

高灵敏度、高稳定度微波辐射计技术与实验验证

牛立杰^{①②} 刘浩^{*①} 吴季^①

^①(中国科学院国家空间科学中心微波遥感重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 使用星载综合孔径辐射计进行海洋盐度探测是微波遥感领域的一个研究热点。为了达到海洋盐度探测所需准确度指标,综合孔径辐射计的辐射计单元需要同时具有非常高的灵敏度及定标稳定度。该文研究了一种兼顾高灵敏度和高稳定度的辐射计技术,通过实时定标的方法保证稳定度指标,通过定标数据平均的方法提高灵敏度指标。首次通过频域分析得到最优定标数据平均时间。完成了长时间稳定度实验,实验结果表明:该辐射计稳定度在3天(3 d)内优于0.12 K,灵敏度优于0.1 K,达到了海洋盐度探测综合孔径辐射计对辐射计单元的需求。

关键词: 高稳定度辐射计; L波段微波辐射计; 噪声注入式辐射计; 海洋盐度

中图分类号: TP732.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2017)08-2028-05

DOI: 10.11999/JEIT161112

Research and Experimental Verification on High Sensitivity and High Stability Microwave Radiometer

NIU Lijie^{①②} LIU Hao^① WU Ji^①

^①(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

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

Abstract: Global measurement of ocean salinity using satellite borne synthetic aperture radiometer is one of the research focuses in the field of microwave remote sensing. In order to achieve the accuracy of the ocean salinity detection, the radiometer units of the synthetic aperture radiometer need to have very high sensitivity and very high calibration stability. In this paper, the technique of the radiometer with high sensitivity and high stability is researched. High stability is realized by the real-time calibration method, and the sensitivity is effectively improved by the calibration data average technology. The optimal average time is obtained by the frequency domain analysis for the first time. Long time stability experiments are completed to demonstrate its performance. Experimental results show that the stability of this L-band radiometer reaches 0.12 K (in 3 days), and the sensitivity reaches 0.1 K, which can reach the requirement of the synthetic aperture radiometer for ocean salinity detection.

Key words: High stability radiometer; L-band microwave radiometer; Noise injection radiometer; Ocean salinity

1 引言

星载微波辐射计技术使全球海洋盐度测量成为可能^[1]。海洋盐度探测辐射计需要有很高的灵敏度、稳定度、空间分辨率、刈幅指标。2009年欧空局发射了SMOS卫星,采用Y型阵2维综合孔径体制;2011年美国发射了Aquarius卫星,采用“推帚式”真实孔径体制。两者发挥了重要作用,也发现了一些问题。文献[2,3]介绍了SMOS载荷及最新的数据处理结果,文献[4,5]介绍Aquarius载荷、状态及测量结果。文献[6]对比了两颗卫星数据,总结问题:(1)2颗卫星都未采用海温同步测量手段;(2)都未解决RFI问题;(3)2维综合孔径辐射计体制可实现大

刈幅高分辨率,但系统复杂,误差大;(4)实孔径体制空间分辨率低,观测刈幅小,不能满足应用需求。

中国科学院国家空间科学中心吸取经验,提出“主被动联合微波成像仪”(Microwave Imager Combined Active and Passive: MICAP)方案^[7,8]。主载荷是一台L波段1维综合孔径辐射计,可实现高空间分辨率及观测刈幅指标,同时避免复杂度过高的难题。1维综合孔径辐射计由15个辐射计单元组成,要求3天(3 d)内稳定度优于0.12 K,灵敏度优于0.1 K。

国内研究方面,文献[9]提出使用实时定标提高辐射计稳定度。文献[10]采用一种数字增益波动自动补偿微波辐射计,航空实验证明能达到0.2 psu的盐度分辨率。本文研究一种兼顾灵敏度和稳定性的辐

射计, 实时定标实现高稳定度, 定标平均方法提高灵敏度。频域分析得到最优定标平均时间, 并完成时序与注入噪声的优化及辐射计实验, 指标达到了 MICAP 的辐射计单元要求。本文研究为 MICAP 计划奠定基础, 同时还将应用于“全球水循环卫星探测计划”(Global Water Cycle Observation Mission: WCOM)的 L/S/C 三频全极化综合孔径辐射计系统中^[11]。

2 高灵敏度、高稳定度辐射计理论基础

2.1 辐射计的灵敏度

辐射计可以通过分析天线温度的积分时间为 τ_0 时的阿伦方差来计算灵敏度指标^[12]:

$$\Delta T_A = \sqrt{\frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N (\bar{T}_{A,k+1} - \bar{T}_{A,k})^2} \quad (1)$$

