几何关系所确定的天线波束覆盖情况, 由液氮定标源及室温背景亮温共同组成的低温目标亮温变化约为 0.64 K.

从图 16(b) 可以看出, 未修正公共噪声时, 目标亮温的变化为 1.49 K, 修正公共噪声后目标亮温的变化为 0.95 K, 公共噪声温度修正后的亮温与环境温度变化更加吻合. 修正公共噪声的结果与理论分析结果一致, 也说明了通过冷空观测单元实时监测公共噪声温度方法的有效性.

在实验进行到北京时间 21:20 时对低温目标进行

液氮加注, 液氮加注的过程中有水汽进入观测天线的视场, 从而导致天线物理温度的波动 (见图 15) 以及低温目标亮温波动.

实验结果表明基于冷空观测单元完成公共噪声源漂移的实时修正后, 实现了对公共噪声源初上电阶段输出噪声温度漂移的有效补偿, 综合孔径辐射计观测通道所获取的目标亮温整体趋势更接近于暗室目标实际物理温度变化, 且对高低亮温两种场景所实现的不同的亮温修正量也符合理论及仿真预期, 验证了所提出的幅度定标方法的有效性. 考虑到辐射计系统在暗室环境中未进行高精度温控, 另外辐射计系统尚未进行非线性及前端定标参数的严格测量及校正, 因此上述暗室实验结果在绝对精度上还存在一定偏差, 后续将在热真空定标实验中进行更高精度的验证.

4 结论

基于冷空观测单元实时监测公共噪声源的波动, 应用于综合孔径微波辐射计幅度定标过程, 同时采用高低噪声和匹配负载三点提高定标的准确性. 从数值仿真和实验验证两个方面, 验证了基于冷空观测单元的幅度定标方法的可行性.

使用冷空观测单元监测公共噪声的波动无需定期翻转观测冷空, 同时能监测公共噪声的短周期快速波动, 增加定标的精度. 中心式噪声网络无误差逐级传递的问题, 此外中心式噪声网络的噪声输出波动与源和传输路径上的温度波动相关, 通过两种水平噪声之差消除了路径上温度变化的影响, 使得噪声网络所

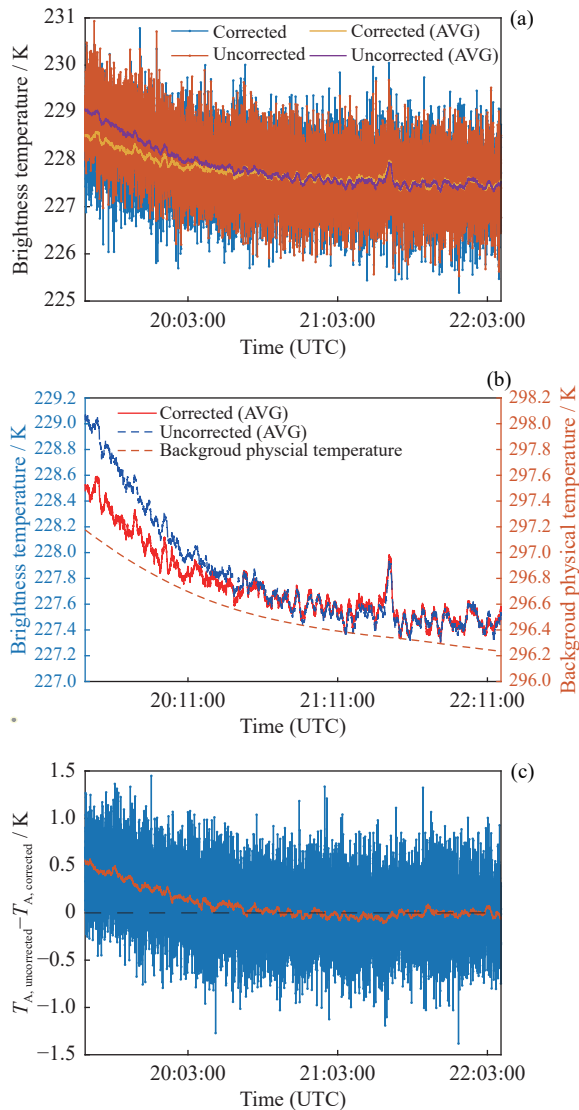


图 16 低亮温场景定标实验结果. (a) 目标亮温, (b) 背景温度与亮温对比, (c) 公共噪声修正的效果

Fig. 16 Calibration experiment result of low brightness temperature scene. (a) Target brightness temperature, (b) contrast between background temperature and brightness temperature, (c) the effect of corrected common

有端口输出的波动一致. 此外, 使用损耗和物理温度的前向模型推导出定标方法的定标模型, 结合常用的接收机非线性模型进行非线性误差、公共噪声修正系数精度以及公共噪声漂移的数值仿真.

通过主被动探测仪的暗室定标实验对提出的定标方法进行验证, 分别对黑体墙和低温目标观测, 均得到符合预期的结果. 实时定标引入了定标噪声, 通过定标平均的方式能有效地消除定标噪声.

