

基于复用接收机的地基 L 波段辐射计-散射计一体化系统

杨世杰^{1,2} 郭伟¹ 王彩云¹ 梁珍珍^{1,2} 邢晴^{1,2}

1(国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 面向星载 L 波段主被动微波载荷地面校验需求, 提出一种基于复用接收机的地基 L 波段辐射计-散射计一体化系统。针对传统地基主被动组合系统依赖专用仪器、多设备搭建、成本较高且难以灵活重构的问题, 提出一种共享天线、射频前端和数字基带资源的复用接收机方案, 通过同一接收机链路分时完成被动亮温接收与主动回波接收, 在同一平台上实现辐射计与散射计一体化测量, 从而降低系统硬件复杂度并构建统一的双模式测量流程。在此基础上, 结合可配置射频与数字基带平台的灵活配置能力, 设计了主动与被动自动切换时序, 实现了系统测量、处理与输出的统一组织。实验结果表明, 该系统能够稳定获取后向散射系数与亮温数据, 且其随观测角变化的响应趋势与相应散射模型和辐射经验模型总体一致, 主被动联合反演土壤含水量的效果显著优于主动或被动反演效果。该研究为低成本、小型化地基主被动微波观测平台的构建提供了一种可行技术路径, 并可作为今后星载 L 波段主被动微波载荷的地面校验、真实性检验以及地球物理参数微波观测与电离层传播效应影响分析提供技术支撑。

关键词 辐射计-散射计系统; 复用接收机; L 波段; 主被动联合测量; 校验

中图分类号 V447

* 基金项目:

投稿日期:

E-mail: yangshijie21@ucas.ac.cn

A Ground-Based Integrated L-Band Radiometer– Scatterometer System Based on Receiver Sharing

Yang S^{1,2} Guo W¹ Wang C¹ Liang Z^{1,2} Xing Q^{1,2}

¹ (*Key Laboratory of Microwave Remote Sensing Technology, National Space
Science Center, Beijing 100190*)

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

Abstract To support the ground calibration and validation of spaceborne L-band active–passive microwave payloads, this study develops an integrated ground-based L-band radiometer–scatterometer using a multiplexed receiver architecture. Conventional active–passive observation systems often rely on separate instruments and independently configured antennas, radio-frequency front ends, data-acquisition units, and processing platforms, resulting in increased hardware complexity, deployment costs, and limited flexibility. The proposed system shares the antenna, radio-frequency front end, and digital baseband resources between radiometric and scatterometric measurements. Through time-division operation, the common receiver alternately acquires passive microwave brightness temperature and active radar echoes, while an automatic switching sequence coordinates signal transmission, reception, data acquisition, digital processing, and result output. This approach establishes a unified dual-mode measurement procedure and improves the integration and reconfigurability of the observation system. Experimental results show that the system can stably obtain both normalized radar backscattering coefficients and microwave brightness temperatures. Their variations with observation angle exhibit physically reasonable trends and agree overall with the corresponding scattering model and radiometric empirical model. In addition, soil-moisture retrieval based on the combined active–passive observations performs better than retrieval using either active or passive data alone, demonstrating the complementary information provided by the two measurement modes. The proposed system provides a feasible technical approach for developing a compact, flexible, and relatively low-cost ground-based active–passive microwave observation platform. It can support the ground calibration, performance evaluation, and validation of future spaceborne L-band

microwave payloads, as well as the observation of geophysical parameters and the analysis of ionospheric propagation effects.

Key words Radiometer-scatterometer system; Multiplexed receiver ; L-band; Joint active and passive measurement; Calibration and Validation

0 引言

L 波段微波遥感是地球物理参数空间观测的重要手段之一，在海洋、陆地及冰冻圈等多类地球系统要素监测中具有广泛应用。其波长较长，兼具一定的植被和土壤穿透能力，并对介电常数变化较为敏感，因此在海表盐度、土壤水分、冻融状态及相关地表参数遥感中具有独特优势。对于同一观测目标，主动微波观测获取的后向散射信息主要反映目标的几何结构、表面粗糙度及介电散射特性，被动微波观测获取的亮温信息则更直接关联地表发射率、物理温度及热辐射过程。二者面向同一地表介质，但响应机理不同、敏感因素互补，因此辐射计—散射计系统的主被动联合观测能够为地表参数反演、物理模型验证及真实性检验提供比单一传感器更强的物理约束^[1]。

从空间遥感发展看，L 波段主被动联合观测的技术路线已经被多种任务所验证。Aquarius 由 L 波段辐射计和散射计组成，其中辐射计用于亮温测量，散射计用于海表粗糙度修正^[2]；SMAP 则采用 L 波段雷达与辐射计对土壤水分和冻融状态进行协同观测^[3]。欧洲航天局的 SMOS 任务作为首个星载 L 波段干涉式微波辐射计任务，面向土壤水分与海表盐度形成了成熟的被动观测能力^[4]；日本 JAXA 则围绕 ALOS/PALSAR、ALOS-2/PALSAR-2 以及 2024 年发射的 ALOS-4/PALSAR-3 持续推进 L 波段主动遥感载荷发展 Error: Reference source not found；欧美联合方面，NASA 与 ISRO 合作的 NISAR 任务将 L 波段 SAR 作为核心载荷之一，进一步表明 L 波段在全球陆表、水文和冰冻圈观测中的重要应用价值 Error: Reference source not found。这些任务表明，L 波段载荷体系已在海洋、陆地及农业遥感等领域形成较为完整的主动、被动及主被动协同观测基础，也对地基观测系统在机理研究、真实性检验和星载载荷地面校验方面提出了更明确需求。

目前开展主被动测量观测是遥感观测的趋势，如 Hofste 联合国内大学在青藏高原玛曲地区开展了持续一年的地基微波观测试验，在此基础上结合 L 波段辐射计同步测量。这些工作表明联合观测能够更完整地表征地表土壤水分与温度变化过程，对遥感机理分析和参数反演具有重要意义^[6]。而目前除星载系统外，已有的机载和地基主被动系统有机载 PALS^[2]、地基的 ComRAD^[9]和国内早期的 X 波段散射计辐射计组合系统^[10]。他们的组合方式是使用同一天线，但是模拟线路分离，将两套接收机组合在一个系统中达到主被动测量的目的。其特点是共享天线、体制成熟，辐射计和散射计具备各自的接收机，如图 1 所示。

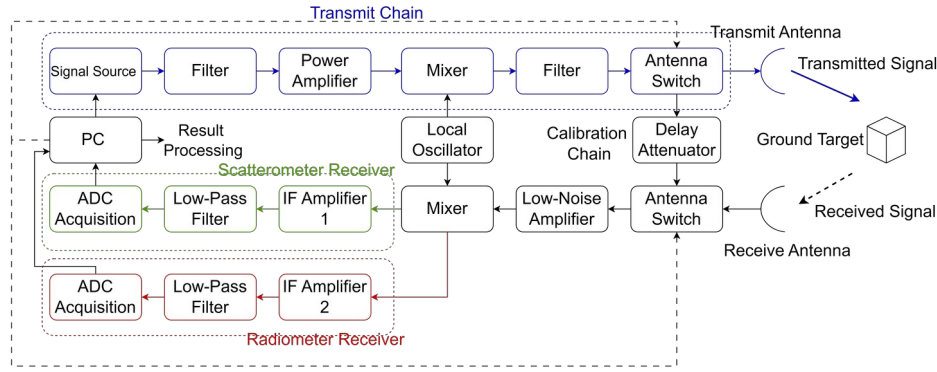


图1 现有的辐射计-散射计系统简图

Figure 1 Schematic diagram of existing radiometer-scatterometer systems

由上图可见，由于辐射计通常需要几十兆到几百兆赫的带宽，而散射计所需带宽通常几十到几百千赫的量级，因此需要使用不同的接收机。现有的辐射计-散射计系统的接收机具备辐射计接收机和散射计接收机，这使得他们的接收链路会存在差异，在主被动测量中引入更多的误差。对于面向地面校验与农田长期观测的原型系统而言，这种的方案需要更加复杂的系统设计，体型大的定制模拟器件，高昂的成本以及无法统一的接收链路，给主被动测量带来巨大的挑战。