其中, $\bar{T}_{A,k} = \frac{1}{\tau_0} \int_{t_k}^{t_k+\tau_0} T_A(t) dt$, $t_{k+1} = t_k + \tau_0$,

$T_A(t)$ 为天线温度, τ_0 为积分时间, $\bar{T}_{A,k}$ 为积分后第 k 个天线温度数据, N 为天线温度数据的总数。

2.2 辐射计的稳定性

辐射计的不稳定性主要由系统参数变化带来: 增益和接收机噪声温度漂移; 定标平面前天线、无源器件及电缆物理温度波动导致的自身噪声波动; 定标源(负载、噪声源)噪声温度波动。精密温控、高稳定噪声源、实时定标等可以减小这些不稳定性。

文献[13]中提出了漂移方差的概念, 表示辐射计积分时间为 τ_0 时, 周期为 T 的漂移的大小:

$$\begin{aligned} \Delta T_{A_D}(T) &= \sqrt{\sigma_D^2(T, \tau_0)} \\ &= \sqrt{\sigma_{T_A}^2(2, T > \tau_0, \tau_0) - \sigma_{T_A}^2(2, \tau_0, \tau_0)} \quad (2) \end{aligned}$$

其中,

$$\begin{aligned} \bar{T}_{A,k} &= \frac{1}{\tau_0} \int_{t_k}^{t_k+\tau_0} T_A(t) dt \\ \begin{cases} \sigma_{T_A}^2(2, T > \tau_0, \tau_0) = \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^M (\bar{T}_{A,k+1} - \bar{T}_{A,k})^2, \\ t_{k+1} = t_k + T \end{cases} \\ \begin{cases} \sigma_{T_A}^2(2, \tau_0, \tau_0) = \frac{1}{2N} \sum_{k=1}^N (\bar{T}_{A,k+1} - \bar{T}_{A,k})^2, \\ t_{k+1} = t_k + \tau_0 \end{cases} \end{aligned}$$

$\sigma_D^2(T, \tau_0)$ 定义为漂移方差, $\sigma_{T_A}^2(2, \tau_0, \tau_0)$ 为积分时间为 τ_0 时天线温度的阿伦方差数值, $\sigma_{T_A}^2(2, T > \tau_0, \tau_0)$ 可以看作对积分时间为 τ_0 的辐射计天线温度数据进行周期 T 的抽取后, 再计算阿伦方差。

2.3 高灵敏度、高稳定度辐射计类型的选择

辐射计实现高稳定度需要实时定标, 但实时定标会增加噪声, 降低灵敏度。噪声注入辐射计实时

定标修正增益和接收机噪声温度的漂移, 稳定度高, 但定标噪声导致灵敏度比全功率辐射计差。本文选用噪声注入式辐射计, 在获得高稳定度的同时通过特定的定标数据平均方法(详细见 3.4 节)减小定标噪声, 可以兼顾高灵敏度和高稳定性的指标需求。

3 高灵敏度、高稳定度噪声注入式辐射计理论分析

3.1 噪声注入式辐射计原理

传统噪声注入辐射计使用硬件技术实现检波电压抵消, 通过脉宽反推天线温度。现在可以使用数字技术对电压采样后直接数字处理, 简化系统^[14]。原理框图如图 1 所示。工作时序如图 2 所示。

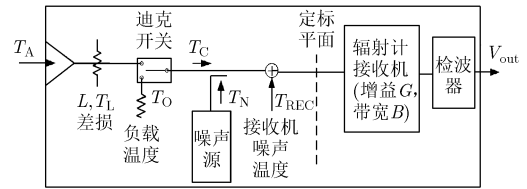


图1 噪声注入式辐射计原理框图

图 2 中, τ_A , τ_O , τ_{ON} 分别为天线周期、负载定标周期、噪声注入定标周期的积分时间, τ_{O_OPT} , τ_{ON_OPT} 分别为负载定标周期、噪声注入定标周期的最优平均时间(详细见 3.4 节)。天线温度公式为

$$T_A = (1-L) \cdot T_L + L \cdot T_O + L \cdot T_N \cdot \frac{V_A - V_O}{V_{ON} - V_O} \quad (3)$$

