

变角度下主被动微波遥感联合降尺度方法

郭鹏¹, 赵天杰², 施建成³, 孙彦龙⁴, 黄硕⁴, 牛升达⁵

1. 山东农业大学 信息科学与工程学院, 泰安 271018;

2. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

4. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;

5. 上海卫星工程研究所, 上海 201109

摘要: 被动微波遥感土壤水分空间分辨率低, 无法满足干旱监测、洪水预测以及灌溉管理等区域水利和农业等行业应用需求。中国在民用空间基础设施中规划论证的“陆地水资源卫星”搭载了雷达和辐射计主被动一体化微波载荷, 通过主被动联合降尺度可以获得高分辨率 (~5 km) 的土壤水分, 但其采用了一维合成孔径技术, 主被动微波传感器观测的地面入射角是变化的, 这给土壤水分反演及降尺度带来诸多挑战。本文从主被动微波遥感的物理机理和谱分析两种角度出发, 利用闪电河流域的航空飞行试验数据, 分析研究了基于主被动微波观测时间序列回归分析和基于谱分析的降尺度算法在辐射计和雷达入射角不同时的适用性。结果表明, 在辐射计入射角度 22.5°—27.5°时, 基于主被动微波观测时间序列回归分析方法在 27.5°时降尺度的结果最好, V 极化和 H 极化的 RMSE 分别为 7.57 K 和 7.46 K。基于谱分析方法在辐射计入射角度为 22.5°和 25°时得到的降尺度结果较好, V 极化和 H 极化的最小 RMSE 分别为 7.13 K 和 6.61 K, 比基于主被动微波观测时间序列回归分析方法分别降低了 0.44 K 和 0.85 K。基于主被动时间序列观测回归分析的降尺度方法, 依赖于主被动微波观测的时间序列观测, 当时序观测较短时, 可能会因为回归分析的不稳定对降尺度结果造成较大的影响, 而基于谱分析的降尺度方法则不需要依赖于长时间的时序观测。

关键词: 微波遥感, 辐射计, 雷达, 降尺度, 土壤水

引用格式: 郭鹏, 赵天杰, 施建成, 孙彦龙, 黄硕, 牛升达. 2021. 变角度下主被动微波遥感联合降尺度方法. 遥感学报, 25(4): 952-961

Guo P, Zhao T J, Shi J C, Sun Y L, Huang S and Niu S D. 2021. Downscaling algorithm using active-passive microwave observations with variable incident angle. National Remote Sensing Bulletin, 25(4): 952-961 [DOI: 10.11834/jrs.20219441]

1 引言

地表土壤水分控制着陆地表面和大气之间的水、能量和碳通量之间的交换, 是全球水循环、能量循环和碳循环研究的基础 (Legates 等, 2011; Ochsner 等, 2013)。因此, 土壤水分作为一个关键参数广泛应用于水文、气象、气候和水资源管理等应用中 (Anderson 等, 2007; Dobriyal 等, 2012; Loew 等, 2013; Robinson 等, 2008; Seneviratne 等, 2013; 梁顺林等, 2016)。微波遥

感监测地表土壤水分具有坚实的物理基础, 被认为是目前获取土壤水分最有效的手段 (Entekhabi 等, 2010; Kerr, 2007; Wignero 等, 2003)。从上世纪 70 年代开始, 针对微波遥感发展了一系列的算法 (Jackson, 1993; Lu 等, 2009; Njoku 和 Li, 1999; Njoku 和 Chan, 2006; Owe 和 Holmes, 2008; Shi 等, 2006; Wagner 等, 1999; Wigneron 等, 2000), 并发布了一系列的全球范围的微波遥感土壤水分产品, 但是, 由于目前的传感器硬件技术的限制, 这些产品的空间分辨率都低于 10 km, 无

收稿日期: 2019-12-19; 预印本: 2020-10-06

基金项目: 国家重大科学研究计划 (编号: 2015CB953700); 民用航天“十三五”技术预先研究项目; 中国科学院青年创新促进会 (编号: 2016061)

第一作者简介: 郭鹏, 1985年生, 男, 副教授, 研究方向为主被动微波联合降尺度土壤水分反演。E-mail: guopeng@sdau.edu.cn

通信作者简介: 赵天杰, 1985年生, 男, 副研究员, 研究方向为微波遥感土壤水分及其冻融态。E-mail: zhaotj@aircas.ac.cn

法满足气象预报、洪水预测以及灌溉管理等区域水文和农业活动的应用 (Entekhabi 等, 2010; Peng 等, 2017)。因此, 针对微波遥感土壤水分空间分辨率低的应用局限性, 微波遥感降尺度方法研究随之展开。2015年1月 NASA 发射了 SMAP (Soil Moisture Active and Passive) 卫星, 主要目的之一就是联合高分辨率的雷达主动观测 (3 km) 和低分辨率的辐射计被动观测 (36 km), 通过主被动微波遥感观测降尺度的方法获取一种空间分辨率优于 10 km 的土壤水分数据 (Entekhabi 等, 2010)。然而, SMAP 的雷达传感器在发射 2.5 个月之后由于故障停止工作, 但是通过收集到的全球主被动微波观测数据已经很好的证明了利用主被动微波遥感降尺度方法获取较高分辨率土壤水分数据的潜力 (Das 等, 2018)。