近年来，可配置射频与高速数字基带平台的快速发展，为构建低成本、小型化、可重构的地基辐射计-散射计的主被动一体化系统提供了新的工程路径^{[11][12]}。该平台具有波形可编程、参数可配置、软硬件边界清晰、灵活性强及系统扩展性强等特点，其系统带宽、滤波器、系统增益与发射衰减等系统参数可通过软件定义修改。因此本文面向高速数字信号传输与处理架构，在共享天线和统一控制接口的基础上，将接收资源复用扩展到接收机层面，通过同一接收机主链路分时完成被动亮温接收与主动回波接收，在基带完成信号处理工作，从而避免为辐射计和散射计分别配置独立接收机，降低系统硬件复杂度，并减小链路差异带来的附加误差。基于上述思路，本文面向星载 L 波段主被动微波载荷地面校验及相关地球物理参数观测需求，提出一种基于复用接收机的地基 L 波段辐射计—散射计一体化系统。系统采用可配置射频与数字基带平台构建统一观测架构，在接收链路复用基础上进一步组织主动与被动双模式工作流程，形成一体化工作模式与自动测量时序，实现辐射亮温与后向散射测量的统一组织，最后，通过系统定标与外场试验，对主动与被动链路的测量有效性及方案合理性进行验证，为星载 L 波段主被动微波载荷的地面校验、真实性检验以及相关传播效应分析提供地基观测支撑。

1 基于复用接收机的辐射计散射计测量系统

面向星载 L 波段主被动微波载荷地面校验与农业场景观测需求，地基辐射计—散射计系统需要在同一观测条件下分别完成亮温与后向散射测量，并尽可能保证两类观测在时间

组织和观测几何上的一致性。已有主被动组合系统表明，辐射计与散射计联合测量在工程上是可行的，但现有地基系统多采用专用仪器、车载平台或多设备组合方式构建，通常需要分别配置主动与被动接收链路，因而存在硬件规模大、搭建复杂、成本高以及系统重构灵活性不足等问题。对于面向外场部署和长期观测的地基原型系统而言，如何在保证基本测量能力的前提下降低硬件复杂度和搭建成本，是系统实现首先需要解决的问题^[13]。

1.1 复用接收机法

针对传统地基主被动组合系统通常采用独立辐射计和独立散射计分别完成测量、硬件规模较大且搭建复杂的问题，本文提出一种复用接收机法。其基本思想是在共享天线和统一控制接口的基础上，通过分时方式复用同一接收机主链路，共同完成被动亮温接收与主动回波接收，而不再为辐射计和散射计分别配置独立接收机，如图 2 所示。本系统根据主动模式和被动模式选择的不同，执行对应现场可编程门阵列（FPGA）程序和收发射频芯片的配置，达到重构的接收链路的效果。对被动模式而言，该接收机用于采集目标自然热辐射和内部参考信号，得到辐射亮温 T_B ；对主动模式而言，同一接收机用于接收目标回波并进入后续数字处理流程，得到后向散射系数 σ^0 。通过这种方式，可在保持双模式观测能力的同时减少一套独立射频接收链路，从而有效降低系统硬件搭建成本，并减小不同接收链路间响应差异带来的附加误差。

与已有复用天线方案不同的是，本文所采用的方法依托可配置射频—高速数字基带平台，将接收资源复用延伸到数字基带处理层。以 AD9361 为代表的射频收发芯片及其相关高速数字基带平台，具备射频参数软件可配置、收发模式可切换以及高速数字接口传输等特点，可对接收增益、发射功率、工作频点、通道使能状态及收发工作方式进行灵活设置^{[14][15]}。同一接收机链路能够在主动与被动两种工作状态之间快速切换，并在统一硬件平台上完成信号接收与后续数字处理。相较于传统系统，这种方式不仅有利于压缩模拟链路长度，也便于在数字基带层统一组织两类观测的数据流与控制逻辑，从而为后续自动测量时序设计和一体化系统实现提供基础。

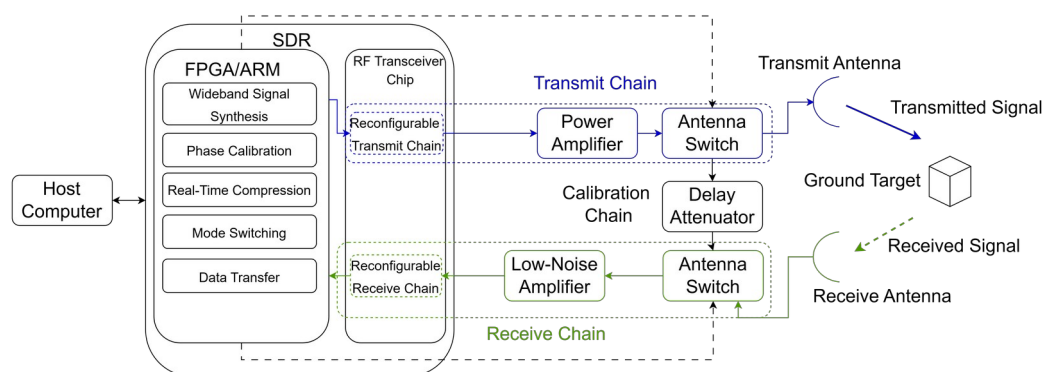


图 2 复用接收机法的辐射计-散射计系统简图

Figure 2 Schematic diagram of the radiometer-scatterometer system based on the receiver-sharing method

在上述方法基础上，本文系统围绕同一目标场景构建被动辐射测量链路和主动散射测量链路，并分别输出亮温 T_B 与后向散射系数 σ^0 两类观测量。

对于被动通道，其任务是在给定观测角和极化条件下获取目标场景的亮温。依据普朗克定律的瑞利-金斯近似，目标谱亮度与亮温满足线性关系，而天线接收功率与天线温度满足功率—温度关系^[1]：

$$P = k T_A B \quad (1)$$

式中， P 为接收功率， k 为玻尔兹曼常数， B 为接收机等效噪声带宽， T_A 为天线温度。在窄波束和目标近似均匀条件下，可近似认为 $T_A \approx T_B$ 。进一步地，亮温与地表物理温度之间满足发射率关系，简化条件下可写为：

$$T_{B,p}(\theta) \approx e_p(\theta) T_s + [1 - e_p(\theta)] T_{sky} \quad (2)$$

式中， $e_p(\theta)$ 为极化 p 和观测角 θ 条件下的等效发射率， T_s 为地表物理温度， T_{sky} 为天空背景辐射温度。该式表明，亮温本质上是地表发射项与背景辐射反射项共同作用的结果，因此能够表征目标发射率、物理温度及极化—角度响应特征。

对于主动通道，其任务是获取目标场景的后向散射信息。对分布式地表目标，后向散射系数 σ^0 通常作为归一化散射量表征，其与雷达散射截面积 σ 的关系为：

$$\sigma^0 = \frac{\sigma}{A_e} \quad (3)$$

式中， A_e 为有效照射面积。根据单基地雷达方程，目标回波功率与雷达散射截面积之间满足：

$$P_r = \frac{P_t G_t^2 \lambda^2 \sigma}{4\pi R^4}$$

其中 P_t 为发射功率， λ 为工作波长， G_t 和 G_r 表示发射天线与接收天线增益， R 为目标距离。由此，系统主动通道可由接收回波功率得到 σ ，并进一步得到后向散射系数 σ^0 。相较于亮温， σ^0 对地表粗糙度、结构尺度和散射机制变化更为敏感。

因此，在复用接收机法框架下，亮温 T_B 与后向散射系数 σ^0 并非由两套独立接收系统分别获得，而是通过同一接收机主链路在不同工作状态下分时完成测量：被动模式下采集目

标热辐射信号，主动模式下采集目标回波信号。该方式在保持两类观测量物理内涵相互独立的同时，实现了系统接收链路的统一，并为后续一体化观测架构构建及自动测量时序组织提供了基础。

1.2 系统架构与硬件实现

在实现层面，本文采用由 AD9361 射频收发芯片和 ZYNQ-7020 可编程处理器构成的可配置射频—数字平台实现辐射计—散射计一体化系统，其系统框图见图 3。其中，AD9361 作为射频收发核心，负责射频信号的上下变频、模数/数模转换及通道参数配置；ZYNQ-7020 则依托处理系统（Processing System，PS）/可编程逻辑（Programmable Logic，PL）协同结构完成系统配置、工作模式控制、高速采样、缓存调度及数字处理。系统总体由双极化天线、射频切换与参考网络、主动发射链路、复用接收机主链路、数字处理单元以及上位机接口组成。双极化天线承担统一前端发射与接收功能；射频切换与参考网络负责主动/被动模式切换，以及目标端口、参考端口与校准链路之间的连接配置；复用接收机主链路则在不同工作状态下分别承担亮温接收与回波接收任务。考虑到该平台瞬时带宽受限，主动测量中采用多子带步进方式构造等效宽带，并通过校准链路恢复子带间相干关系；被动测量则通过功率积分完成亮温相关观测量采集^{[16][17]}。由此，系统能够在统一平台上分别实现后向散射系数与亮温测量，为主被动联合观测提供基础。