其中, $\frac{V_A - V_O}{V_{ON} - V_O} = \frac{T_C - T_O}{T_N}$ 。

V_A 为开关切换到天线时检波电压, V_O 为迪克负载时电压, V_{ON} 为噪声源注入噪声时电压, T_O 为负载温度, T_N 为噪声源注入噪声温度, T_A 为天线温度, T_C 为定标平面处等效输入天线温度, L 为定标平面前插损(天线、电缆、开关插损等), T_L 为物理温度。

3.2 噪声注入式辐射计灵敏度计算

天线温度总的灵敏度可由式(3)对 V_A , V_O , V_{ON} 求偏导后运算得到

$$\begin{aligned} \Delta T_A &= L \times \left[\frac{1}{B\tau_A} (T_C + T_{REC})^2 \right. \\ &\quad + \frac{1}{B\tau_O} (T_C - T_O - T_N)^2 \left(\frac{T_O + T_{REC}}{T_N} \right)^2 \\ &\quad \left. + \frac{1}{B\tau_{ON}} \left(\frac{T_O - T_C}{T_N} \right)^2 (T_O + T_N + T_{REC})^2 \right]^{1/2} \quad (4) \end{aligned}$$

式中, B 为带宽。由于 3 个状态噪声降低了灵敏度。为提高灵敏度需使用定标平均法(详见 3.4 节)。

3.3 噪声注入式辐射计稳定度计算

噪声注入式辐射计稳定度主要由 T_O , T_L , T_N 的不稳定性带来。求偏导得到稳定度公式:

$$\Delta T_{A-D} = \left[L^2 \cdot \Delta T_O^2 + (1-L)^2 \cdot \Delta T_L^2 + L^2 \cdot \left(\frac{V_A - V_O}{V_{ON} - V_O} \right)^2 \cdot \Delta T_N^2 \right]^{1/2} \quad (5)$$

3.4 定标数据平均技术

定标周期中观测的是稳定定标源, 精密温控可以使 V_O 和 V_{ON} 长时间稳定, 对其进行平均相当于增加积分时间 τ_O 和 τ_{ON} , 从而减小定标周期噪声, 提高灵敏度指标。 V_O 和 V_{ON} 噪声由 $1/f$ 闪烁噪声和白

噪声组成, $1/f$ 噪声由增益 G 和接收机噪声温度 T_{REC} 的 $1/f$ 噪声带来^[15]; 白噪声由辐射计定标带来。实时定标是在定标周期测得 $1/f$ 噪声, 抵消测量数据中包含的 $1/f$ 噪声。因此定标平均时要在减少白噪声的同时尽量保留定标中 $1/f$ 噪声, 因此有一个最优平均时间 τ_{O_OPT} (及 τ_{ON_OPT}), 如图3所示。该时间可以通过分析功率谱密度函数得到。

以 V_O 为例, 去除直流成分得到 ΔV_O , 求功率谱密度开方曲线, 如图4所示, 可以看出 ΔV_O 由 $1/f$ 噪声和白噪声组成。设 $\Delta V_O(t) = V_w(t) + V_f(t)$, 其中 $V_w(t)$ 为白噪声, 功率谱密度开方可用 a 拟合, $V_f(t)$ 为 $1/f$ 噪声, 功率谱密度开方可用 b/f 拟合。