主被动微波遥感联合降尺度方法的基本思想是利用高空间分辨率的雷达观测数据对低空间分辨率的辐射计观测进行降尺度。最早的主被动联合降尺度方法是 Njoku 等 (2002) 基于土壤水分和雷达后向散射的近似线性关系和假设植被和土壤粗糙度在短期内不随时间变化提出的一种变化检测方法, 并利用 SGP99 的试验证明了其有效性。之后, Narayan 等 (2006) 利用 SMEX02 的试验数据, Piles 等 (2009) 利用 OSSE 试验数据证明了变化检测方法的有效性。但是, 变化检测方法获取的只是土壤水分的相对变化而不是绝对值, 并且随着时间的推移, 由于线性关系的适用性和地表植被以及粗糙度的变化等原因, 估算的土壤水分的误差会逐渐累积。随后, Das 等 (2011) 进一步改进了变化检测的方法, 使其不需要前期观测就可以估算绝对的土壤水分。此外, Zhan 等 (2006) 利用贝叶斯方法联合主被动微波数据进行降尺度。Kim 和 van Zyl (2009) 基于雷达后向散射和土壤水分之间的线性关系发展了利用时间序列降尺度的方法。但是这些方法都会随着时间推移而造成误差的积累。Guo 等 (2013) 基于空间频率谱分析的方法利用高分辨率的雷达观测对低分辨率的被动亮温进行降尺度。该方法基于主被动微波遥感之间的机理关系, 但是不需要利用主被动微波的时间序列观测进行回归就可以直接利用高分辨率的雷达观测进行降尺度。Das 等 (2014) 分析认为亮温可以表示为同频率同极化和交叉极化的后向散射观测的一次方程, 并基于此首先利用高分辨率

的雷达观测对低分辨率的被动辐射计观测的亮温降尺度, 然后再利用被动微波土壤水分算法反演得到降尺度后的土壤水分, 该方法目前作为 SMAP 主被动微波降尺度的基本算法已经证明了其有效性 (Das 等, 2018; Wu 等, 2014)。但是, SMAP 算法需要根据主被动微波的时间序列观测来回归降尺度过程中所需要的系数, 当时间序列观测较短时会造成降尺度结果的不稳定。Montzka 等 (2016) 利用小波图像增强的方法直接对高分辨率的主动土壤水分产品和低分辨率的土壤水分产品进行融合。该方法仅仅是利用图像处理的方法对反演得到的土壤水分进行降尺度, 并没有考虑到利用主被动微波之间的物理机理关系。以上目前已经开展的主被动微波联合降尺度研究大都是在主被动微波观测入射角度相同的情况下进行的。

中国在民用空间基础设施中规划论证的“陆地水资源卫星”采用一维合成孔径成像技术获取 L 波段的微波辐射亮温, 同时配备更高空间分辨率的雷达以支撑亮温或土壤水分的降尺度。不同于 SMAP 的固定角度观测, 陆地水资源卫星搭载的一维合成孔径微波辐射计成像过程中交轨方向的入射角度是变化的。而目前的主被动微波联合降尺度方法都是在雷达和辐射计入射角度固定的情况下开展的。因此, 本文针对“陆地水资源卫星”主被动微波载荷入射角度变化的特性, 在分析现有主被动微波联合降尺度算法的基础上, 利用闪电河流域的机载飞行数据, 从主被动微波的物理机理和谱分析两种角度出发, 分析研究当入射角度变化时现有降尺度算法的适用性, 为变角度下主被动微波遥感联合降尺度的发展提供理论研究基础。

2 数据与方法

2.1 闪电河流域航空飞行试验

本文数据来自闪电河流域水循环和能量平衡遥感综合试验 (Zhao 等, 2020; 赵天杰等, 2021), 试验区为覆盖滦河上游地区的 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的范围, 包含地势较为平坦的闪电河流域以及地形复杂的小滦河流域。研究区土地覆盖以农田、草地、森林为主, 包括少量的灌木和裸地。2018-09-17—26 针对陆地水资源卫星的载荷, 开展了闪电河流域的航空机载飞行试验, 其中南北航线的飞行区域横

