

双频超宽带主被动微波冰川探测仪青藏高原典型冰川航空飞行试验初步结果及分析

马剑英¹, 朱迪¹, 董晓龙^{1,2}, 刘璟怡¹, 白东锦¹, 徐国庆¹, 刘天澳^{1,2}

(中国科学院国家空间科学中心, 中国科学院微波遥感技术重点实验室, 北京 100190;
中国科学院大学, 计算机科学与技术学院, 北京 100049)

摘要: 冰冻圈在气候系统及多圈层相互作用中具有重要影响, 冰盖、海冰、积雪、冻土等冰冻圈关键要素是全球气候变化的记录器和主要驱动因素, 以青藏高原为核心的冰川储量变化对我国下游大江大河径流补给效果影响显著。微波探测具有穿透强、对水的分布和变化敏感和不受光照限制等优势, 可穿透冰盖表面以下数米到数千米的次表层, 通过探测冰下物质的辐射与散射特性, 反演冰盖次表层的分层结构、温度廓线、密实度和介电常数等信息。本项目研制了 P/L 双频超宽带主被动微波冰川探测仪, P 波段微波的最大穿透深度可达千米量级, L 波段微波适合探测冰盖表面积雪信息, 结合超宽带线性调频脉冲压缩体制提供的高分辨率和强探测性, 能够实现对冰川辐射与散射特性的精细测量。通过 2024 年在老虎沟 12 号冰川和古里雅冰川开展的机载飞行试验, 证明 P 波段信号具有冰川探深能力, 冰下穿透距离超过 370 m, L 波段信号在冰表和浅层冰处提供了更丰富的分层信息, 探测深度可超过 100 m, 冰厚计算方面, 通过实测数据建立仿真模型, 计算得到冰芯位置孔深约 309.81 m, 与冰芯长度 309.73 m 相差 0.08 m, 辐射亮温也表现出与海拔和冰川体积的相关性, 为未来南北极冰川探测、星载冰冻圈探测方面提供数据依据和模型基础。

关键词: 冰冻圈微波遥感探测; 双频超宽带主被动微波冰川探测仪; 古里雅冰川; 老虎沟 12 号冰川

中图分类号: TP79

PRELIMINARY RESULTS AND ANALYSIS OF AERIAL FLIGHT TEST OF TYPICAL GLACIERS ON THE QINGHAI TIBET PLATEAU USING DUAL FREQUENCY ULTRA WIDEBAND ACTIVE AND PASSIVE GLACIER DETECTOR

MA Jianying¹, ZHU Di¹, DONG Xiaolong^{1,2}, LIU Jingyi¹, BAI Dongjin¹, XU Guoqing¹, LIU Tianao^{1,2}

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

2. School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The cryosphere plays an important role in the climate system and the interaction of multiple spheres. The key elements of the cryosphere, such as ice sheet, sea ice, snow cover, and frozen soil, are the recorders and main driving factors of global climate change. The changes in glacier reserves centered on the Qinghai Tibet Plateau have a significant impact on the recharge effect of downstream major rivers in China. Microwave detection has the advantages of strong penetration, sensitivity to the distribution and changes of water, and not limited by light. It can penetrate the sub surface layer several meters to several kilometers below the

surface of the ice cover. By detecting the radiation and scattering characteristics of the material under the ice, the layered structure, temperature profile, density, and dielectric constant of the sub surface layer of the ice cover can be inverted. This project has developed a P/L dual frequency ultra wideband active and passive glacier radar. The maximum penetration depth of P-band microwave can reach the level of kilometers, while L-band microwaves are suitable for detecting snow information on ice sheet surfaces. Combined with the high resolution and strong detectability provided by the ultra wideband linear frequency modulation pulse compression system, it can achieve precise detection of glacier radiation and scattering characteristics. Through airborne flight tests conducted on the Guliya Glacier and Laohugou No.12 Glacier in 2024, it was proven that P-band signals have glacier depth detection capabilities, with a penetration distance of over 370 meters. L-band signals provide richer information on the ice surface and shallow ice, with a detection depth of over 100 meters. In terms of ice depth calculation, a simulation model was established based on actual measurement data, and the ice depth at the ice core position was calculated to be about 309.81 meters, which is 0.08 meters different from the ice core length of 309.73 meters. Radiant brightness temperature also shows a correlation with altitude and glacier volume. These pieces of information provide data basis and model foundation for future polar glacier detection and spaceborne cryosphere detection in the future.

Key words: Cryosphere microwave remote sensing detection; Dual frequency ultra wideband active and passive glacier radar; Guliya Glacier; Laohugou No.12 Glacier

1 引言

冰冻圈在气候系统以及多圈层的相互作用中具有关键影响,冰川和冰盖等冰冻圈关键要素是全球气候变化的主要驱动因素之一^[1]。冰川是冰冻圈的核心组成部分,与积雪、冻土并列。冰川由多年积雪累积形成,记录了地球气候变化的历史。冰川的融化,影响着全球海平面上升、干旱区冰川融水河流补给、海水盐度和流动、自然灾害的频率和强度,甚至地球的形态和自转。冰川对我国的影响主要体现在极地冰盖融化造成的海平面上升对我国沿海地区的影响,以及以亚洲高山区冰川变化对我国下游大江大河径流的影响两个方面。在全球变暖的大背景下,近几十年来,冰川正在快速消融。极地冰盖消融引起的海平面上升,已造成我国自1993年以来渤海、黄海、东海和南海各主要海域平均海平面每年上升3.8~5.0 mm。在快速升温的背景下,“亚洲水塔”也正在发生剧烈变化,呈现整体失衡特征,主要表现为冰川加速退缩、湖泊显著扩张、冰川径流增加,水循环加强。随着冰川的持续亏损,冰川储量逐步减少,冰川融水径流最终将减少甚至消失,未来可用水资源减少,水资源短缺潜在风险加剧^[2-4]。

目前,关于冰川和冰盖区域的遥感研究,已覆盖了包括冰川测绘、表面海拔、积累率、冰厚、表面速度和表面形态、体量变化、冰川融化、内部地层结构等领域^[5],但冰盖内部状态的研究尚未得到充分发展。冰盖内部状态研究包括内部物理性质分

布以及冰底环境(包括冰床特征、冰底地质、冰下湖和冰下水系等)等方面,是决定冰盖内部动力和热力等物理过程的主要因素,同时也是冰盖区域物质平衡、稳定性评估以及演化预测中的重要输入参数。除内部地层结构以外,关于冰盖内部物理性质的研究仍主要停留在现场测量的方式上。受到环境和人力成本的限制,冰盖内部状态的现场测量通常很难进行,实际观测数据十分匮乏,分布稀疏,因此需要一种能够对冰川内部状态和参数进行快速、大面积、高密度的测量手段。

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是调查冰川内部结构和冰川厚度的一种常用设备,但在冰川边缘区域、陡峭区域、积雪过厚区域,探地雷达难以到达开展工作。机载探冰雷达能够摆脱冰川地形的限制,对所有冰川地形进行快速高效飞行探测,大大减少了冰川探测的时间,减轻了冰川探测工作的危险性和人工负担^[6-12]。