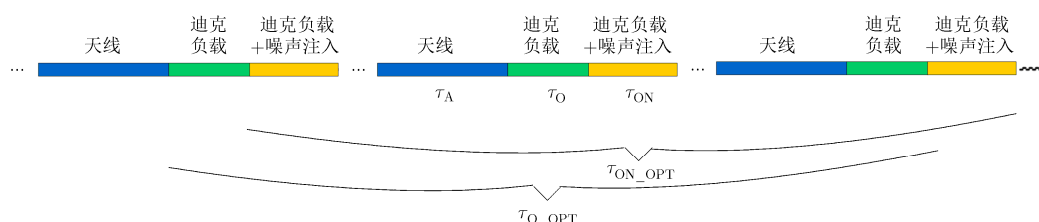


图2 应用定标数据平均技术的辐射计时序

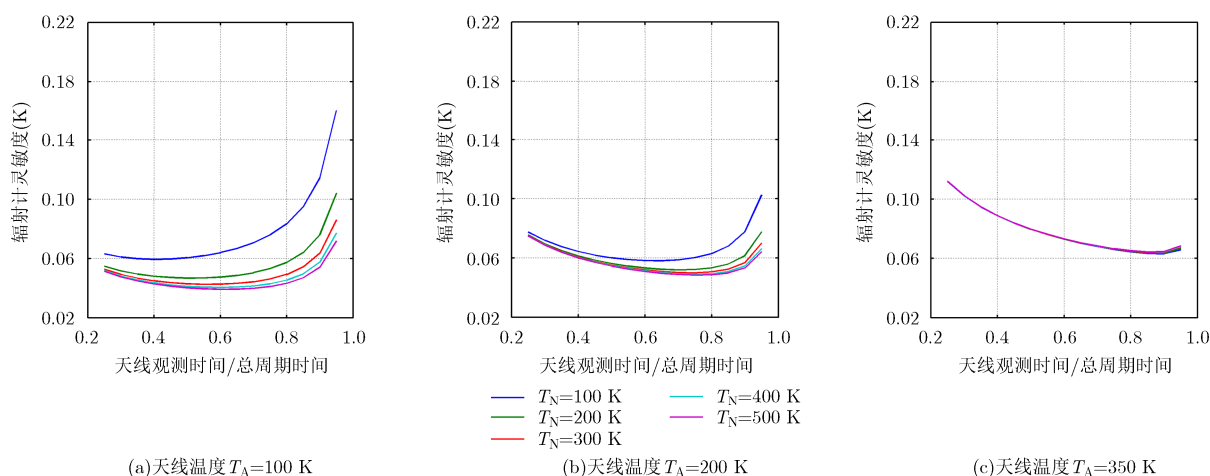


图3 应用定标数据平均技术的辐射计时序与噪声源温度优化

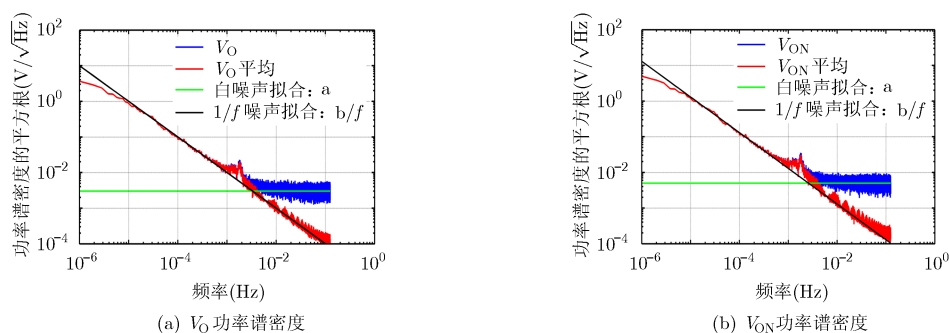


图4 V_O 与 V_{ON} 的功率谱密度

对 ΔV_O 滑动平均等效于 $\Delta V_O(t)$ 与一个脉宽为 τ 的矩形脉冲 $h(t)$ 卷积积分, 卷积后电压 $V_R(t)$ 及功率谱密度 $S_R(f)$ 如式(7)所示:

$$h(t) = (1/\tau) \cdot [u(t + \tau/2) - u(t - \tau/2)] \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} V_R(t) &= \Delta V_O(t) * h(t) \\ S_R(f) &= S(f) \cdot |H_R(f)|^2 \\ H_R(f) &= \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

运算符 $*$ 表示卷积积分, 相当于频域低通滤波, 增加 τ 相当于减小带宽, 更多抑制白噪声, 但若带宽过小, 会滤除需保留的 $1/f$ 噪声的高频部分, 带来定标误差。为确定 τ_{OPT} , 构造一个误差函数 $e(t)$:

$$e(t) = V_R(t) - V_f(t) = V_{we}(t) + V_{fe}(t) \quad (8)$$

式中, $V_{we}(t) = V_w(t) * h(t)$ 为滤波后剩余的白噪声; $V_{fe}(t) = V_f(t) * h(t) - V_f(t)$ 为滤波带来的 $1/f$ 噪声损失。根据 Wiener-Khintchine 理论, 并使用拟合的 a^2 和 b^2/f^2 代替 $S(f)$, 可以得到误差函数 $e(t)$ 的方差:

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 &= \sigma_{we}^2 + \sigma_{fe}^2 = \int_0^\infty a^2 \left[\frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau} \right]^2 df \\ &+ \int_0^\infty b^2 / f^2 \left[1 - \frac{\sin(\pi f \tau)}{\pi f \tau} \right]^2 df \end{aligned} \quad (9)$$