跨农田、草地、森林逐渐变化的过渡地段,如图1中红色的航线所示。

航空飞行试验搭载了L波段主被动一体化微波载荷、双角度热红外相机、四波段多光谱相机和成像光谱仪对试验区进行同时观测,在70 km×12 km范围内进行了4次有效飞行(9月17日,19日,24日,26日),由于9月19日的雷达惯导数据存在异常,因此本研究中仅使用了17、24、26日共3 d的飞行数据。机载微波辐射计数据频率为1.41 GHz,空间分辨率为1 km,包含H和V两个极化通道,采用摆扫模式形成20°—34°的变化入射角数据。由于飞行时航线间隔为1 km,按照中心角度±1.25°的范围内进行亮温平均,最终形成22.5°—32.5°(角度间隔2.5°)的多入射角数据。机载雷达的频率为1.26 GHz,空间分辨率为100 m,包含HH、VV、VH和HV等4个极化通道,在33°—63°范围内进行成像。多角度的雷达观测数据,按照中心角度±5°的范围内进行后向散射平均,最终处理成为35°—55°(角度间隔2.5°)的多入射角数据。处理后的辐射计和雷达观测数据都投影到EASE(Equal-Area Scalable Earth) Grids 2.0格网下(辐射计的空间分辨率为1 km,雷达观测的空间分辨率为100 m),处理中剔除了格网中大于3倍标准差的观测值。

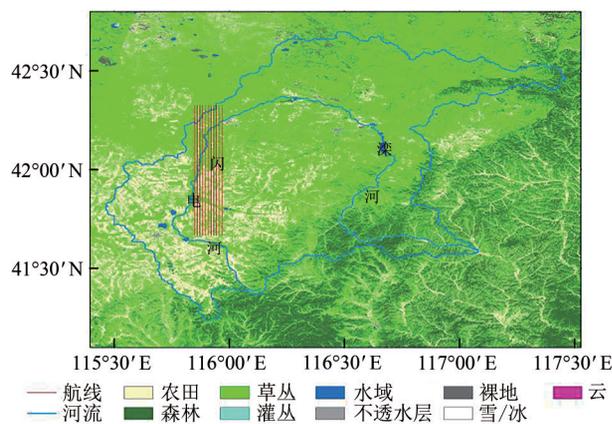


图1 试验区概况图

Fig.1 Overview of the study area

2.2 基于时间序列观测回归分析降尺度方法

该方法是SMAP计划主被微波联合降尺度的基础算法(Das等,2014),主要的理论基础是辐射计的亮度温度(T_B)观测和雷达的后向散射系数(σ)观测之间理论上存在一种线性关系(式(1)),该线性关系与地表的粗糙度、植被和入射角度有关。

$$T_{Bp} = \alpha + \beta \cdot \sigma_{pp} \quad (1)$$

式中, P 表示辐射计观测的H或V极化; PP 表示同极化的雷达后向散射观测,包括HH或VV极化; α 和 β 表示截距和斜率。

假设这种线性关系不受尺度的影响,即在粗尺度(C)和中尺度(M)下线性关系同时存在,即系数相同。同时考虑到中尺度和大尺度下土壤粗糙度和植被状况的差异性,引入同极化和交叉极化之间的关系对其修正(具体算法可参考Das等(2014)):

$$T_{Bp}(M_j) = T_{Bp}(C) + \beta(C) \cdot \left((\sigma_{pp}(M_j) - \sigma_{pp}(C)) - \Gamma(\sigma_{pq}(M_j) - \sigma_{pq}(C)) \right) \quad (2)$$

式中, pq 表示雷达的交叉极化, $T_{Bp}(M_j)$ 是 M 分辨率下像元 j 的亮温值, $\sigma_{pp}(M_j)$ 是相应的 M 分辨率下像元 j 的雷达的后向散射观测值。本文中, M 和 C 分辨率下的 σ_{pp} (单位是dB)是通过粗分辨率(C)脚印下所有的100 m雷达后向观测聚合得到。 C 分辨率下的 $T_{Bp}(C)$ 是通过1 km的辐射计观测升尺度而成。 $\beta(C)$ 依赖于地表植被覆盖和地表粗糙度,假设在 C 分辨率下不受时间和异质性的影响,就可以通过 $T_{Bp}(C)$ 和 $\sigma_{pp}(C)$ 的时间序列得到。雷达交叉极化的后向散射观测(hv 极化)对地表的植被和粗糙度敏感,在每个粗分辨率 C 像元下定义 $\Gamma = (\delta\sigma_{pp}(M_j)/\delta\sigma_{pq}(M_j))_C$,并用 $\Gamma = (\delta\sigma_{pp}(M_j) - \delta\sigma_{pq}(C))$ 对 C 分辨率下的异质性进行改正,这一项通过与因子 $\beta(C)$ 相乘转换为亮温,如式(2)所示。