不同频段的电磁波对冰雪介质具有不同穿透特性,通过适当探测体制的选择和设计,能够实现冰盖表面至冰盖底部辐射与散射特征的测量,为反演冰盖温度、密度廓线、内部状态和参数提供有效约束^[13-19]。

2021年,由中国科学院国家空间科学中心作为项目牵头承担单位的国家重点研发计划“高分辨率极区冰冻圈主被动微波探测技术”正式立项,针对全球变化背景下冰盖物质平衡、不稳定性及对海平面变化的影响,海冰、积雪、冻土冰冻圈环境要素时空分布与变化,极区航道开发等科学问题和重大应用对观测能力的需求,开展为期四年的极区冰冻

圈探测与技术攻关，其中“主被动深层探测成像技术研究”课题负责完成冰川/冰盖的深层探测、冰下物质探测、冰下多环境参数探测方法和机理研究，并在青藏高原和南极开展机载验证试验。

本文介绍了基于“主被动深层探测成像技术研究”课题研制的搭载在机载平台的P/L双频超宽带主被动微波冰川探测仪（以下简称主被动冰川探测仪），P波段微波能穿透冰盖表面以下数米到数千米的冰盖，L波段微波适合探测冰盖浅层和表面积雪信息，结合超宽带线性调频脉冲压缩体制提供的高分辨率和强探测性，实现对冰盖全部结构的精确测量，反映冰下物质的辐射与散射特性，为后续建立主被动微波探测机理模型，反演雪冰交界面特性、中深部内部结构、冰底地貌、温度廓线、密度廓线等冰川关键参数奠定了基础。技术路线如图1所示。

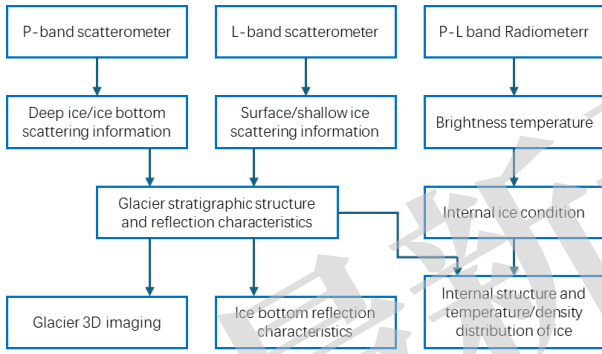


图 1 冰川探测技术路线图

Fig.1 Schematic diagram of Glacier detection

2024年，在我国昆仑山脉古里雅冰川和祁连山脉老虎沟12号冰川上空，成功开展了主被动冰川探测仪的机载飞行试验，得到古里雅冰川的散射数据和老虎沟12号冰川的主被动微波数据，通过与已有古里雅冰川、老虎沟12号冰川已有资料对比，证明主被动冰川探测仪具备良好的冰川探测性能，试验获得的大量主被动冰川遥感数据为我国山地冰川研究提供了丰富的冰川特性信息，为我国主被动冰川探测模型的建立，温度和密度廓线的反演奠定了基础。

2 仪器和飞行试验简介

2.1 双频超宽带主被动冰川探测仪简介

飞行试验在国内典型山地冰川开展，根据国内冰川深度特征、飞行平台特性、探测模型、探测频段、发射信号、探测精度、分辨率等因素开展系统

参数设计。

冰川观测采用正下视，近似为菲涅尔反射模型，用准镜面平行分层媒质描绘冰盖媒质结构，如图2所示。

机载冰川探测模型如下所示， P_t 为发射信号功率， λ 为发射信号功率， G_r 、 G_t 为天线的接收、发射增益， $T_{air-ice}$ 为电磁波穿越空气/冰层的透射率，

L_a 为冰下单程衰减， Γ_i 为冰下每一层的反射系数，

h 为载荷高度， z_i 为冰厚^[20-24]。

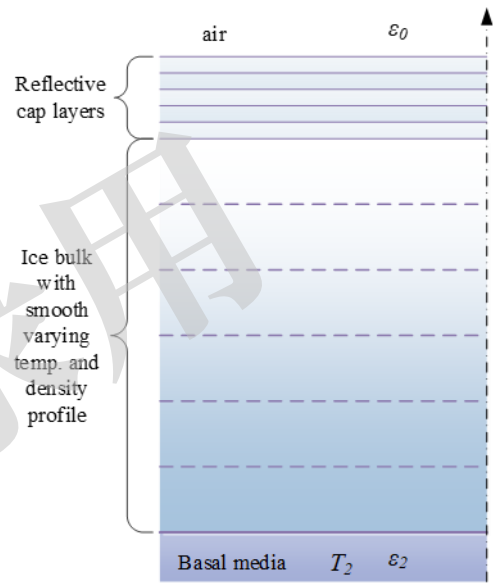


图 2 冰盖分层示意图

Fig.2 Schematic diagram of ice sheet

$$P_R^i = \frac{P_t \lambda^2 G_r G_t T_{air-ice}^2 (L_a^i)^2 \Gamma_i}{(4\pi)^2 4 \left(h + \frac{z_i}{\sqrt{\epsilon_{ice}}} \right)^2} \quad (1)$$

采用线性调频信号作为发射信号形式，能够解决距离分辨率与探测深度的矛盾，系统增益增加 $D = B \cdot \tau$ ， B 为发射信号带宽， τ 为发射信号时宽。散射回波可进一步表示为

$$P_R^i = \frac{P_t \lambda^2 G_r G_t T_{air-ice}^2 (L_a^i)^2 \Gamma_i}{(4\pi)^2 4 \left(h + \frac{z_i}{\sqrt{\epsilon_{ice}}} \right)^2} \cdot B \cdot \tau \quad (2)$$

噪声信号可表示为

$$P_{noise} = k T_0 B F_n \quad (3)$$

F_n 为系统噪声系数。

信噪比可表示为 $SNR_i = P_r^i / P_{noise}$ ，认为

$SNR=3$ 时的可检测信号为系统检测最小信号。

各典型值为：

$$T_{air-ice} = 1 - R_{air-ice} \approx 1 - 0.016 \approx -0.07dB$$

$$\Gamma_{ice/frozen_rock} \approx 0.012 \approx -19.21dB$$

$$\Gamma_{ice/water} \approx 0.46 \approx -3.37dB$$

$$z = 400m$$

$$\epsilon'_{ice} = 3.15$$

L_a 为冰下单程衰减率，主要包括介电常数虚部引起的介电吸收损耗，以及存在介电对比的结构引起的散射损耗。对于冰盖媒质，介电吸收损耗的主要贡献为冰媒质本身和其中包含的离子杂质^[25-27]。由于P波段探测波长远大于冰粒子尺度，因此可以忽略冰粒子本身的体散射效应。冰盖中的单程衰减率 L_a 可简化表示为：

$$L_a = \frac{10 \log_{10} e}{1000 \epsilon_0 \sqrt{\epsilon'_{ice}} c} \sigma_{\infty} \quad (4)$$