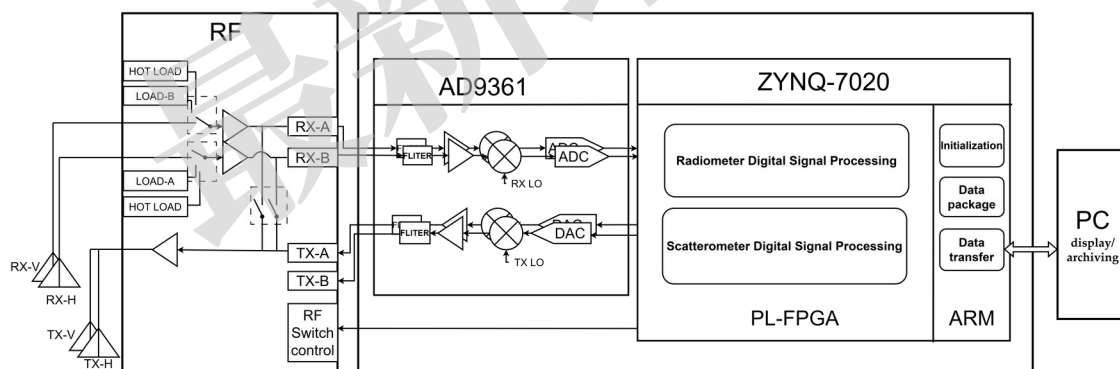


图 3 基于复用接收机的辐射计—散射计一体化系统框图

Figure 3 Block diagram of the receiver-sharing radiometer-scatterometer system

系统的主要参数与指标具体为下表：

表 1 系统参数表

Table 1 System parameter table

名称	参数
----	----

频率范围	1.3GHz~1.5GHz(L)
主动模式带宽	200MHz (合成)
主动模式时宽	1ms
被动模式带宽	40MHz
被动模式时宽	75ms
天线极化	VV、HH、VH、HV
最大发射功率	25dBm
调制波形	多子带 LFM
天线 3dB 波束宽度	3.8°(L)
天线主瓣增益	27.0dB(L)
接收机动态范围	50dB
隔离度	≥50dB
系统噪声因子	2.21dB

表 2 系统指标表

Table 2 System specifications

名称	参数
最大作用距离	150m
距离分辨率	0.75m
散射计接收机灵敏度	≤-120dBm
辐射计等效噪声温度	1250K

其中，考虑到面向高分辨率星载校验的有效性，本系统需具备优于星载 SAR 米级距离分辨率的能力^[18]，确定主动模式的距离分辨率为 0.75m，对应主动模式具备 200MHz 的合成宽带。此分辨率可以反映自然地表的平均散射特性，不会因为分辨率过低混入不同的地物单元，也不会因为分辨率太高使得局部测量非均匀性过强。

从典型地表散射水平来看，主要观测角度为 10°~70°，L 波段农田和植被目标的散射系数 σ^0 变化范围大致位于 -40 dB 至 10 dB 之间，动态范围需要大于 50dB；考虑到系统在

50m 高塔工作和参数统一条件，系统按约 150m（双程时宽约 1us）的最大作用距离进行设计。考虑器件能力和工程实现约束，发射机功率不宜设置过高，本文将发射功率确定为 25 dBm，且信号隔离度大于射频芯片 50dB 的隔离度。在此条件下，系统需要完成最大作用距离，散射系数低至 -40 dB 目标的有效测量，L 波段最弱目标回波为 -74.3dBm。本系统散射计采用脉冲压缩体制雷达，接收机灵敏度可由接收机热噪声公式和脉冲压缩比^[19]共同确定，若需要获得 D=14dB 的识别因子，接收机灵敏度为 -127.8dBm，远低于目标最弱回波，说明系统具有足够的弱回波检测能力。

对于被动模式，接收机前端损耗为 4dB，考虑天线温度 290K 的情况下，由等效噪声温度公式^[1]可得到天线口面的等效噪声温度为 1222K。Dicke 型辐射计（即通过参考源/目标源切换抑制接收机增益波动的辐射计体制）其温度分辨率一般可由辐射计方程表示^[1]，若在天线温度 290K 的情况下达到优于 1K 的温度分辨率，需要进行 75ms 的功率积分。因此由计算可知，系统实际性能均优于系统指标。

2 复用接收机法的双模式测量流程与数据流设计

2.1 双模式工作链路

为实现 σ^0 与 T_B 的测量，系统设置主动散射测量模式和被动辐射测量模式两种基本工作状态。其总体工作链路如下图。

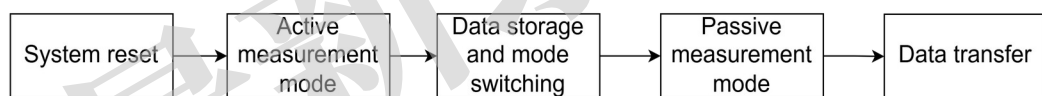


图 4 总体工作链路图

Figure 4 Overall workflow diagram

2.1.1 主动散射测量模式

在主动模式下，系统主要完成目标后向散射测量。考虑到平台瞬时带宽有限，难以直接通过单次宽带收发获得高距离分辨结果，因此采用多子带步进测量方式构造等效宽带。系统首先按照预设频点序列依次切换至各个子带，在每个子带内完成发射波形配置、目标回波采集以及必要的脉冲重复和相干积累，以提高单子带测量质量^[20]。

由于多子带采用分时方式完成测量，虽使用同一接收机接收回波信号，但不同子带之间会受到本振重锁定、链路状态变化和初始相位随机性的影响，从而引入子带间相位不一致问题。若不进行校正，直接拼接各子带频谱会导致合成结果主峰展宽、旁瓣升高甚至距离定位偏移。因此，在主动测量流程中，系统在各子带目标采集之前引入校准链路测量参考响应，并提取当前子带的相位补偿量，用于恢复子带间相干关系。完成相位校准后，各子带数据在板端依次进入局部处理流程，先完成频域变换和频谱搬移，待全部子带采集结

束后，再统一进行频域拼接、匹配滤波和脉冲压缩，最终获得目标距离向响应，并在后续处理中得到后向散射量^[21]。

因此，主动散射测量模式的核心流程可概括为下图：

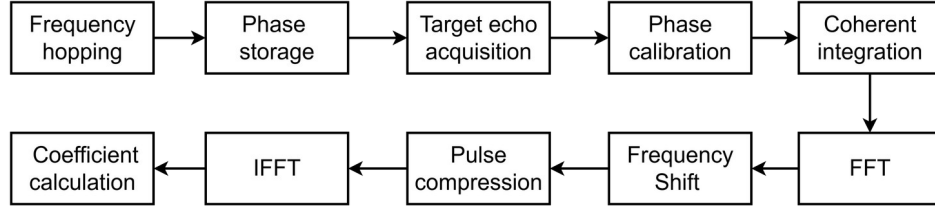


图 5 主动散射测量模式核心流程图

Figure 5 Flowchart of the active scattering measurement mode core

由此，主动散射测量链路实现了基于多子带合成的高距离分辨测量。

2.1.2 被动辐射测量模式

在被动模式下，系统关闭主动发射链路，仅保留接收通道，用于获取目标场景的自然热辐射信息。被动辐射测量采用参考切换与功率积分相结合的方式完成亮温测量。系统首先切换至内部参考端口，对参考状态进行采样；随后切换至目标观测端口，在设定积分时间内对目标场景接收功率进行积分统计，获得与天线温度对应的输出量^[22]。

考虑到本文研究重点在于系统架构与测量链路建立，被动模式下的板端处理主要完成状态切换控制、功率积分和基础数据缓存，不进一步在板端完成完整亮温反演。积分结果经 PS 侧统一打包后传输至上位机（PC）端，由上位机结合参考数据完成亮温计算、曲线绘制和结果显示。该流程既保留了板端控制和采集链路的统一性，也提高了辐射测量参数调整和模型分析的灵活性。