2.3 基于谱分析的降尺度方法

该方法最早是由M.Montopoli等(2012)提出并应用于遥感水汽降尺度中,其基本思想是对高分辨率图像频谱域空间特征的正确模拟,估算更高分辨率图像的值。遥感图像经过频谱变换到频率域后,频率域的频谱特征可以由振幅 $A_V(s)$ 和相位 $\Psi_V(s)$ 表示:

$$F_V(s) = A_V(s) \cdot e^{-j \cdot \Psi_V(s)} \quad (3)$$

在图像的频率域,图像的功率谱密度与空间频率之间存在特定的幂指数关系:

$$\phi_V(s) = \left\langle |F_V(s)|^2 \right\rangle = \left\langle [A_V(s)]^2 \right\rangle \approx s^{-\nu} \quad (4)$$

式中, $\langle \cdot \rangle$ 表示期望算子, $|\cdot|$ 表示求模计算, $F_V(s)$ 为图像频率域的频谱, $\phi_V(s)$ 为功率谱密度, s 为空间频率。假设图像的整体空间分辨率范围内可

以分成已知的低分辨 s_{kn} 和未知的高分辨率 s_{un} 。对于同一地区，式 (4) 在低空间分辨率与高空间分辨率图像中同时成立，那么就可以根据低分辨率的图像确定式 (4) 的函数关系，然后估算高分辨率图像的频率域的振幅。即首先可以通过低分辨率的图像确定式 (4) 中的参数 v ，然后根据高空间分辨率图像的空间频率计算高空间分辨率的振幅。如果再通过某种方法能准确估算出高分辨率图像频率域的相位信息，就可以根据式 (3) 估算出高分辨率图像的频率域，然后经过频谱逆变换 (\mathfrak{S}^{-1}) 就可以得到高分辨率的图像。

$$V_d = \mathfrak{S}^{-1}(F_V(s)) = \mathfrak{S}^{-1}(F_{V_{kn}}(s_{kn}) + F_{V_{un}}(s_{un})) \quad (5)$$

主动的雷达后向散射与被动的辐射计亮温之间存在式 (1) 所示的近似线性关系。根据傅里叶变换的分配性质：

$$\mathfrak{S}(a \cdot f_1(x,y) + b \cdot f_2(x,y)) = a \cdot \mathfrak{S}(f_1(x,y)) + b \cdot \mathfrak{S}(f_2(x,y)) \quad (6)$$

式中， \mathfrak{S} 表示频谱变换过程。那么可以用雷达垂直极化 σ_v 频率域的相位来近似代替待求高分辨率频率域的相位，即由雷达观测值确定相位 (Determine Phase From Radar Observations)。这样由原始的粗分辨率的亮温观测估算得到高分辨亮温的振幅，由雷达观测来确定高分辨亮温的相位，这样就可以经过频谱逆变换得到高分辨率的图像。

2.4 降尺度方法的验证方法

为了保持与陆地水资源卫星主被动微波联合降尺度的一致性，在降尺度数据处理时首先将辐射计的空间分辨率由 1 km 通过对网格内观测值平均升尺度到粗分辨率 (C) 4 km，雷达观测由 0.1 km 分辨率升尺度到中分辨率 (M) 1 km。然后利用 1 km 分辨率的雷达观测基于主被动微波时间序列观测回归分析降尺度方法和基于谱分析降尺度方法分别对 4 km 分辨率的辐射计亮温观测进行降尺度，得到 1 km 分辨率降尺度后的亮温。最后利用 1 km 分辨率的辐射计原始观测亮温作为真值对两种降尺度方法的结果进行验证评价。

3 降尺度结果与分析

3.1 主被动时间序列观测回归分析的降尺度结果

研究表明雷达垂直极化 (VV) 与亮度温度

(T_b) 的相关性比水平极化 (HH) 要高 (Das 等, 2011; Wu 等, 2014)，因此降尺度结果验证选用雷达垂直极化 (VV) 后向散射观测与亮度温度 (T_b) 关系的组合，根据观测数据的覆盖范围最大的原则，本文辐射计选用观测角 22.5°—27.5° 的观测数据，雷达选用观测角 50°—55° 的观测数据，并按照不同角度的组合进行降尺度。按照辐射计观测角 22.5°, 25°, 27.5° 的观测数据，雷达观测角 50°, 52.5°, 55° 进行两两组合，并利用基于主被动时间序列观测回归分析的降尺度方法对航空飞行试验数据进行降尺度，主被动不同入射角度组合降尺度结果的均方根误差 (RMSE) 如表 1 所示。分析结果可以得出，主动观测为 52.5° 和 55° 时，在同样的辐射计入射角度下的均方根误差是一样的，在现有的机载观测数据下，降尺度结果均方根误差最小的组合是辐射计 27.5° 入射角度与雷达 52.5° 或 55° 入射角。

表 1 主被动时间序列观测回归分析的降尺度不同角度组合均方根误差

Table 1 RMSE (Root Mean Square Error) of the down-scaling results using the time series observations regression analysis under different incidence angel combination