其中， ϵ_0 是真空介电常数， c 是真空光速， N_a

单位为dB/km， σ_{∞} 为冰盖电导率，单位为 $\mu S/m$ ^[21]。

图3给出了冰盖在不同温度和频率下单程介电吸收衰减率的仿真结果，仿真频段为0.2-2 GHz，冰盖背景离子浓度假设为2 μM 。仿真结果表明，冰盖温度越高，介电吸收衰减越大。

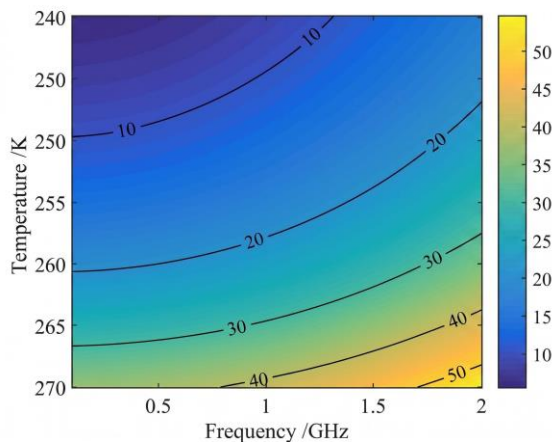


图3 不同温度和频率下的单程介电吸收衰减率

Fig.3 dielectric absorption attenuation rate at different temperatures and frequencies

基于对古里雅冰川电磁特性的相关数据和资料，古里雅冰川的冰下电磁波传播速度被假定为 $V_{ice}=168m/us$ 。结合载荷发射信号带宽 $B=300MHz$ ，电磁波在空中距离分辨率为0.5m，冰内距离分辨率 $\delta_r = \frac{V_{ice}}{2B} \approx 0.28m$ 。

根据以上考虑，主被动冰川探测仪包括散射计和辐射计两个部分，主要参数如下表，散射计发射P/L波段信号，对冰底和冰表进行主动探测，使用带宽 $B=300MHz$ 的线性调频信号，以实现空中0.5m、冰内0.28m的高距离分辨率；辐射计接收P/L频段辐射亮温，并分为多个通道输出。

表1 主被动冰川探测仪主要参数

Table 1 Main parameters of load

散射计	
参 数	性 能
发射信号	P: 400MHz-700MHz L: 1700MHz-2000MHz
信号形式	LFM 信号
信号时长	0.5us
重复周期	100us
辐射计	
信号频段	800MHz-2000MHz
通道带宽	80MHz

飞行平台选择法国宇航的AS350B3直升机，将飞行高度控制在125 m $\pm$ 25 m，飞行速度小于150公里/小时，并在重点区域悬停观测，如图4所示。

主被动冰川探测仪包括天线系统、散射计系统和辐射计系统，散射计系统和辐射计系统互相独立，散射计和辐射计可分开进行飞行试验。

天线系统包含发射和接收两个天线，位于机舱两侧支架上，如图5所示，散射计工作时发射天线发射冰川探测信号，接收天线接收冰川散射回波，辐射计工作时仅接收天线工作，接收冰川辐射亮温。

散射计系统包括数字单元、收发单元、功放单元和控制存储单元，如图6所示。数字单元产生线性调频中频信号，收发单元将中频信号上变频到射频送至功放单元，并将接收的射频回波下变频到中频送至数字单元处理，功放单元放大发射射频信号，控制存储单元控制载荷工作并存储数据。

辐射计系统包括链路一、数字谱仪和控制存储单元，如图7所示。链路一将从接收天线接收的辐射亮温信息放大，送至数字谱仪进行处理，并存储到控制存储单元。



图 4 飞行平台
Fig.4 Flying platform



图 5 天线系统
Fig.5 Antenna system

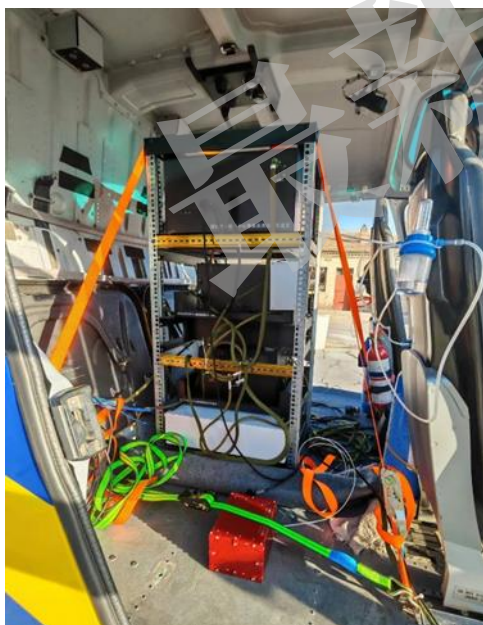


图 6 散射计系统
Fig.6 Scatterometer system



图 7 辐射计系统
Fig.7 Radiometer system

2.2 古里雅冰川试验情况简介

青藏高原由于同时具备中低纬度和高海拔的特点，与全球气候变化有密切关系。古里雅冰帽位于青藏高原西北边缘的西昆仑山，是已知亚洲中部最大、最高和最冷的平顶冰帽。

自1987年对西昆仑山古里雅冰帽进行的短期考察开始，对该冰帽的研究取得了一系列成果。从1990~1991年，姚檀栋等人对古里雅冰帽进行了以冰芯记录为主的冰川学研究，包括气候特征、冰川厚度与温度、冰川消融与积累等。1992年，在该冰帽成功地钻取了冰芯，并进行了一系列的研究^[28]，包括气候特征、冰川温度、冰川厚度、冰川积累与消融；冰川化学与同位素以及冰川变化。2015年，中美联合在古里雅高原和古里雅峰科考，在古里雅高原钻取了长度309.73 m的冰芯并进行了总面积18 km²的探地雷达测量^[29]。

2024年11月，直升机搭载主动冰川探测仪从新疆昆玉市一牧场出发，对古里雅冰川进行了飞行探测，飞行时长3小时，往返路程2小时，有效飞行时长1小时，飞机先在附近水域进行外场定标，随后飞往古里雅冰川开展冰川试验。飞行当天气候条件不佳，飞行高度选择控制在150 m，飞行速度在120公里/小时-150 km/h，没有进行悬停观测。飞行测线基于现有地面雷达数据的冰厚分布和冰芯测量数据^[8]，进行网格型规划，包含以AB和CD为中心的多条平行测线，测线有效长度约70 km，如图8所示。