因此，被动辐射测量模式的核心流程可概括为下图：

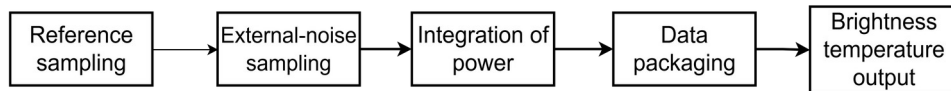


图 6 被动辐射测量模式核心流程图

Figure 6 Flow chart of the core of passive radiometry mode

由此，被动辐射测量链路实现了功率积分和亮温输出的分步测量流程。

主动与被动模式虽然在信号组织和处理重点上存在明显差异，但二者共享同一套天线、射频前端、复用接收机主链路和数字基带平台，并在统一控制逻辑下按固定时序依次执行。

因此，本文系统并非两个独立测量系统的简单叠加，而是在同一硬件平台上通过模式切换实现的双模式一体化测量系统，下面将基于此工作链路开展时序设计工作。

2.2 自动测量时序设计

在完成复用接收机法下的双模式链路定义后，还需进一步解决主动与被动测量在统一平台上的顺序组织、状态切换与数据流闭环问题，因此有必要设计与该一体化架构相匹配的自动测量流程与板端实现方式。对于一体化双系统而言，需要将主动和被动测量组织为一个可自动运行的整机观测周期。本文将一个完整测量周期划分为六个基本阶段：主动散射测量、模式切换、被动参考更新、被动目标亮温测量、板端处理和结果输出，时序简图如图所示。

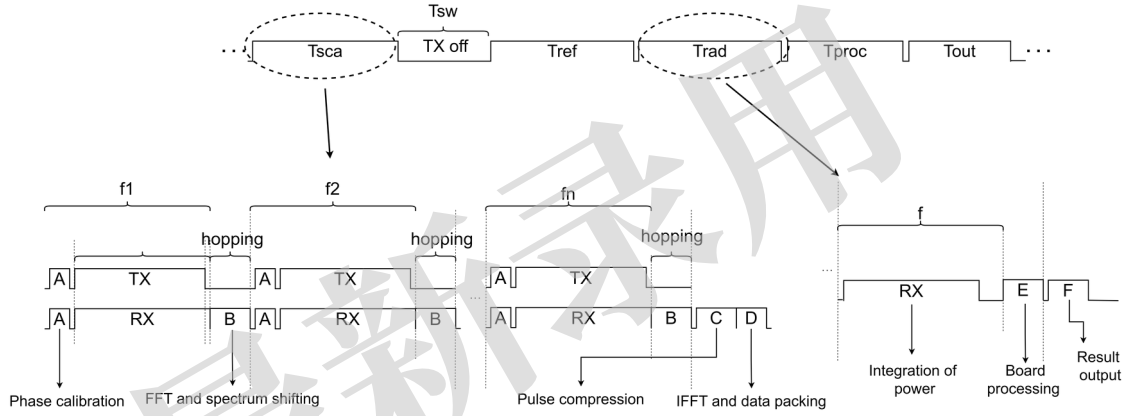


图 7 辐射计-散射计一体化自动测量时序图

Figure 7 Automatic measurement timing diagram of the integrated radiometer-scatterometer system

整机观测周期可表示为：

$$T_{cycle} = T_{sca} + T_{sw} + T_{ref} + T_{rad} + T_{proc} + T_{out} \quad (5)$$

其中， T_{sca} 为主动散射测量时长， T_{sw} 为主被动模式切换时长， T_{ref} 为被动参考更新时长， T_{rad} 为亮温积分采样时长， T_{proc} 为板端处理时长， T_{out} 为数据输出时长。为保证系统能够持续稳定运行，需满足板端处理时间不阻塞下一轮观测启动，即：

$$T_{proc} \leq T_{cycle} \quad (6)$$

在实际组织中，系统首先执行主动模式，依次完成跳频、回波采样、参考校准和板端处理；随后切换至被动模式，完成参考功率和目标功率的积分测量，并由上位机完成亮温

计算和结果输出。这样，目标散射测量和亮温测量可在一个统一周期内依次完成。与传统人工分步测量相比，该方式能够有效降低环境变化和系统漂移对结果分析带来的附加误差，也更符合长期自动观测与外场快速实验的工程需求。

2.3 数据流组织

在数据流组织上，系统遵循“前端局部处理、后端统一输出”的原则。主动模式下，在本文系统参数配置下，主动测量采用 5 个 40MHz 子带构造等效 200MHz 总带宽。5 个子带回波在完成采集后即可立即进入相应缓存和局部处理阶段，避免原始数据长期滞留；全部子带拼接完成后，再集中执行统一匹配滤波与脉压，从而减少重复计算，得到等效带宽 200MHz 的信号脉压结果。被动模式下，亮温采样链路则在观测时间内完成 5 个 40M 子带的各自功率积分，并经 PS 侧统一打包，通过 TCP 协议传输至 PC 端进行后续亮温恢复和结果显示。流程简图如图。

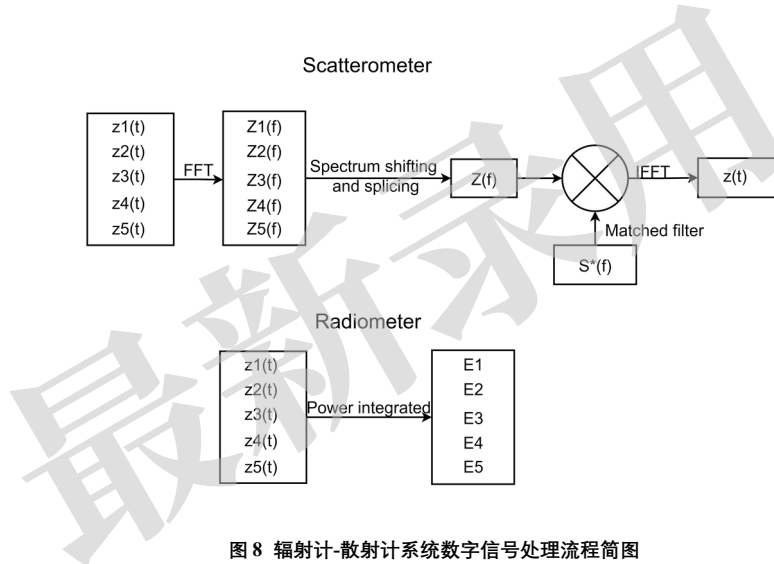


图 8 辐射计-散射计系统数字信号处理流程简图

Figure 8 Schematic diagram of digital signal processing flow for radiometer-scatterometer system

由此，本文相较于传统“两个系统分别搭建、实验阶段再人为组合”的实现方式，构建了一套在统一硬件平台上按固定时序运行、统一数据流组织和明确任务划分的一体化双模式测量架构。

3 试验验证与结果分析

为验证本文所构建的基于复用接收机的 L 波段辐射计—散射计一体化系统在主动与被动两类测量任务中的可用性，本章首先简要说明亮温与后向散射量的定标原理，随后结合典型场景实验，分别对后向散射系数与亮温测量结果进行分析，并与相应模型进行对比和分析。

3.1 辐射定标与散射定标

3.1.1 辐射定标原理

本文辐射计采用被动通道采用 Dicke 型辐射计脉冲噪声注入法^[23]进行亮温定标。如图 9 所示，采用单刀三掷开关实现天线端、热参考端和冷参考端之间的时序切换测量。热参考端与冷参考端均为匹配负载，其等效参考温度分别记为 T_H 和 T_L ，在本系统中，热参考端为高温匹配负载，冷参考源为常温匹配负载，因此二者参考温度为已知量。

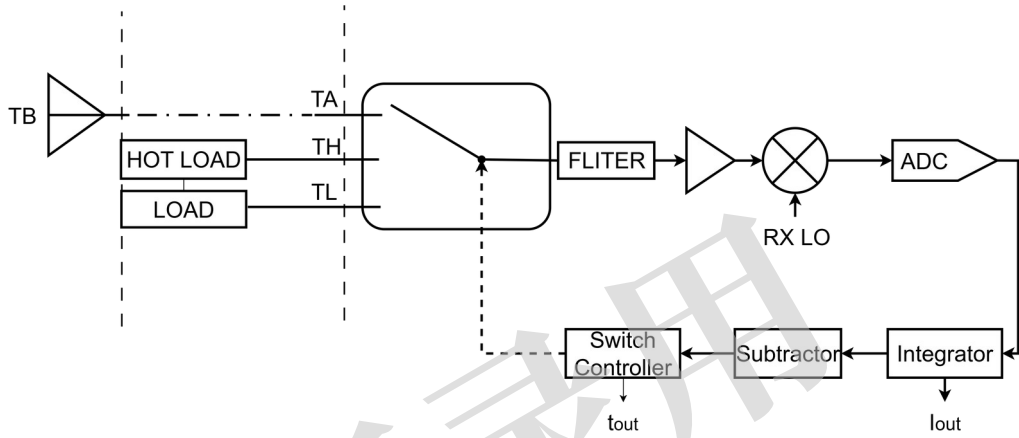


图 9 测量端与参考端辐射温度示意图

Figure 9 Schematic diagram of the radiation temperature at the measurement port and reference port.