极化方式	主动入射角	被动入射角		
		22.5°/K	25°/K	27.5°/K
V	50°	9.78	9.09	8.06
	52.5°	9.17	8.43	7.57
	55°	9.17	8.43	7.57
H	50°	8.21	8.20	8.20
	52.5°	7.47	7.47	7.46
	55°	7.47	7.47	7.46

被动辐射计入射角 27.5° 和主动入射角为 50°, 52.5° 和 55° 组合的亮温降尺度结果 (1 km) 与粗分辨率 (4 km) 的亮温、原始辐射计观测亮温 (1 km) 的对比如图 2 所示。图 3 为亮温降尺度结果 (1 km) 与原始辐射计亮温观测 (1 km) 对比如图 2 所示。图 3 为亮温降尺度结果 (1 km) 与原始辐射计亮温观测 (1 km) 对比如图 2 所示。从图 2 结果来看，基于主被动观测回归分析降尺度结果可以较好的再现空间上的细节信息，但是均方根误差较大，V 极化最低为 7.57 K，H 极化最低为 7.46 K，其原因可能是基于时间序列回归分析的降尺度方法当时间序列观测时间较长时才能得到可靠的回归系数，而本次飞行试验仅有 3 天的观测数据，因此，时间序列回归分析结果的不稳定会造成降尺度结果的误差较大。在图 3 中 V 极化降尺度结果与原始观测的对比如图 2 所示。在图 3 中 V 极化降尺度结果与原始观测的对比如图 2 所示。在图 3 中 V 极化降尺度结果与原始观测的对比如图 2 所示。

角度下都存在明显偏离 1 : 1 中心线的点, 其中 3 个点明显异常, 分析其原因是在 9 月 26 日的辐射计原始观测 (1 km) 中存在一个异常的高值区, 但是经过升尺度后, 粗分辨率尺度 (4 km) 下的亮

温数据并没有表现出异常, 且在雷达的观测下也没有出现对应的异常区, 因此在利用雷达观测降尺度后的结果中这种异常区域并没有被再现, 造成了降尺度结果与原始结果存在了这种较大的差异。

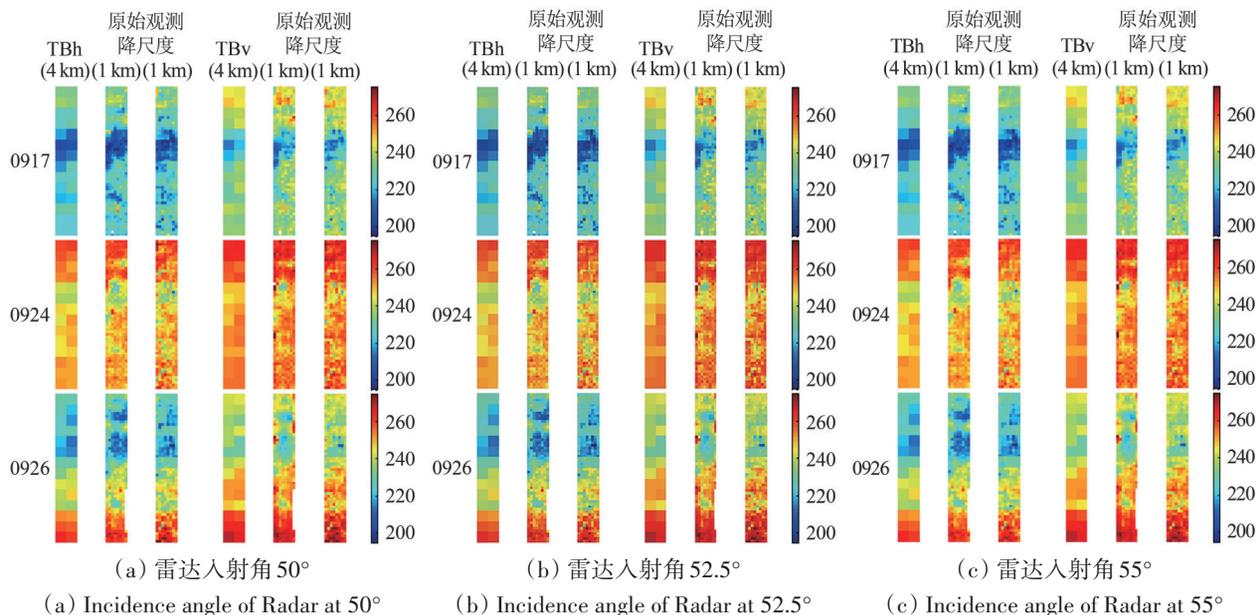


图2 辐射计观测角为 27.5°时,不同雷达入射角度(50°,52.5°和55°)的降尺度结果与粗分辨率观测和原始结果的对比如图
Fig.2 Comparison of the downscaled brightness temperature (T_b) with aggregated and observed T_b for different incidence angle of Radar (50°, 52.5° and 55°) at the incidence angle 27.5°of radiometer