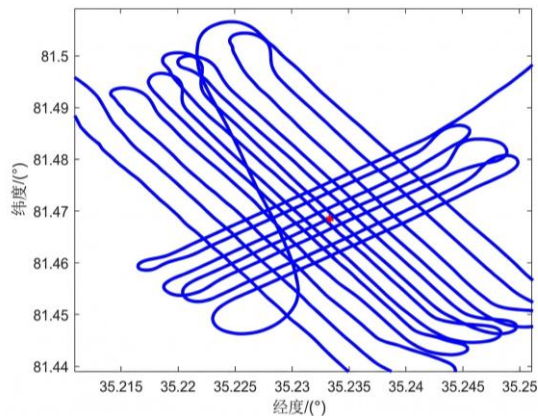


图 8 古里雅冰川飞行试验测线
Fig.8 Flight Test Lines of Guliya Glacier

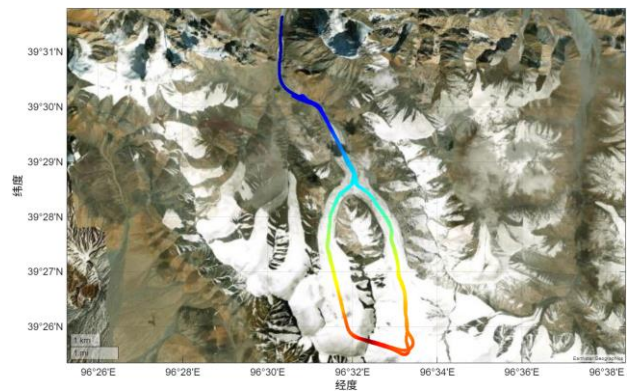


图 9 老虎沟 12 号冰川飞行试验测线
Fig.9 Flight Test Lines of Laohugou No.12 Glacier

2.3 老虎沟 12 号冰川试验情况简介

老虎沟12号冰川位于青藏高原祁连山西段，面积约为20.42km²，长约9.7km，海拔跨度约1200m，平均海拔4943m，是祁连山最大的山谷多温型冰川。老虎沟12号冰川分东西两支，形态成V型，在4550m左右汇合，冰川坡度较平缓，冰面坡降为3度到6度，具有稳定性冰川的特征^[30]。

我国科研人员在2007年、2009年和2014年使用EKKO Pro型探地雷达对老虎沟12号冰川分别进行了冰下地形测量，天线中心频率分别为50MHz和100MHz。测得沿东支和西支冰川中流线的平均厚度分别为190m和150m。东支冰川的最大厚度为261m，西支的最大厚度只有174m^[10]。东、西支冰川表面均较为平缓，东支冰川的冰下地形起伏要远大于西支。除此之外，对冰川的温度特征和雪冰主要化学离子特征进行了分析和计算^{[31][32]}。

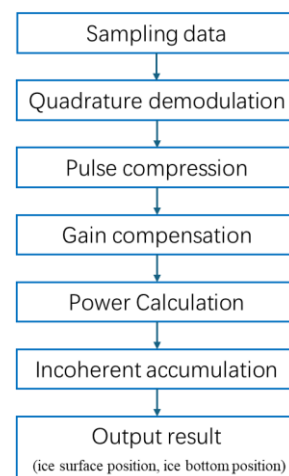
2024年10月，在老虎沟12号冰川共进行了一次被动探测和两次主动探测试验。飞机从甘肃昌马镇起飞，到冰川北部汇合区进入冰川，沿着冰川东西支区域，先顺时针飞行一圈，再逆时针飞行一圈，最后从汇合区离开，有效飞行试验时间约半小时，飞机测线如图9所示。飞行期间气象条件较好，飞行高度选择控制在100m-150m，飞行速度约120km/h±20km/h，在重点观测区域（已知厚冰区和角反射器区域）降低飞行高度，悬停或低速飞过。

3 数据处理

首先介绍散射计数据处理流程，如图10所示，将数字单元的数据解包，提取有效数据后，对AD采样数据进行正交解调和脉冲压缩处理，得到当前冰川表面、内部结构以及冰底的反射信号；结合接收链路的自动增益控制值，和系统增益，计算回波功率值；最后进行非相干积累，提高冰下探测性能。

机载导航定位定向系统（POS系统）记录了舱内设备的位置和姿态数据，结合散射计测得冰川时间、位置信息，可计算出冰川不同位置的冰表海拔、冰川深度、冰底海拔。

辐射计将采样数据变换到频域后划通道处理，进行定标和射频抑制后，计算辐射亮温，反演冰川温度信息，如图11所示。



(a)

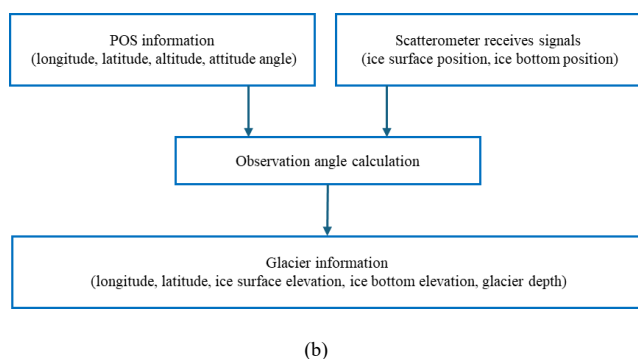


图 10 散射计数据处理流程(a)单次散射回波处理流程(b)多信息源计算冰川信息

Fig10 Data processing flow of Scatterometer (a)

Single-scattered echo processing flow (b) Deriving glacier information from multiple information sources

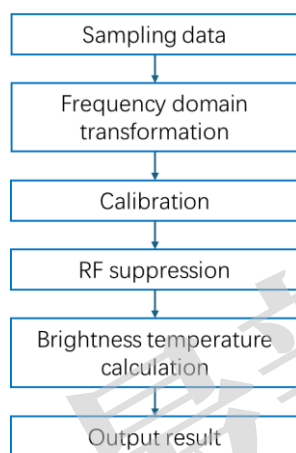


图 11 辐射计数据处理流程

Fig11 Data processing flow of Radiometer

4 结果与分析

1) 古里雅冰川

古里雅冰川飞行试验由主动冰川探测仪完成,有效飞行时间约70分钟,包含13条平行于AB的测线和7条平行于CD的测线,测线如图8所示,并在图中标注了冰芯位置信息。

在对所有测线数据进行时间插值后,图12-图14分别给出了古里雅冰川的冰表海拔地形图,冰底地形图和冰厚等高线图。图12冰表海拔地形图可看到古里雅冰川虽然为平顶冰川,但冰表地形仍呈现出一定的起伏程度,考虑到POS的海拔精度和0.5m的超宽带空间分辨率,绘制的冰表地形精度相对较高,可用于监测和估计冰川消融过程。

图13冰底地形展现了冰下山脉的位置和走向,以冰芯位置为中心,分布着四座山峰,测线CD上存

在相距约1 km的两座山峰,位置和深度分别为(81.47°E, 35.23°N),距冰表大约100 m,和(81.47°E, 35.24°N),距冰表大约130 m;测线AB沿线远端相距约3 km处有两座山峰,位置和深度分别为(81.45°E, 35.24°N),距冰表大约40 m,和(81.49°E, 35.23°N),山峰超出冰表,由于两山峰相距较远,中间有比较长一段平坦厚冰区域。