系统在数字域完成平方律检波、积分累加以及零平衡控制，不再采用传统模拟噪声源幅度调制方式^[1]，而是通过调节热参考端在一个测量周期内的接入时长，实现对天线观测量的等效脉冲补偿。

设某一测量周期内，天线端、热参考端和冷参考端的接入时间分别为 t_A 、 t_H 和 t_L ，并满足：

$$t_L = t_A + t_H \quad (7)$$

以保证信号支路与参考支路具有相同的总积分时间。记接收机增益为 G ，接收机等效噪声温度为 T_R ，三个阶段经检波积分后的输出可写为：

$$I_A = G(T_A + T_R)t_A \quad (8)$$

$$I_H = G(T_H + T_R)t_H \quad (9)$$

$$I_L = G(T_L + T_R)t_L \quad (10)$$

示意图如图 10。

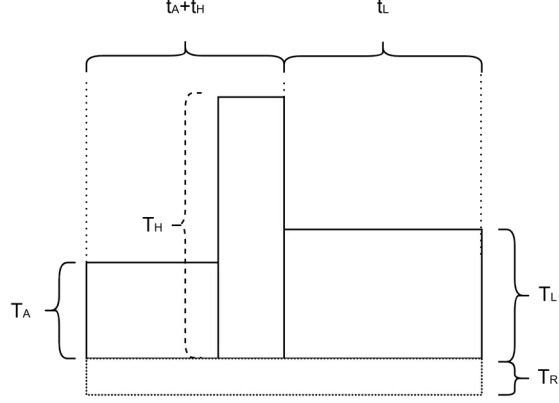


图 10 噪声注入法示意图

Figure 10 Schematic diagram of the noise injection method.

其中， T_A 为天线支路经前端传输后到达接收机输入参考面的等效温度。将天线阶段与热参考阶段合并为信号支路，并与冷参考阶段构成参考支路，则零平衡误差可表示为：

$$\Delta I = G(T_A t_A + T_H t_H - T_L t_L) \quad (11)$$

可以看出，在信号支路和参考支路积分时间相等的条件下，公共接收机噪声项 T_R 被抵消，因此系统零平衡仅由天线项与两路参考项之间的积分关系决定。当系统达到零平衡时，有：

$$\Delta I = 0 \quad (12)$$

由此可解得天线支路在接收机输入端的等效温度为：

$$T_A = \frac{T_L t_L - T_H t_H}{t_L - t_H} \quad (13)$$

该式表明，系统可通过已知热、冷参考温度以及测得的热参考接入时长，反演得到接收机输入端的等效天线温度。

对于天线支路，若将天线口至接收机输入参考面之间的无源网络等效为总功率传输系数 η_A ，其物理温度记为 T_p ，则在忽略失配影响时，天线支路的辐射传递关系可写为：

$$T_A = \eta_A T_B + (1 - \eta_A) T_p \quad (14)$$

将零平衡解得的 T_A 代入后，可得：

$$T_B = \frac{1}{\eta_A} \left[\frac{T_L t_L - T_H t_H}{t_L - t_H} - (1 - \eta_A) T_p \right] \quad (15)$$

3.1.2 后向散射截面定标原理

主动通道的输出首先表现为距离压缩后的目标回波响应。由于低成本 SDR 存在收发本振相位不同步及通道差异性，先对齐进行距离定标和极化通道定标，得到距离准确和通道平衡的极化通道。后将目标回波响应转化为具有物理意义的散射量，本文采用参考标准体建立系统输出与目标雷达散射截面之间的映射关系。设参考标准体的理论雷达散射截面积为 σ_{ref} ，其净回波功率为 P_{ref} ，距离为 R_{ref} ；待测目标净回波功率为 P_{tar} ，距离为 R_{tar} ，则可写为：

$$\sigma_{tar} = \sigma_{ref} \frac{P_{tar}}{P_{ref}} \left(\frac{R_{tar}}{R_{ref}} \right)^4 \quad (16)$$

式中， σ_{tar} 为目标雷达散射截面。对分布式地表目标，进一步可得到后向散射系数：

$$\sigma^0 = \frac{\sigma_{tar}}{A_e} \quad (17)$$

其中， A_e 为有效照射面积。由此，主动通道输出可由目标回波功率得到后向散射系数 σ^0 ，从而为后续与模型开展趋势对比提供基础。

3.1.3 定标结果

(1) 辐射计定标结果

通过脉冲噪声注入法对辐射计系统进行标定后，将装有液氮的冷源校准室作为参考冷源开展冷源测量，同时在室温 25.6℃ 开展黑体测量，测量结果如下表。

表 3 L 波段辐射模式测量结果统计表

Table 3. Statistical table of L-band radiometric-mode measurement results.

极化通道	测量参考	理论亮温/K	测量亮温/K	测量误差/K
H 极化	冷源	80.30	80.42	0.12
H 极化	室温	298.75	298.06	-0.69
V 极化	冷源	80.30	80.37	0.07
V 极化	室温	298.75	298.69	-0.06

从统计结果来看，辐射测量模式在冷源（80.3K）和室温（298.75K）条件下的测量误差分别在-0.69K至0.12K之间，绝对平均误差为0.235。测量误差在±0.7K范围内，表明辐射计在实验条件下具有良好的测量稳定性和定标可靠性。

(2) 散射计定标结果

针对散射计系统，在不同距离处摆放直径0.5m，散射截面积为 1.37m^2 的龙伯透镜定标体进行主动散射功率测量。期间用激光仪和红外测距仪进行对准跟踪和距离的准确读取，精确记录每次测量距离，并对测量结果求多次平均。针对定标前和定标后的测量结果进行统计，得到图和表，其中图中蓝色虚线为理论功率回波值。

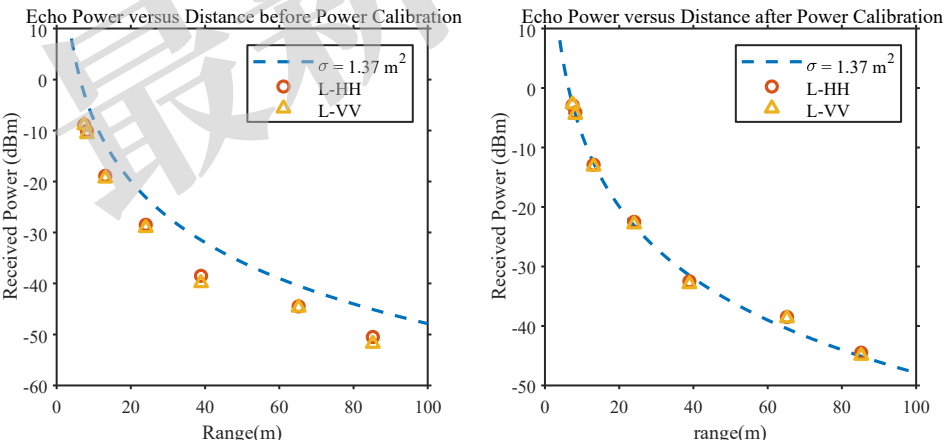


图 11 散射测量模式定标前后结果图

Figure 11 Results of the scattering measurement mode before and after calibration.

其定标前后的平均绝对差计算结果见表

表 4 L 波段校准前后的同极化通道的平均绝对差统计表

Table 4. Statistical table of the mean absolute differences of co-polarized channels before and after L-band calibration.

极化方式	校准前平均绝对差/dB	校准后平均绝对差/dB
L 波段 HH 极化	4.98	0.39
L 波段 VV 极化	4.77	0.36

结果显示，L 波段 HH、VV 通道的平均绝对差分别由 4.98dB 和 4.77dB 降低至 0.39dB 和 0.36dB，可见，经过散射定标后，各通道与理论值之间的偏差均显著减小，平均误差被压缩至 0.5dB 以内，验证了定标方法的有效性，系统散射测量精度优于 0.4dB，符合遥感测量精度要求。

3.2 试验场景与执行流程

外场试验采用本文构建的一体化平台开展 L 波段角度扫描测量，车载一体化平台将对照抽穗期的玉米田地进行 $10^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 入射角扫描测量，如图 12 所示。在保持测量距离、平台方位和天线高度基本一致的条件下，围绕目标场景逐步改变观测入射角，并分别完成主动散射测量和被动亮温测量。主动测量部分用于获取不同极化条件下的后向散射系数曲线，被动测量部分用于获取不同极化条件下的亮温曲线。通过将两类测量结果与相应模型进行比较，可对系统主动与被动测量链路的有效性和合理性进行验证。