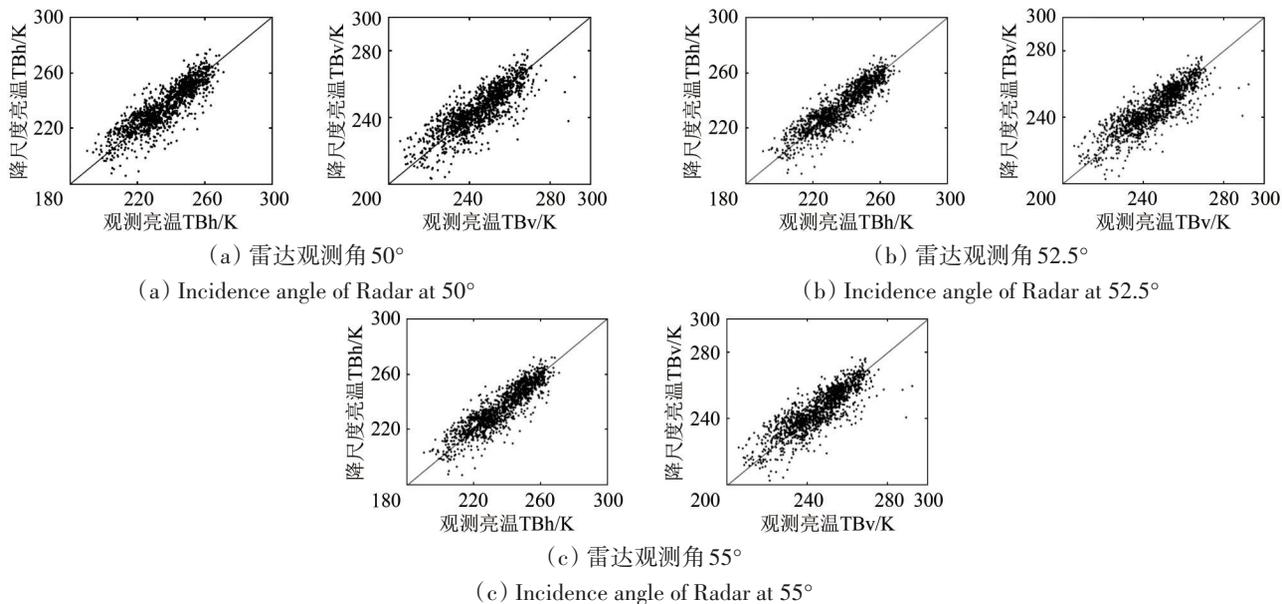


图3 辐射计观测角为 27.5°时,雷达入射角度为 50°,52.5°和 55°时间序列回归分析方法降尺度结果与原始观测值散点对比图
Fig.3 Scatter of the downscaled brightness temperature (T_b) with observed T_b for different incidence angle of radar (50°, 52.5° and 55°) at the incidence angle 27.5°of radiometer

3.2 基于谱分析方法的降尺度结果

按照辐射计入射角 22.5°—27.5°的观测数据, 雷达入射角 50°—55°两两组合进行降尺度, 利用

谱分析降尺度方法对航空飞行试验数据进行降尺度, 不同角度组合降尺度结果的均方根误差 (RMSE) 如表 2 所示。从表 2 中可以得出, 主动观

测的入射角为 52.5° 和 55° 时,在同样的被动入射角度下的降尺度结果是一样的,对于现有的观测数据下,谱分析降尺度结果均方根误差最小的入射角度组合为:V极化被动入射角度为 22.5° ,主动观测为 50° ;H极化被动入射角度为 25° ,主动入射角度为 50° 。在被动入射角度为 22.5° 和 25° 时,V极化和H极化在不同雷达入射角度下降尺度结果的RMSE虽然有差异,但差异较小。

表2 谱分析降尺度方法不同角度组合均方根误差
Table 2 RMSE (Root Mean Square Error) of the downscaling results using the spectral analysis method under different incidence angel combination

极化方式	主动入射角	被动入射角		
		22.5°/K	25°/K	27.5°/K
V	50°	6.61	6.74	7.43
	52.5°	6.65	6.77	7.45
	55°	6.65	6.77	7.45
H	50°	7.23	7.13	7.52
	52.5°	7.27	7.17	7.58
	55°	7.27	7.17	7.58