参考文献

- [1] SIEDLER G, GOULD J, CHURCH J A. Ocean Circulation and Climate: Observing and Modelling the Global Ocean[M]. Amsterdam: Elsevier, 2001
- [2] LUKAS R, LINDSTROM E. The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1991, **96**(S1): 3343-3357
- [3] BALAGURU K, CHANG P, SARAVANAN R, et al. Ocean barrier layers' effect on tropical cyclone intensification[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, **109**(36): 14343-14347
- [4] BINGHAM F M, HOWDEN S D, KOBLINSKY C J. Sea surface salinity measurements in the historical database[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2002, **107**(C12): 8019
- [5] REUL N, GRODSKY S A, ARIAS M, et al. Sea surface salinity estimates from spaceborne L-band radiometers: an overview of the first decade of observation (2010–2019)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, **242**: 111769
- [6] AKINS A, BROWN S, LEE T, et al. Simulation framework and case studies for the design of sea surface salinity remote sensing missions[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, **16**: 1321-1334
- [7] ZHANG L J, YIN X B, WANG Z Z, et al. Preliminary analysis of the potential and limitations of MICAP for the retrieval of sea surface salinity[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, **11**(9): 2979-2990
- [8] LIU H, ZHU D, NIU L J, et al. MICAP (Microwave imager combined active and passive): A new instrument for Chinese ocean salinity satellite[C]//2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Milan: IEEE, 2015: 184-187
- [9] NIU Lijie, LIU Hao, WU Lin, et al. Development and experimental study on L-band synthetic aperture radiometer prototype for ocean salinity measurement[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, **39**(8): 1841-1847 (牛立杰, 刘浩, 武林, 等. 面向星载海洋盐度探测应用的 L 波段综合孔径辐射计原理样机研制与试验研究 [J]. 电子与信息学报, 2017, **39**(8): 1841-1847)
- [10] FIXSEN D J, CHENG E S, GALES J M, et al. The cosmic microwave background spectrum from the full COBE* FIRAS data set[J]. *The Astrophysical Journal*, 1996, **473**(2): 576-587
- [11] BROWN S, RUF C, KEIHM S, et al. Preliminary validation and performance of the JASON microwave radiometer[C]//IGARSS 2003. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings (IEEE Cat. No. 03CH37477). Toulouse: IEEE, 2003: 1077-1079
- [12] BROWN S, DESAI S, KEIHM S, et al. JMR noise diode

- stability and recalibration methodology after three years on-orbit[C]//2006 IEEE MicroRad. San Juan: IEEE, 2006: 7-12
- [13] BROWN S T, DESAI S, LU W W, *et al.* On the long-term stability of microwave radiometers using noise diodes for calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, **45**(7): 1908-1920
- [14] SCHARROO R, LILLIBRIDGE J L, SMITH W H F, *et al.* Cross-calibration and long-term monitoring of the microwave radiometers of ERS, TOPEX, GFO, Jason, and Envisat[J]. *Marine Geodesy*, 2004, **27**(1/2): 279-297
- [15] PIEPMEIER J R, HONG L, PELLERANO F A. Aquarius L-band microwave radiometer: 3 years of radiometric performance and systematic effects[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, **8**(12): 5416-5423
- [16] DINNAT E P, LE VINE D M, PIEPMEIER J R, *et al.* Aquarius L-band radiometers calibration using cold sky observations[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, **8**(12): 5433-5449
- [17] PIEPMEIER J R, FOCARDI P, HORGAN K A, *et al.* SMAP L-band microwave radiometer: Instrument design and first year on orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, **55**(4): 1954-1966
- [18] PENG J Z, MISRA S, PIEPMEIER J R, *et al.* Soil Moisture Active/Passive (SMAP) L-band microwave radiometer post-launch calibration upgrade[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2019, **12**(6): 1647-1657
- [19] RUF C S, KEIHM S J, JANSSEN M A. TOPEX/Poseidon Microwave Radiometer (TMR). I. Instrument description and antenna temperature calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33**(1): 125-137
- [20] ZHANG D H, WANG Z Z, WANG H J, *et al.* ACMR system description and performance[C]//2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Quebec City: IEEE, 2014: 5179-5182
- [21] BROWN M A, TORRES F, CORBELLA I, *et al.* SMOS calibration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, **46**(3): 646-658
- [22] KAINULAINEN J, COLLIANDER A, CLOSA J, *et al.* Radiometric performance of the SMOS reference radiometers—assessment after one year of operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, **50**(5): 1367-1383
- [23] MARTÍN-NEIRA M, OLIVA R, CORBELLA I, *et al.* SMOS instrument performance and calibration after six years in orbit[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, **180**: 19-39
- [24] NIU Lijie, LIU Hao, WU Ji. Research and experimental verification on high sensitivity and high stability microwave radiometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, **39**(8): 2028-2032 (牛立杰, 刘浩, 吴季. 高灵敏度、高稳定度微波辐射计技术研究实验验证[J]. *电子与信息学报*, 2017, **39**(8): 2028-2032)
- [25] CAMPS A. Noise wave analysis of Dicke and noise injection radiometers: complete S parameter analysis and effect of temperature gradients[J]. *Radio Science*, 2010, **45**(5): RS5004
- [26] GONZÁLEZ-HARO C, TORRES F, DUFFO N, *et al.* Linearity characterization of detectors for interferometric radiometers[C]//2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town: IEEE, 2009: IV-657-IV-660
- [27] COTO J A, JONES L. Nonlinear radiometer counts to antenna temperature inverse transfer function for a Dicke radiometer with noise injection[C]//2019 Southeast Conference. Huntsville: IEEE, 2019: 1-5

作者简介



全 星 男, 1998 年出生于河南省南阳市, 现为中国科学院国家空间科学中心硕士研究生, 主要研究方向为综合孔径微波辐射计的定标等。
E-mail: tongxing20@mails.ucas.ac.cn



刘 浩 (通信作者) 男, 1978 年出生于江西九江, 研究员, 主要研究方向为干涉式被动微波、毫米波/太赫兹成像技术及其在定量遥感、目标探测与环境感知等方面的应用。
E-mail: liuhao@mirslab.cn