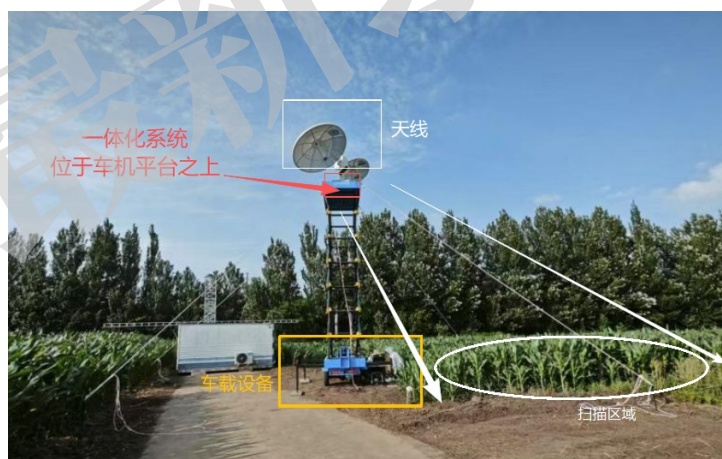


图 12 现场实验图

Figure 12 Field experiment diagram

在执行流程上，主动模式按照多子带步进测量体制依次完成频点切换、校准链路采样、目标回波采集、相干积累、频域拼接与统一脉压，并在此基础上得到目标后向散射量；被动模式则通过参考端口与目标端口切换完成接收功率采样和积分统计，经数据打包传输后由上位机完成亮温计算和结果显示。两类测量均在统一平台上完成，但分别对应不同的工作状态与处理链路。

3.3 后向散射系数测量结果与 Tor Vergata 模型对比

TVG (Tor Vergata) 模型是一种基于矢量辐射传输理论的离散电磁散射模型，用简单几何散射体描述植被冠层，并考虑植被体散射、地表介电常数、表面粗糙度及特征尺度参数，可计算不同频率、入射角和极化条件下的后向散射系数^[24]。图 13 给出了 L 波段不同极化条件下散射测量结果随入射角变化的测量结果及其与 TVG 模型的对比情况。模型输出曲线中，黑色实线表示同极化 (copol) 预测结果，虚线表示交叉极化 (xpol) 预测结果。

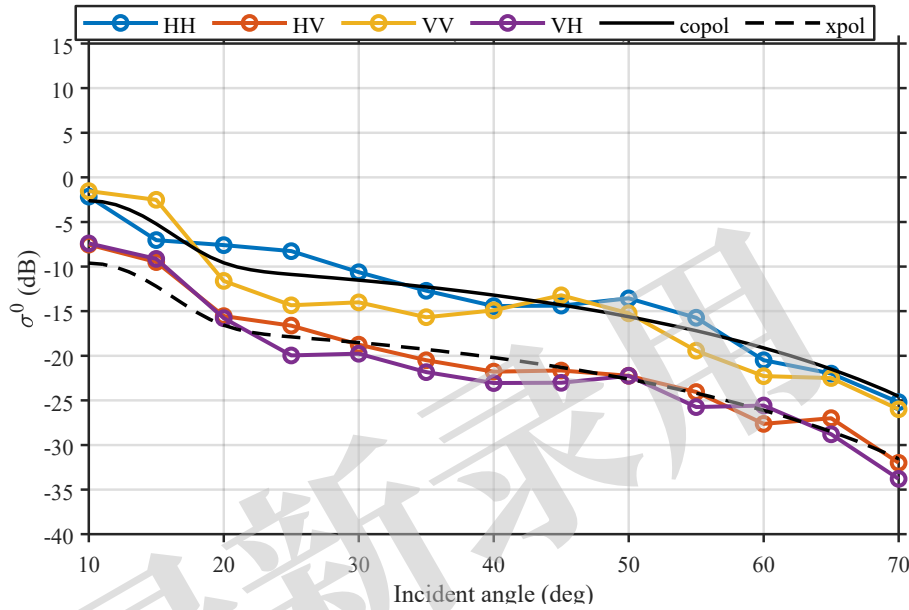


图 13 L 波段后向散射系数测量值和 TVG 模型随入射角变化情况

Figure 13 Measurement of backscattering coefficient and TVG model in L-band as a function of incidence Angle

从图 13 可以看出，在所选角度范围内，对于小入射角区域，由于目标回波中准镜面散射分量较强， σ^0 随角度增加下降较快；当入射角进一步增大后，曲线变化趋于平缓；而在较大入射角范围内，散射衰减速度再次增大，并伴随一定程度的局部起伏。这种由准镜面区、相对平缓区到干涉增强区的变化特征与地表微波散射的一般角度响应特征是一致的^[1]^[22]。进一步比较不同极化通道可见，同极化通道 HH 和 VV 的后向散射电平整体高于交叉极化通道 HV 和 VH，表明当前场景下仍以表面散射和准镜面相关散射机制为主，而去极化散射成分相对较弱。与此同时，HV 与 VH 两条曲线整体变化趋势较为接近，也说明系统在交叉极化测量上的通道一致性较好。

将实测结果与 TVG 模型进行对比可以发现，模型曲线与实测曲线在总体趋势上具有较好一致性，均表现出后向散射系数在小入射角区间相对较高、随角度增加逐渐下降的基本规律。局部角度处存在一定偏差，主要与实际目标场景在土壤湿度、表面粗糙度和植被结

构上的非均匀性有关，同时也与模型参数简化和外场观测环境扰动有关。但从系统能力验证的角度看，实测结果已经较好地再现了模型所描述的基本散射规律，说明本文系统在主动测量模式下能够稳定获取具有物理意义的 σ^0 数据。

为进一步定量评价测量结果的有效性，本文计算了后向散射系数曲线与对应模型曲线之间的统计评价指标，包括均方根误差（Root Mean Square Error, RMSE）、平均绝对误差（Mean Absolute Error, MAE）和决定系数（Coefficient of Determination, R^2 ）。其中，RMSE 用于表征实测值与模型值之间的整体偏差，MAE 用于表征平均绝对偏差， R^2 用于评价实测曲线与模型曲线变化趋势的一致性。相关统计结果如表 5 所示。

表 5 后向散射系数与模型统计评价指标表

Table 5 Statistical evaluation metrics for measured and TVG-modeled backscattering coefficients

极化方式	RMSE	MAE	R^2
HH	0.772	0.634	0.906
VV	1.015	0.976	0.896
VH	0.911	0.813	0.914
HV	0.875	0.788	0.916

由表 5 可见，各极化通道的决定系数均接近或高于 0.90，说明实测后向散射系数曲线与模型曲线具有较好的一致性，能够较好反映目标场景随入射角变化的散射响应规律。各通道 RMSE 处于 0.772–1.015dB 范围内，MAE 处于 0.634–0.976dB 范围内，表明实测结果与模型结果之间存在较小幅值偏差，与模型具有很好的相关性及符合度。

3.4 亮温测量结果与辐射经验模型对比

开展辐射亮温测量后，针对中心频率 1.4GHz、带宽 40MHz 的接收信号进行亮温计算，并给出不同极化条件下亮温随入射角变化的测量结果及 Ulaby 描述的亮度温度公式^[22]的拟合曲线，如图 14 所示。

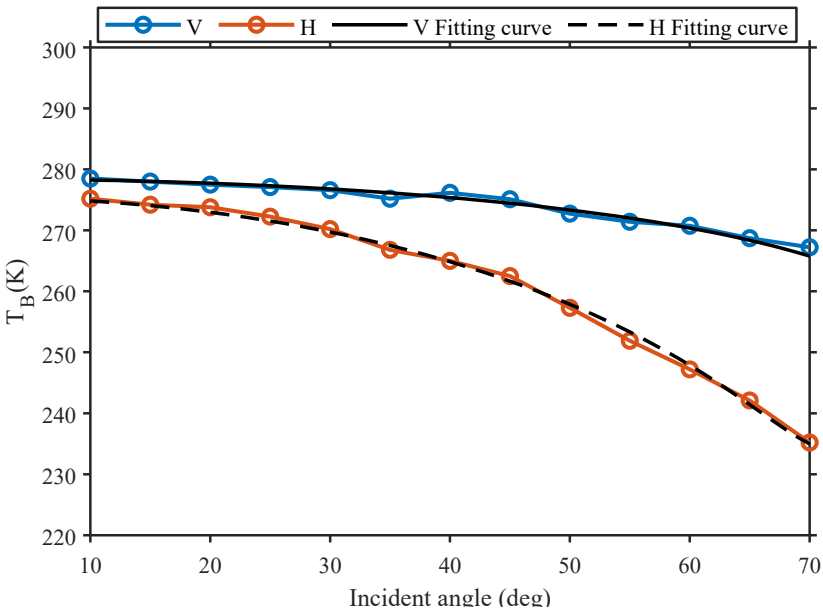


图 14 L 波段辐射亮温测量值和拟合曲线随入射角变化情况

Figure 14 Measurement values of radiant brightness temperature at L-band and fitting curve change with incidence Angle