图14冰川厚度图呈现了冰川的厚度和分布,冰川最厚处约为370 m,位置大约在(81.46°E, 35.24°N),与1992年探测深度350 m处位置和2015年探测深度371 m处位置接近,通过冰川厚度分布图可计算古里雅冰川储量和变化情况。

为了检验古里雅冰川深度测量结果准确性,挑取最接近2015年钻取冰芯位置的回波数据进行计算。考虑到散射计天线波束宽度和相对底部高度,结合古里雅冰川冰下山峰坡度不一,冰底散射回波区间随冰底坡度和深度扩展,初步认为散射计回波位置的冰厚为冰底散射回波区间中心处到冰表的距离,等于冰底散射回波区间中心和冰表之间传播距离差求出(假设冰下电磁波传播速度168m/us),如图15(a)所示。由于散射计并没有经过冰芯位置,可通过冰芯附近的三个散射回波的位置(图15(b)中绿点所示)和冰厚,建立仿真模型,计算得到冰芯位置(图15(b)中红点所示)冰厚309.81m,与冰芯长度深度相差0.08m。

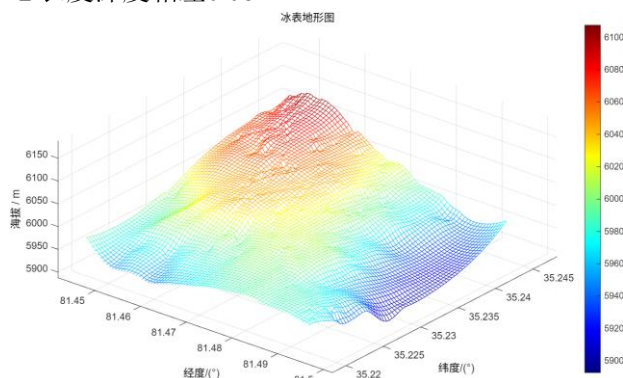


图 12 古里雅冰川表面地形图

Fig12 Topographic map of Guliya Glacier surface

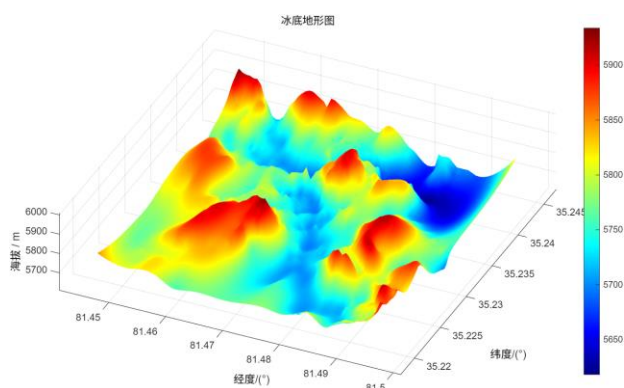


图 13 古里雅冰川底部地形图

Fig13 Topographic map of Guliya Glacier bottom

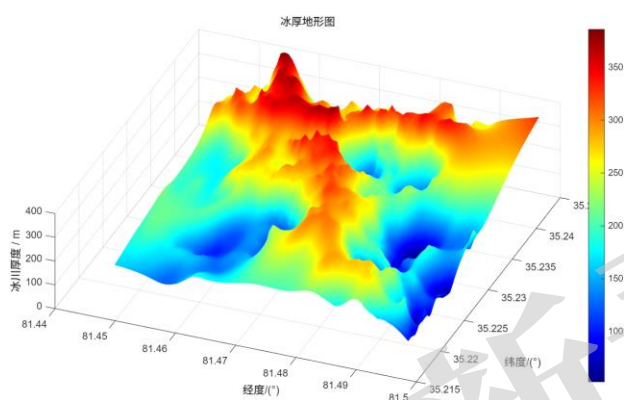
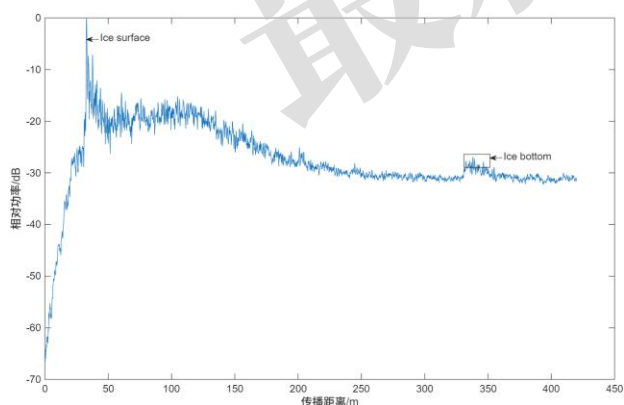
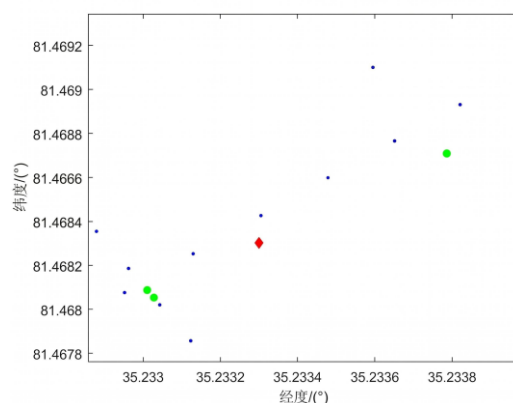


图 14 古里雅冰川厚度分布图

Fig14 Thickness distribution map of Guliya Glacier



(a)



(b)

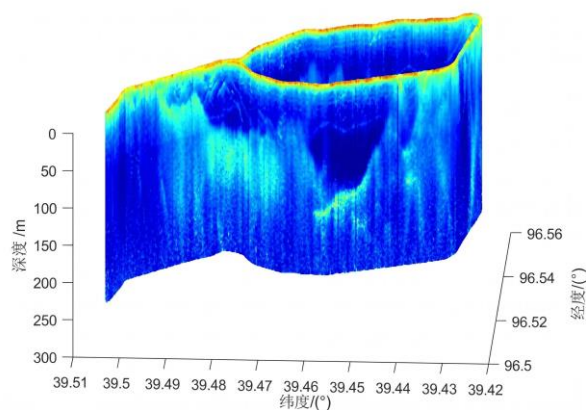
图 15 冰芯附近散射计回波 (a) 散射计单次冰下回波(b)冰芯及附近散射回波位置

Fig15 Scatterometer echo near ice core (a) Single echo waveform (b) Ice core and nearby scattering echo locations

2) 老虎沟12号冰川

老虎沟12号冰川的主动遥感试验数据对冰川底部地形进行了清晰展现，图16和图17所示分别为P波段和L波段探测冰下地形图，两者都能较清晰站下冰下地形，但是在冰川底部P波段回波强于L波段，冰下数据处理结果表明冰川东支最大深度超过250 m，西支最大深度约为170 m，冰川表面较为平缓，东支冰川地下起伏较大，西支冰川起伏缓和，冰底反射回波呈现多样性，可能存在冰内空洞、裂隙、碎屑层等地形。