当 $d(\sigma_e^2)/d\tau = 0$ 时, σ_e^2 最小。解方程可以得到:

$$\tau_{O_OPT} = \frac{\sqrt{3} a}{\pi b} \approx \frac{a}{2b} \quad (10)$$

设数据间隔为 τ_s , 卷积积分转换为对离散采样数据滑动平均。最优平均点数 $2m+1$ 如式(12):

$$V_R(n) = \frac{1}{2m+1} \cdot \Delta V(n) * [u(n+m) - u(n-m)] \quad (11)$$

$$2m+1 = \frac{\tau_{O_OPT}}{\tau_s} \approx \frac{a}{2b\tau_s} \quad (12)$$

3.5 灵敏度仿真与时序、注入噪声优化

对于如图 2 所示的应用定标数据平均技术的辐射计时序, τ_A , τ_O , τ_{ON} 的比例关系以及噪声源注入噪声温度 T_N 大小均对辐射计灵敏度有影响, 根据

式(4)可以进行最优参数的仿真优化。表 1 是一个辐射计的主要参数。设 $\tau = \tau_A + \tau_O + \tau_{ON} = 4$ s, $\tau_O = \tau_{ON}$, 平均时间 τ_{O_OPT} 及 τ_{ON_OPT} 为 150 s 和 200 s。仿真结果如图 3 所示。图 3(a), 3(b), 3(c)分别对应的是天线温度为 100 K, 200 K, 350 K 时, 时序与注入噪声温度优化的结果。L 波段海面辐射亮温约为 100 K 左右, 土壤辐射亮温约为 200 K。可以看出兼顾海洋盐度探测和土壤湿度探测的最优的观测周期占比(τ_A/τ)约在 50%~80%之间。

表 1 L 波段辐射计主要参数

参数	$L(\text{dB})$	$B(\text{MHz})$	$T_{\text{REC}}(\text{K})$	$T_L(\text{K})$	$T_O(\text{K})$
数值	1.2	27	90	300	300

4 辐射计实验验证

4.1 辐射计实验过程

实验辐射计参数如表 1 所示。频率 1400~1427 MHz, τ_A/τ 为 50%。完成了 8 天(8 d)稳定性实验。精密温控系统将辐射计工作温度稳定在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 范围内。观测目标为一个温控在 343 K 的恒温匹配负载, 温控精度 $\pm 0.1^\circ\text{C}$, 精密测温实现天线温度补偿。

4.2 实验数据分析

功率谱密度如图 4, 蓝线是功率谱密度平方根; 黑线和绿线是 $a + b/f$ 拟合。 V_O 最优平均时间 150 s 左右, V_{ON} 为 200 s 左右。红线是平均后功率谱密度平方根; 平均后在保留定标时序中的 $1/f$ 噪声同时基本滤除了白噪声成分。图 5 为 8 天(8 d)天线温度, 红线是使用定标平均技术处理得到的天线温度, 计算灵敏度为 0.096 K(4 s 积分); 蓝线是未使用定标平均技术的天线温度, 灵敏度为 0.17 K(4 s 积分), 可见看出定标数据平均技术将辐射计灵敏度提高近一倍。图 6 为式(2)计算的辐射计漂移标准差(周期 T 在 3 d 内)。可以看出 3 天(3 d)稳定度优于 0.11 K。

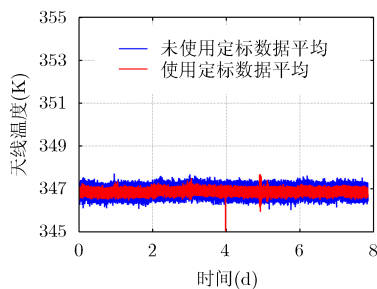


图 5 辐射计 8 天(8 d)稳定性实验得到的天线温度

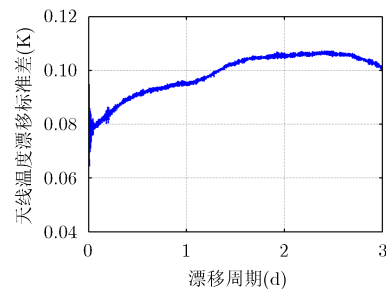


图 6 辐射计漂移标准差

5 结束语

本文研究了一种兼有高灵敏度及高稳定度指标的噪声注入辐射计技术,通过实时定标保证高稳定度指标,通过定标平均进一步提高灵敏度指标。通过实验验证了采用精密温度控制,定标平均技术的L波段辐射计灵敏度优于0.1 K(4 s 积分时间),3天(3 d)内稳定度优于0.12 K,达到了海洋盐度探测综合孔径辐射计对辐射计单元的需求。