由图 14 可见，实测亮温及其拟合结果呈现出较为一致的变化规律：在整个观测角范围内，V 极化亮温整体高于 H 极化；随着入射角增大，V 极化亮温变化相对平缓，而 H 极化亮温下降更为明显，因而 H、V 极化之间的差异在中大入射角区间进一步拉开。该规律与文献所描述的地表亮温极化—角度响应模型一致^{[1][22]}。相关地基辐射计观测结果也表明，L 波段 T_B 随入射角变化时，V 极化通常高于 H 极化，并形成明确的角度响应曲线^{Error: Reference source not found[26]}。

从已有文献结果对比结果看，实验结果较好地再现了亮温随角度和极化变化的总体趋势，尤其在 V、H 极化亮温分离以及中大入射角区间差异增强方面。实测曲线局部存在一定波动和偏差，这主要与地表物理温度分布不均匀、土壤湿度空间差异、背景辐射影响以及系统参考状态微小变化等因素有关。总体上，实测结果已经体现出清晰的极化差异和角度响应关系，表明本文系统在被动模式下能够输出具有合理物理意义的亮温观测结果。

为进一步定量评价测量结果的有效性，本文计算了辐射亮温曲线与对应模型曲线之间的统计评价指标，相关统计结果如下表所示。

表 6 辐射亮温与拟合曲线统计评价指标表

Table 6 Statistical evaluation metrics for measured brightness temperatures and fitted curves

极化方式	RMSE	MAE	R^2
H	1.89	1.60	0.917

V	1.60	1.49	0.908
---	------	------	-------

由表可见，H极化和V极化的决定系数分别为0.917和0.908，均高于0.90，说明实测亮温曲线与模型曲线具有较好的一致性，能够反映亮温随入射角变化的基本规律。两种极化的RMSE分别为1.89K和1.60K，MAE分别为1.60K和1.49K，表明模型与实测结果之间存在一定偏差，但整体误差处于较小范围内，与模型具有很好的相关性及符合度，符合遥感测量的需求。

3.5 后向散射系数与亮温测量结果的综合讨论

结合图13和图14可见，后向散射系数 σ^0 与亮温 T_B 对地表参数的敏感性存在明显差异。主动测量得到的 σ^0 更直接反映地表粗糙度、表面结构及散射机制变化；被动测量得到的 T_B 则更直接反映地表发射率和介电状态，并受到含水量和覆盖条件的共同影响^[27]。这种差异说明，辐射计—散射计联合观测能够从主动与被动两个互补维度表征地表场景，为地球物理参数观测和主被动协同分析提供更完整的物理信息。

从图13看，HH、VV共极化通道整体高于HV、VH交叉极化通道，且 σ^0 随入射角增大总体下降，说明当前场景仍以表面散射和准镜面相关散射为主，强去极化散射成分有限。其角度响应形态与文献中介于理想光滑表面和显著粗糙表面之间的经验模型较为接近^{[1][22]}，与当前测量环境的实际粗糙度特征相符。

从图14看，V极化亮温整体高于H极化，且V极化变化较缓、H极化下降更明显，表现出清晰的极化—角度响应。这一规律与经验模型一致，也与已有L波段地基辐射计在干燥情况下的观测结果具有较好可比性。相关研究表明，亮温角度响应与地表介电状态、表面结构及植被覆盖程度密切相关，而在较干燥或较弱覆盖条件下，H/V极化分离通常更为明显^{Error: Reference source not found[28]}。本文实测结果所呈现的明显H/V分离和整体变化趋势，与此类观测规律总体一致，说明被动测量链路能够有效反映场景的基本辐射特征。

进一步结合主动与被动结果可见，两类观测在物理上具有较好的互补性：一方面，主动测量显示交叉极化较弱，表明场景中体散射或强去极化散射贡献有限；另一方面，被动测量保持了清晰的H/V极化分离，说明场景辐射响应仍以表层发射率差异为主导，未被强烈体散射或厚层植被完全掩盖。因此，当前场景下主动与被动两类曲线均呈现出较清晰的角度响应规律，也表明该一体化系统能够在统一观测条件下获取具有一致物理指向的主被动信息。

现有多源遥感联合反演研究表明，被动微波常以 $\tau-\omega$ 模型描述植被覆盖条件下的亮温传输过程，主动微波则常结合水云模型或其改进形式表征植被对后向散射的调制；主被动联合的关键在于利用亮温对土壤水分敏感、散射对粗糙度和植被结构敏感这一互补性，对地表—植被系统进行协同约束^[27]。本文针对一片玉米地开展后向散射系数和亮温的联合测量，并使用针对主被动测量的水云- $\tau-\omega$ 模型是常见的主被动联合反演模型对土壤含水量

进行反演。反演将使用实地测量参数（如株高、叶面积指数、冠层含水量、植被温度、土壤温度、土壤粗糙情况等），可以得到水云模型， $\tau-\omega$ 模型以及水云- $\tau-\omega$ 主被动联合模型反演土壤含水量的对比情况。

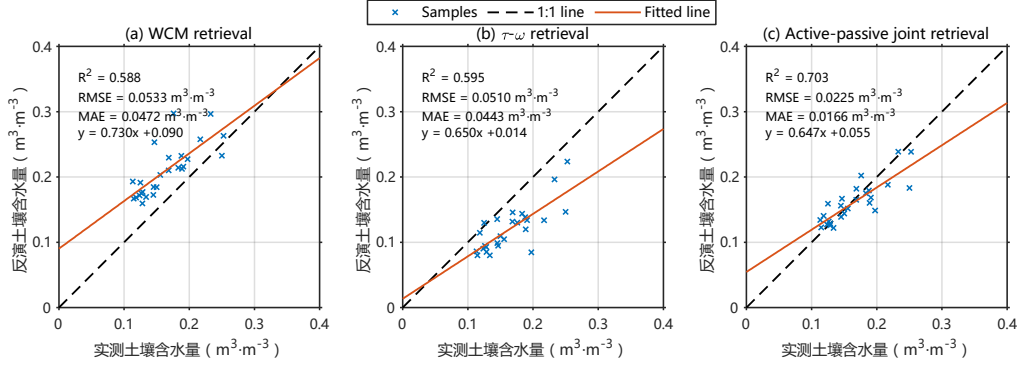


图 15 三种模型反演土壤含水量的对比情况

Figure 15 Comparison of soil moisture retrieval results from the three models

从图中可以看到，主被动联合反演结果相较两种单模型方法有明显改善，其 R^2 提高至0.703，RMSE降低至 $0.0225 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ，MAE降低至 $0.0166 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 。与水云模型相比， R^2 绝对提升了19.6%，RMSE约降低57.8%，MAE约降低64.8%；与 $\tau-\omega$ 模型相比， R^2 绝对提升了18.2%，RMSE约降低55.9%，MAE约降低62.5%。这表明主动散射和被动亮温观测具有一定互补性，联合反演能够明显削弱单一观测模型中的参数耦合和误差敏感性。反演土壤含水量的决定系数提升至0.703，表明反演土壤含水量更接近实测数据，进一步体现了主被动联合测量后进行反演的优势，展现了使用本系统的复用接收机法主被动系统进行测量及联合反演的发展潜力，并可为后续面向星载L波段主被动载荷地面校验的定标验证、尺度匹配和长期观测试验提供基础。

后续可通过扩大外场样本、覆盖不同含水量和作物生长期，并同步获取更多辅助参数，进一步约束水云模型和 $\tau-\omega$ 模型参数。同时，可结合时间序列观测和动态滤波方法，提高联合反演对土壤水分变化的响应能力和结果稳定性。总体来看，本文结果表明所研制系统已具备开展主被动联合反演实验的基础能力，但仍需依托更丰富的样本数据和更强的物理约束模型，进一步提升土壤含水量反演的精度和适用性。

4 结论

本文面向星载L波段主被动微波载荷地面校验与典型地表场景观测需求，提出并实现了一种基于复用接收机的辐射计—散射计一体化系统。针对传统地基主被动组合系统依赖专用仪器、多设备搭建、系统结构复杂且难以统一组织的问题，本文通过共享天线、射频前端和数字处理资源，实现了同一接收机链路对被动亮温接收与主动回波接收的分时复用，构建了统一的双模式测量流程。在此基础上，完成了主被动工作链路设计、自动测量时序