对辐射计数据来说，剔除掉干扰严重亮温数据，获得可用冰川亮温数据，分析表明亮温随频率呈现负梯度变化，随海拔高度升高而降低，在同频段同海拔区域岩石区辐射亮温较冰川区域低，表明亮温随冰川体积呈正相关，如图18所示。



(a)

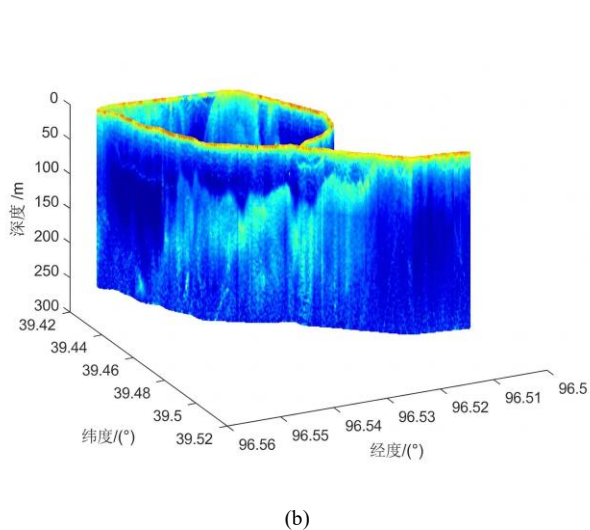
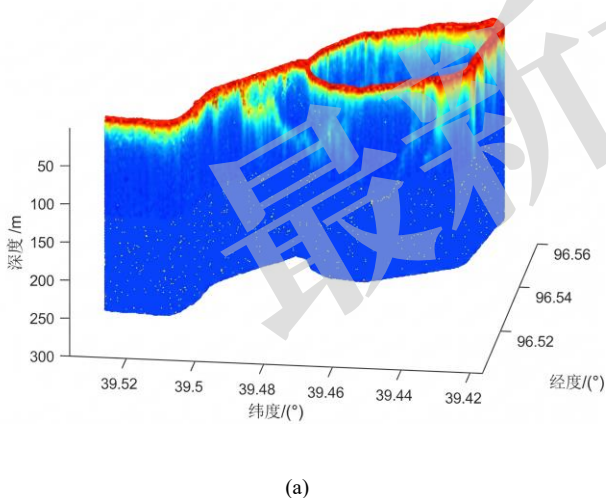
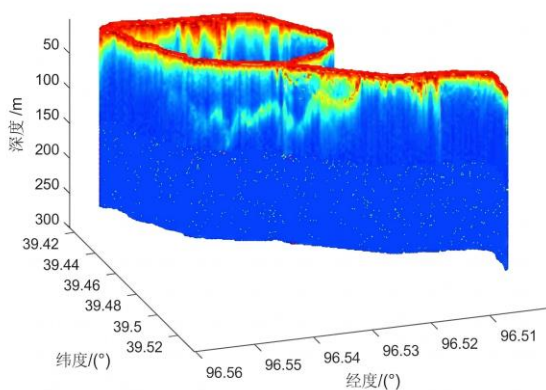


图 16 老虎沟 12 号冰川 P 波段探测冰下地形图 (a) 西支冰川冰下地形 (b) 东支冰川冰下地形

Fig16 P-band underground topographic map of Laohugou No.12 Glacier (a) Subglacial topography of the West Branch Glacier (b) Subglacial topography of the East Branch Glacier



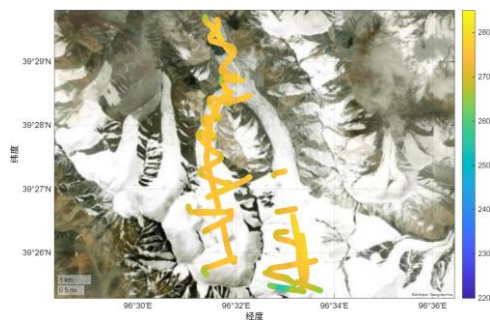
(a)



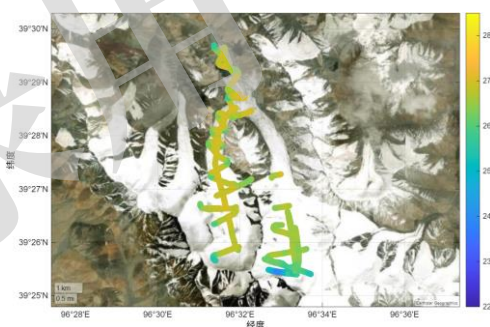
(b)

图 17 老虎沟 12 号冰川 L 波段探测冰下地形图 (a) 西支冰川冰下地形 (b) 东支冰川冰下地形

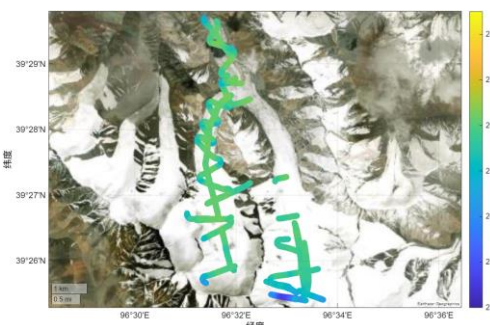
Fig17 L-band underground topographic map of Laohugou No.12 Glacier (a) Subglacial topography of the West Branch Glacier (b) Subglacial topography of the East Branch Glacier



(a)



(b)



(c)

图 18 老虎沟 12 号冰川辐射计探测结果 (a) 1.24GHz 亮温分布 (b) 1.48GHz 亮温分布 (c) 1.72GHz 亮温分布

Fig18 Radiometer detection results of Laohugou No.12 glacier (a) 1.24GHz brightness temperature distribution (b) 1.48GHz brightness temperature distribution (c) 1.72GHz brightness temperature distribution

5 讨论

本文通过主被动冰川探测仪在古里雅冰川和老虎沟12号冰川的飞行试验数据,展示了冰川散射回波和辐射亮温,初步获得冰川深度、冰下结构和亮温信息,但还可进行更深入研究,包括以下方面:

1.山地冰川航空观测冰厚计算方法,通过观察古里雅冰川冰底地形图,可看到冰川底部山脉呈不同坡度起伏,冰川深度应根据散射计高度、天线波束宽度、冰底回波长度和冰川坡度联合反演,提高冰川深度的计算精度。在真实性检验方面,对古里雅冰芯附近位置的冰厚初步结果,如图19所示,可根据冰芯长度,结合到冰芯距离和冰底地形,进一步提高冰川深度检验精度。

2.P/L波段散射回波冰下特征分析,图20给出了老虎沟12号冰川两类代表性的P/L频段散射回波,通过对比可发现冰川表面两频段回波信号波形相似,处于相同位置,L频段在冰面上层(最大值左侧位置)显示了更丰富的信息,在冰下浅层冰部分也显示了更精巧的冰下结构,冰下深层信息则通过P频段获得,后续可通过对P/L散射回波联合分析获取更多更准确冰川散射特性。