利用谱分析方法对试验数据进行降尺度,被动入射角 22.5° 和主动入射角 50° 和 55° 的降尺度结果(1 km)与粗分辨率(4 km)的亮温、原始辐

射计观测亮温(1 km)的对比如图4所示(由于雷达在入射角为 52.5° 和 55° 的降尺度结果是一样的,因此图4和图5中只对比了入射角为 50° 和 55° 的情况)。图5为谱分析方法降尺度结果(1 km)与原始辐射计亮温观测(1 km)对比的散点图。从结果看,基于谱分析方法的降尺度结果基本可以反映原始观测的空间分布情况,但是在个别区域有明显的版块现象,空间过渡不平滑,降尺度的痕迹较明显。从精度上看,H极化的RMSE最小为7.13 K,V极化的RMSE为6.61 K,整体上的精度比基于时间序列回归分析的精度要高。但是,图5降尺度结果与原始观测的散点对比图中,V极化下存在较多明显偏离1:1中心线的点,通过分析发现,在9月26日辐射计的原始观测中有一异常的高值区,而在升尺度后的粗分辨率情况下这种异常被弱化,并且在雷达的观测中相同区域并没有出现异常,最后的降尺度结果中也没有出现这些异常高值区,造成了降尺度结果与原始观测的对比出现了较大的偏差。在9月17日和24日的辐射计原始观测中也存在个别的高值异常区,但是主动雷达观测中正常的情况。这些都会导致利用雷达观测降尺度结果精度的降低,降尺度结果与原始观测差异较大的情况。

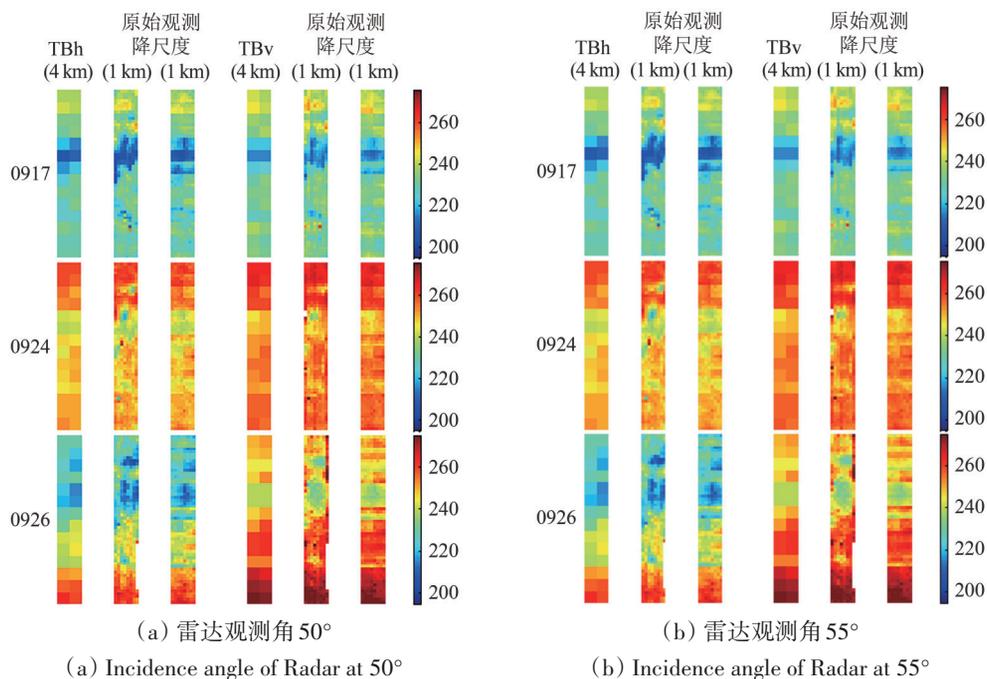


图4 辐射计观测角为 22.5° 时,雷达入射角度为 50° 和 55° 的谱分析方法降尺度结果图
Fig.4 Comparison of the downscaled brightness temperature (T_b) with aggregated and observed T_b for different incidence angle of Radar (50° and 55°) at the incidence angle 22.5° of radiometer

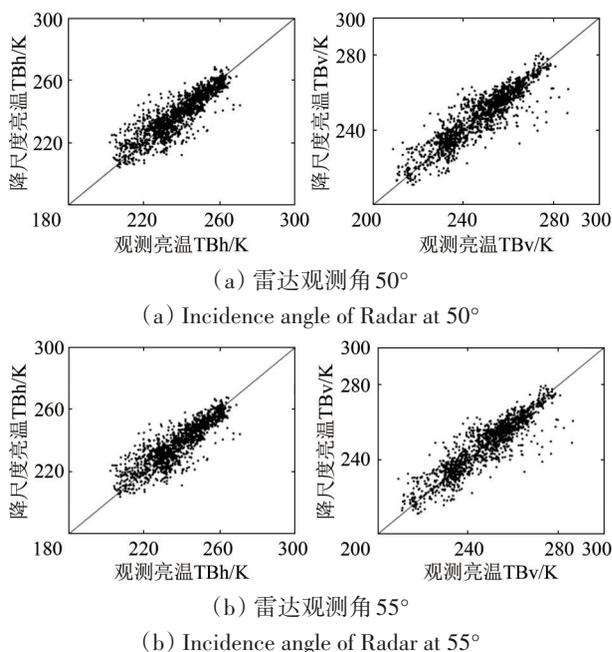


图5 被动观测角为22.5°时,主动入射角度为50°和55°的谱分析方法降尺度结果与原始观测值散点对比图

Fig.5 Scatter of the downscaled brightness temperature (T_b) with observed T_b for different incidence angle of radar (50° and 55°) at the incidence angle 22.5° of radiometer