组织及统一数据流实现，形成了一套能够在同一平台上分别开展主动散射测量与被动辐射测量的一体化观测系统。

实验结果表明，系统能够稳定获取后向散射系数 σ^0 与亮温 T_B 两类观测量，其角度响应与相应散射模型和辐射经验模型总体一致，验证了所提系统方案的可行性以及测量结果的合理性。研究结果说明，复用接收机方法能够在统一观测条件下兼顾系统简化与双模式测量需求，使辐射计与散射计不仅能够分别完成主动和被动测量，也具备开展主被动联合观测与协同分析的基础。此外，使用复用接收机法实现主被动土壤含水量的反演工作，相比于单独采用主动或被动观测数据的反演结果，主被动联合反演的决定系数有所提高，RMSE和MAE均有所降低。联合反演的效果相比于目前非复用接收机法的联合反演效果具备些许提升，证明了系统的潜力。由此，本文工作表明，在统一平台上获取具有一致物理指向的主被动观测信息是可行且有优势的，为后续围绕散射机制、辐射响应及主被动互补关系开展分析研究提供了实验基础。

从应用意义看，该系统不仅可作为地基地表微波观测平台，用于地球物理参数微波观测、典型场景长期观测及主被动联合分析，也可作为星载L波段主被动微波载荷的地面校验、真实性检验及相关传播效应分析提供支撑。依托该一体化系统，可在统一观测条件下获取具有一致物理指向的主动与被动观测信息，为后续围绕亮温—散射一致性关系、定标链路及校验场支撑能力等问题开展研究提供地基实验平台与技术基础。

后续工作可进一步围绕被动链路长期稳定性控制、主动链路定量化测量能力提升以及更高精度的主被动协同分析与联合反演等方面展开，不断完善系统在长期连续观测、地球物理参数联合观测和多参量协同分析中的能力。在此基础上，还可进一步拓展其在一致性评估、传播路径相关效应及星地观测对比分析等方面的应用，特别是为电离层传播效应、法拉第旋转引起的极化状态变化及其对L波段主被动观测影响的研究提供实验条件。

参考文献

- [1] ULABY F T, LONG D. Microwave Radar and Radiometric Remote Sensing[M]. Ann Arbor: University of Michigan Press, 2014.
- [2] WILSON W J, YUEH S H, DINARDO S J, *et al.* Passive active L-and S-band (PALS) microwave sensor for ocean salinity and soil moisture measurements[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(5): 1039-1048. DOI: 10.1109/36.921422
- [3] LE VINE D M, LAGERLOEF G S E, TORRUSIO S E. Aquarius and remote sensing of sea surface salinity from space[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, **98**(5): 688-703. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2040550
- [4] ENTEKHABI D, NJOKU E G, O'NEILL P E, *et al.* The soil moisture active passive (SMAP) mission[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, **98**(5): 704-716. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043918

- [5] KERR Y H, WALDTEUFEL P, WIGNERON J P, *et al.* The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, **98**(5): 666-687. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043032
- [6] MIURA S H, ETOH Y, KANKAKU Y, *et al.* The current status of ALOS-4[C]//Proceedings SPIE 12729, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XXVII. Amsterdam: SPIE, 2023, **12729**: 94-102. DOI: 10.1117/12.2678288
- [7] ROSEN P A, BAWDEN G W, BARELA P, *et al.* The NASA-ISRO SAR mission: A summary[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, **13**(2): 8-34. DOI: 10.1109/MGRS.2025.3578258
- [8] HOFSTE J G, VAN DER VELDE R, WEN J, *et al.* Year-long, broad-band, microwave backscatter observations of an alpine meadow over the Tibetan Plateau with a ground-based scatterometer[J]. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(6): 2819-2856. DOI: 10.5194/essd-13-2819-2021
- [9] O'NEILL P E, LANG R H, KURUM M, *et al.* Multi-sensor microwave soil moisture remote sensing: NASA's combined radar/radiometer (ComRAD) system[C]//Proceedings of the 2006 IEEE MicroRad. San Juan, Puerto Rico, USA: IEEE, 2006: 50-54. DOI: 10.1109/MICRAD.2006.1677061
- [10] YAO Chuanliang, JIN Yaqiu, ZHAO Yinlong, *et al.* A novel system of combined X-band radiometer-scatterometer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2000, **22**(1): 137-143 (姚传亮, 金亚秋, 赵银龙, 等. 新型 X 波段散射计辐射计组合系统[J]. 电子与信息学报, 2000, **22**(1): 137-143)
- [11] WANKHEDE A, DE S, BAZIL RAJ A A. Development of L-band FMCW radar on SDR using GNU Radio[C]//Proceedings of the 2024 2nd International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ICETITE). Vellore, India: IEEE, 2024: 1-6. DOI: 10.1109/IC-ETITE58242.2024.10493476
- [12] FARHAD M M, ALAM A M, BISWAS S, *et al.* SDR-based dual polarized L-band microwave radiometer operating from small UAS platforms[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2024, **17**: 9389-9402. DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3394054
- [13] O'NEILL P E, CHAUHAN N S, JACKSON T J. Use of active and passive microwave remote sensing for soil moisture estimation through corn[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, **17**(10): 1851-1865. DOI: 10.1080/01431169608948743
- [14] Analog Devices. Data Sheet: AD9361[EB/OL]. (2024-03-01)[2026-03-25]. <https://www.alldatasheetcn.com/datasheet-pdf/pdf/554225/AD/AD9361.html>
- [15] AMD. Zynq 7000 SoC Technical reference manual (UG585)[EB/OL]. (2026-02-06)[2026-03-25]. https://docs.amd.com/r/en-US/ug585-zynq-7000-SoC-TRM/Overview?tocId=xIX_rQX99so~EgwiYNCMYA
- [16] SOME E. Low-cost software defined radio injection-locking for coherent multichannel receivers[D]. Boulder: University of Colorado Boulder, 2023.

- [17] SIDOROV I A, GUDKOV A G, NOVICHICKIN E P, *et al.* Bipolarized S and L band radiometer for remote sensing[C]//Proceedings of the 2024 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE). Saratov, Russian Federation: IEEE, 2024: 73-76. DOI: 10.1109/APEDE59883.2024.10715782
- [18] ZHANG Q J. System design and key technologies of the GF-3 satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, **46**(3): 269-277. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049
- [19] SKOLNIK M I. Radar Handbook[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1990
- [20] LI X H, YE S B, WANG Z H, *et al.* A compact stepped frequency continuous waveform through-wall radar system based on dual-channel software-defined radio[J]. *Electronics*, 2025, **14**(3): 527. DOI: 10.3390/electronics14030527
- [21] JIAO Y B, WU Y, AI Z Y, *et al.* An advanced real-time internal calibration scheme for the DBF-SCORE spaceborne SAR systems[J]. *Remote Sensing*, 2025, **17**(8): 1425. DOI: 10.3390/rs17081425
- [22] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume 2-Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1982
- [23] 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. DOI: 10.1029/2009RS004198
- [24] BRACAGLIA M, FERRAZZOLI P, GUERRIERO L. A fully polarimetric multiple scattering model for crops[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **54**(3): 170-179. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00151-4
- [25] WANG J R, MCMURTREY J E, ENGMAN E T, *et al.* Radiometric measurements over bare and vegetated fields at 1.4-GHz and 5-GHz frequencies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1982, **12**(4): 295-311. DOI: 10.1016/0034-4257(82)90042-6
- [26] MACELLONI G, PAMPALONI P, BROGIONI M, *et al.* Technical Support for the Deployment of an L-Band Radiometer at Concordia Station: Final Report[R]. Paris: European Space Agency, 2006
- [27] JIANG Ruirui, GAN Fuping, GUO Yi, *et al.* Progress in research on the joint inversion for soil moisture using multi-source satellite remote sensing data[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, **36**(1): 1-13. DOI: 10.6046/zrzyyg.2022408 (蒋瑞瑞, 甘甫平, 郭艺, 等. 土壤水分多源卫星遥感联合反演研究进展[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(1): 1-13. DOI: 10.6046/zrzyyg.2022408)
- [28] LEMAÎTRE F, POUSSIÈRE J C, KERR Y H, *et al.* Design and test of the ground-based L-band radiometer for estimating water in soils (LEWIS)[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(8): 1666-1676 DOI: 10.1109/TGRS.2004.831230

第一作者简介: 杨世杰, 男, 1999 年生, 汉族, 山东青岛人, 中国科学院国家空间科学中心博士研究生, 研究方向为电磁场与微波技术。E-mail: yangshijie21@mailsucas.ac.cn。



通讯作者简介：郭伟，男，于1999年获得中国科学院电子学研究所博士学位，现为中国科学院国家空间科学中心（北京）研究员。他的研究方向主要包括卫星高度计定标，负责有源定标器项目研制工作。E-mail: guowei@mirslab.cn。

最新录用