3.主被动联合冰川观测方法研究,主被动冰川探测仪在老虎沟12号冰川飞行试验获得了冰下散射回波和辐射亮温信息,散射回波能够给出大部分区域的冰川厚度和冰下结构,辐射亮温信息显示了与海拔和冰川体积的相关性,后续可结合冰下散射特性、海拔高程和辐射亮温等信息,建立山地冰川的主被动微波探测模型,反演冰川关键参数。

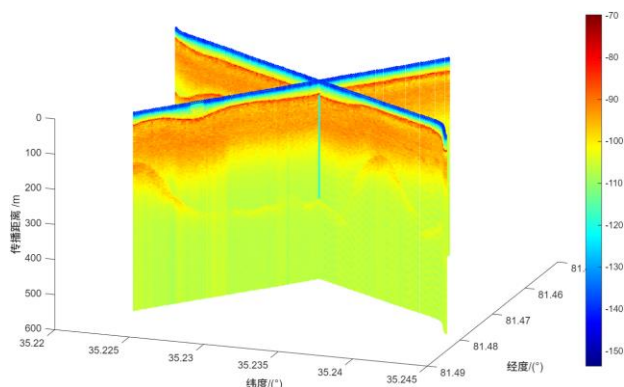


图 19 古里雅冰川 P 波段两测线探测结果

Fig19 Detection results of P-band radar on two flight lines of Guliya Glacier

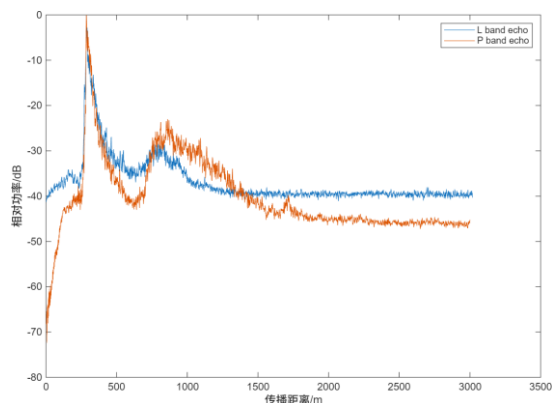


图 20 老虎沟 12 号冰川 P/L 频段散射回波对比

Fig20 Comparison of P/L frequency band scattered echoes of Laohugou Glacier No. 12

6 结论

机载双频超宽带主被动探测仪的空中测距分辨率可达到0.5 m, 以实现冰面表层海拔高度的精确测量; 冰下测距分辨率约0.28 m (冰介电常数 $\epsilon_{ice}=3.15$ 情况下), 可对冰下特征点和冰底地形进行更精细描述。根据古里雅冰川和老虎沟12号冰川探测结果, 证明机载双频超宽带主被动探测仪的散射计P频段探冰厚度能够到达370 m以上, 冰芯位置处孔深计算结果与冰芯长度误差在0.5 m以内; 散射计L频段探冰厚度能够达到百米以上, 在冰表和浅层处能够提供更丰富的散射信息; 辐射亮温虽然在P频段受到严重的干扰, 但在L频段的有效数据仍能反映出亮温随海拔高程和冰川体积的变化规律。后续期待通过三种探测数据的联合探测和反演, 获得冰川物质特性、温度廓线、密度廓线等冰川关键参数信息。

通过航空飞行试验, 获得我国青藏高原的古里雅冰川和老虎沟12号冰川特性如下:

1 在古里雅冰盖区, 以2015年科考采冰芯处为中心进行了网格型探测, 获得了约300 m水平分辨率的冰表地形图, 并对冰下地形进行了三维成像, 显示了冰底存在多个山峰及分布位置。探测深度方面, 处理后最大冰厚可达370 m以上; 探测精度方面, 使用冰芯附近三个散射回波计算得到冰芯位置的孔深为309.81 m, 与冰芯长度309.73 m接近, 显示了探测工作的高精度特性。

2 老虎沟12号冰川探测获得了冰川表面海拔高程信息, 绘制东西支冰川的沿中线冰川厚度分布图, 冰川厚度大多在200 m以上, 冰川内部呈现冰

内空洞、冰裂隙、冰内碎屑层等构造特征。散射计在L波段能接收到深度150 m以上的散射回波，呈现出较P频段更丰富和清晰的散射信息，辐射亮温则初步显示了与海拔和冰川体积的相关性。

本研究通过航空冰川透视探测试验，获得了2024年11月古里雅冰川厚度分布图，2024年10月的老虎沟12号冰川厚度分布图，丰富了我国实地测量冰川厚度的数据集，丰富了冰川测量方式，新增的L频段冰川探测数据可用于完善山地冰川多频段探测模型、主被动探测模型，辐射亮温数据能够构建冰川内部温度廓线，可用于冰川内部温度反演与建

模。此冰川探测方法如能大范围推广，能够极大提高我国冰川储量的探测精度和冰下环境参数。后续工作可基于探测数据发展冰川的运动模型、冰川储量模型、分层冰温模型，这些探测数据和反演模型，可用于南北极冰川/海冰探测、星载冰冻圈探测，提供数据支撑和模型基础。

致谢：感谢国家重点研发计划“高分辨率极区冰冻圈主被动微波探测技术”项目（项目编号：2021YFB3900100）和国家重点研发计划“地表浅层航空透视探测应用技术与验证评估”课题（课题编号：2022YFB3902604）的支持。

参考文献 (References) :