参 考 文 献

- [1] 李青侠, 张靖, 郭伟, 等. 微波辐射计遥感海洋盐度的研究进展[J]. 海洋技术学报, 2007, 26(3): 8-12.
LI Qingxia, ZHANG Jing, GUO Wei, *et al.* Research progress of remote sensing of ocean salinity by microwave radiometer [J]. *Ocean Technology*, 2007, 26(3): 8-12.
- [2] MCMULLAN K D, BROWN M A, MARTIN-NEIRA M, *et al.* SMOS: The payload[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(3): 594-605. doi: 10.1109/TGRS.2007.914809.
- [3] MARTIN-NEIRA M, OLIVA R, CORBELLA I, *et al.* SMOS instrument performance and calibration after 6 years in orbit[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 180(8): 19-39. doi: 10.1016/j.rse.2016.02.036.
- [4] LE VINE D M, LAGERLOEF G S E, COLOMB F R, *et al.* Aquarius: An instrument to monitor sea surface salinity from space[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2007, 45(7): 2040-2050. doi: 10.1109/TGRS.2007.898092.
- [5] VINE D M L, DINNAT E P, MEISSNER T, *et al.* Status of Aquarius/SAC-D and Aquarius salinity retrievals[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(12): 5401-5415. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2427159.
- [6] 殷小军, 张庆君, 王睿, 等. 海洋盐度探测卫星的现状分析和未来趋势[J]. 航天器工程, 2016, 25(1): 119-123. doi: 10.3969/J.ISSN.1673-8748.2016.01.016.
YIN Xiaojun, ZHANG Qingjun, WANG Rui, *et al.* Development status and trends of sea surface salt satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2016, 25(1): 119-123. doi: 10.3969/J.ISSN.1673-8748.2016.01.016.
- [7] LIU Hao, ZHU Di, NIU Lijie, *et al.* MICAP (Microwave Imager Combined Active and Passive): A new instrument for Chinese ocean salinity satellite[C]. Proceedings of IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Milan, Italy, 2015: 184-187.
- [8] NIU Lijie, LIU Hao, WU Lin, *et al.* Experimental study of an L-band synthetic aperture radiometer for ocean salinity measurement[C]. Proceedings of IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 418-421.
- [9] 李靖, 张俊荣, 赵凯. 实时定标微波辐射计[J]. 电子科学学报, 1998, 20(2): 285-288.
LI Jing, ZHANG Junrong, and ZHAO Kai. Real-time calibrated microwave radiometer[J]. *Journal of Electronics*, 1998, 20(2): 285-288.
- [10] 赵凯, 史久新, 张汉德. 高灵敏度机载L波段微波辐射计探测海表盐度[J]. 遥感学报, 2008, 12(2): 277-283.
ZHAO Kai, SHI Jiuxin, and ZHANG Hande. High sensitivity airborne L-band microwave radiometer measurements of sea surface salinity[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(2): 277-283.
- [11] LIU Hao, NIU Lijie, WU Lin, *et al.* IMI(Interferometric Microwave Imager): A L/S/C tri-frequency radiometer for Water Cycle Observation Mission(WCOM)[C]. Proceedings of IEEE International on Geoscience and Remote Sensing Symposium, Beijing, China, 2016: 3445-3447.
- [12] WU Lin. Contribution to spatial bias mitigation in interferometric radiometers devoted to earth observation: Application to the SMOS mission[D]. [Ph.D. dissertation], Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), 2014.
- [13] GOODBERLET M A and MEAD J B. Measuring precision and accuracy drift of radiometer-reported brightness temperature[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3827-3831. doi: 10.1109/TGRS.2008.2001034.
- [14] GOODBERLET M A and MEAD J B. Two-load radiometer precision and accuracy[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2006, 44(1): 58-67. doi: 10.1109/TGRS.2005.860206.
- [15] WILSON W J, TANNER A, and PELLERANO F. Ultra stable microwave radiometers for future sea surface salinity missions[C]. Earth Science Technology Conference, Pasadena, USA, 2002: 11-13.

牛立杰: 男, 1974年生, 博士生, 副研究员, 研究方向为辐射计系统及定标技术。

刘 浩: 男, 1978年生, 研究员, 研究方向为干涉式综合孔径辐射计的系统 and 信号处理。

吴 季: 男, 1958年生, 研究员, 主要从事微波遥感及空间探测方面研究。