- [1] QIN Dahe, XIAO Cunde, DING Yongjian, *et al.* Progress on cryospheric studies by international and Chinese communities and perspectives[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, **17**(6): 649-656. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2006.06.002 (秦大河, 效存德, 丁永建, 等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J]. *应用气象学报*, 2006, **17**(6): 649-656. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7313.2006.06.002)
- [2] YAO Tandong, WU Guangjian, XU Baiqing, *et al.* Asian water tower change and its impacts[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, **34**(11): 1203-1209 (姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, **34**(11): 1203-1209)
- [3] RAN Youhua, LI Xin, CHE Tao, *et al.* Recent progress and emerging frontiers in China's cryosphere remote sensing research[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, **29**(6): 1831-1847. DOI: 10.11834/jrs.20255066 (冉有华, 李新, 车涛, 等. 2025. 中国冰冻圈遥感近期研究进展与若干前沿问题探讨. *遥感学报*, **29**(6): 1831-1847. DOI: 10.11834/jrs.20255066)
- [4] ASHMORE D W, BINGHAM R G. Antarctic subglacial hydrology: current knowledge and future challenges[J]. *Antarctic Science*, 2014, **26**(6): 758-773
- [5] FUHRER K, NEFTTEL A, ANKLIN M, *et al.* High-resolution ammonium ice core record covering a complete glacial-interglacial cycle[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D2): 4147-4164
- [6] WANG K, WU Y, QIU X L, *et al.* A novel airborne TomoSAR 3-D focusing method for accurate ice thickness and glacier volume estimation[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2025, **220**: 593-607. DOI: 10.1016/j.isprsjrs.2025.01.011
- [7] ZHOU Yushan, LI Xin, ZHENG Donghai, *et al.* Data, methods and perspectives of optical stereo and bistatic SAR satellites for monitoring glacier thickness change in high-mountain Asia[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2024, **53**(5): 779-800. DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230260 (周玉杉, 李新, 郑东海, 等. 亚洲高山区冰川厚度变化光学立体和双基 SAR 卫星监测数据、方法与展望[J]. *测绘学报*, 2024, **53**(4): 779-800. DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230260)
- [8] YANG Shuhu, GU Qiming, ZHANG Yun, *et al.* A review of the use of ice penetrating radar to diagnose the subglacial environments[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2016, **28**(2): 277-286. DOI: 10.13679/j.jdyj.2016.2.277 (杨树瑚, 顾祈明, 张云, 等. 利用冰雷达诊断南极冰盖底部环境的研究综述[J]. *极地研究*, 2016, **28**(2): 277-286. DOI: 10.13679/j.jdyj.2016.2.277)
- [9] MACGREGOR J A, LI J L, PADEN J D, *et al.* Radar attenuation and temperature within the Greenland Ice Sheet[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, **120**(6): 983-1008
- [10] DAHL-JENSEN D, GUNDESTRUP N, GOGINENI S P, *et al.* Basal melt at NorthGRIP modeled from borehole, ice-core and radio-echo sounder observations[J]. *Annals of Glaciology*, 2003, **37**: 207-212
- [11] MACGREGOR J A, MATSUOKA K, STUDINGER M. Radar detection of accreted ice over Lake Vostok, Antarctica[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, **282**(1/2/3/4): 222-233
- [12] LEMMETYINEN J, KONTU A, PULLIAINEN J, *et al.* Nordic snow radar experiment[J]. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 2016, **5**(2): 403-415
- [13] BROOME A L, SCHROEDER D M, JOHNSON J T. Measuring englacial temperatures with a combined radar-radiometer[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Brussels: IEEE, 2021: 2947-2950
- [14] BAI D J, DONG X L, TJUATJA S, *et al.* A comprehensive

emission model for layered inhomogeneous medium with application to passive remote sensing of snow and ice layers[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Brussels: IEEE, 2021: 5615-5618

- [15] TWOMEY S, JACOBOWITZ H, HOWELL H B. Matrix methods for multiple-scattering problems[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1966, **23**(3): 289-298
- [16] TWOMEY S. Explicit calculation of layer absorption in radiative transfer computations by doubling methods[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1975, **15**(9): 775-778
- [17] FUNG A K, EOM H J. A study of backscattering and emission from closely packed inhomogeneous media[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, **GE-23**(5): 761-767
- [18] TAN S, CHANG W, TSANG L, *et al.* Modeling both active and passive microwave remote sensing of snow using Dense Media Radiative Transfer (DMRT) theory with multiple scattering and backscattering enhancement[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, **8**(9): 4418-4430
- [19] BAI D J, DONG X L, TJUATJA S, *et al.* A study of combined active passive microwave sounding of ice sheet internal temperature profiling[C]//Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Waikoloa: IEEE, 2020: 2968-2971
- [20] LEWIS C, GOGINENI S, RODRIGUEZ-MORALES F, *et al.* Airborne fine-resolution UHF radar: an approach to the study of englacial reflections, firn compaction and ice attenuation rates[J]. *Journal of Glaciology*, 2015, **61**(225): 89-100
- [21] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive: From Theory to Applications[M]//Dedham: Artech House, 1986
- [22] FUNG A K. Microwave Scattering and Emission Models and Applications[M]//Dedham. Artech House: 1994
- [23] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory[M]//Dedham. Artech House: 1986
- [24] CULBERG R, SCHROEDER D M. Firn clutter constraints on the design and performance of orbital radar ice sounders[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **58**(9): 6344-6361
- [25] MATSUOKA K, MORSE D, RAYMOND C F. Estimating englacial radar attenuation using depth profiles of the returned power, central West Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, **115**(F2): F02012
- [26] JEZEK K C, JOHNSON J T, DRINKWATER M R, *et al.* Radiometric approach for estimating relative changes in intraglacier average temperature[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, **53**(1): 134-143
- [27] LEI Y, HAYNES M S, ARUMUGAM D, *et al.* A 2-D Pseudospectral Time-Domain (PSTD) simulator for large-scale electromagnetic scattering and radar sounding applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, **58**(6): 4076-4098
- [28] YAO Tandong, JIAO Keqing, ZHANG Xinping, *et al.* Glaciologic studies on Guliya ice cap[J]. *Journal of Glaciology And Geocryology*, 1992, **14**(3): 233-241 (姚檀栋, 焦克勤, 章新平等, 古里雅冰帽冰川学研究[J]. 冰川冻土, 1992, **14**(3): 233-241)
- [29] KUTUZOV S, THOMPSON L G, LAVRENTIEV I, *et al.* Ice thickness measurements of Guliya ice cap, western Kunlun Mountains (Tibetan Plateau), China[J]. *Journal of Glaciology*, 2018, **64**(248): 977-989. DOI: 10.1017/jog.2018.91
- [30] YU Han, YANG Changxia, LIU Hanhu, *et al.* Inversion of plateau glacier surface temperature: taking the glacier No. 12 Laohugou in Qilian Mountains as an example[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2021, **16**(3): 24-31 (余寒, 阳昌霞, 刘汉湖, 等. 高原冰川表面温度反演研究—以祁连山老虎沟 12 号冰川为例[J]. 亚热带资源与环境学报, 2021, **16**(3): 24-31)
- [31] WANG Mingming, LI Zhongqin, WEI Jing, *et al.* Major ion characteristics and environmental significance of snow and ice on typical glaciers in Qilian Mountains[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(10): 1459-1470 (王明明, 李忠勤, 魏静, 等. 祁连山典型冰川雪冰主要化学离子特征及其环境意义[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(10): 1459-1470)
- [32] WANG Yuzhe, REN Jiawen, QIN Xiang, *et al.* Ice depth and glacier-bed characteristics of the Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains, revealed by ground-penetrating radar[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, **38**(1): 28-35 (王玉哲, 任贾文, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟 12 号冰川雷达测厚和冰下地形特征研究[J]. 冰川冻土, 2016, **38**(1): 28-35)

作者简介



马剑英 女，1981 年 3 月出生于河北省石家庄市，现为中国科学院国家空间科学中心工程师，主要研究方向为星载与机载雷达系统仿真、数字信号处理和雷达成像等。

E-mail:majianying@miralab.cn



朱 迪（通信作者）男，1978 年 11 月出生于陕西省咸阳市，现为中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师，主要研究方向为星载与机载遥感有效载荷设计、数字信号处理及卫星数据反演等。

E-mail:zhudi@miralab.cn

最新录用