4 结论

本文针对陆地水资源卫星的主被动一体化微波载荷采用一维合成孔径成像观测模式时入射角变化的特征,开展了入射角度变化情况下的主被动微波遥感联合降尺度方法研究。从主被动微波的物理机理和谱分析两种角度出发,发展了入射角度变化情况下主被动微波遥感谱分析降尺度方法,并利用闪电河流域的机载航空飞行数据对基于主被动微波时间序列观测回归分析方法(SMAP的官方算法)和基于谱分析的降尺度方法进行验证分析。

(1) 基于主被动时间序列观测回归分析的降尺度方法,依赖于主被动微波观测的时间序列观测,当时序观测较短时,可能会因为回归分析的不稳定对降尺度结果造成较大的影响。谱分析的方法根据频谱变换的性质,不需要回归得到主被动微波之间的关系,直接利用低分辨率的被动辐射计观测和高分辨率的雷达同极化观测(VV)进行降尺度,不需要依赖于长时间的时序观测。

(2) 根据试验验证结果,基于主被动微波观测时间序列回归分析方法在辐射计入射角度为

27.5°时降尺度的结果最好,V极化和H极化的RMSE分别为7.57 K和7.46 K。基于谱分析方法在辐射计入射角度为22.5°和25°时得到的降尺度结果较好,V极化和H极化的最小RMSE分别为7.13 K和6.61 K,比基于主被动微波观测时间序列回归分析方法分别降低了0.44 K和0.85 K。两种降尺度方法在不同角度下的降尺度结果是不同的。造成这种结果的原因可能是两种降尺度方法的机理是不同的。虽然两种方法都利用到了主被动微波观测之间的线性关系(式(1)),但是基于主被动微波观测时间序列回归分析方法是利用回归分析思想将主被动微波观测进行联合,需要利用时间序列观测回归降尺度中必要的参数进行降尺度。而基于谱分析的方法虽然也利用到了主被动微波之间的线性关系(式(1)),但是该方法没有实际去利用这种线性关系进行回归,而是通过谱分析方法借助这种关系将主被动微波观测信号的相位和振幅进行融合,从而达到降尺度的目的。由于本研究中的机载主被动微波观测数据的入射角度有限,无法确定两种方法下降尺度的最优的角度组合,因此在下一步的研究中需要对更多入射角度下的主被动微波联合降尺度进行分析研究,以确定最优的主被动联合降尺度的入射角度组合。

(3) 试验验证结果表明基于主被动微波观测时间序列回归分析方法在主被动微波入射角度差异较小时,得到的降尺度结果越好。而对于谱分析方法,主被动微波入射角度的影响不是特别明显。此外,两种方法在主动入射角度52.5°和55°时能得到非常一致的结果,其原因可能是在对主动雷达原始观测数据进行网格化时,是按照中心角度 $\pm 5^\circ$ 的范围内进行后向散射的平均,因此52.5°的观测数据与55°的观测数据具有一定的重复性,因此,下一步可以联合两个角度下的观测值进行降尺度。

对于被动微波观测的亮度温度 T_b 除了受地表发射率的影响外还受到地面温度的影响,而主动观测的后向散射系数 σ 则不受地表温度的影响,但是,研究表明(Wu等,2014)考虑地表温度变化,对基于主被动微波观测之间线性关系的精度提高几乎没有影响,地表温度的变化影响可以忽略,因此,本文在降尺度过程中也没有考虑地表温度的变化对主被动微波观测关系之间的影响。基于主被动观测时间序列分析降尺度方法的主要

限制就是假设在整个粗尺度像元下式(1)中的参数 β 是一个常数,但是在实际情况中,参数 β 是随着地表粗糙度和植被状态的变化而变化的,只要是粗尺度(C)像元下存在异质性,就会在降尺度的过程中引入误差。而基于谱分析的降尺度方法则是在中尺度像元(M)内假设参数 β 为常数,大大减小了异质性在降尺度过程中引入的误差,这也是谱分析方法精度高于基于时间序列观测回归分析方法的原因之一。此外,参数 β 是根据粗分辨率(C)下的亮温 T_b 和后向散射系数 σ 的时间序列观测回归得到,较长的时间序列才能保证参数 β 的可靠性,而本研究用的研究数据时间序列观测较短,这会导致回归得到的 β 可靠性降低,进而导致降尺度的精度降低,而基于谱分析的方法在降尺度过程中不需要利用主被动微波观测回归得到参数 β 。然而,两种方法都没有考虑到如何利用更高分辨率(F)的雷达观测信息来对获取的降尺度结果进行异质性校正的问题,因此,如何利用更高分辨率的雷达观测信息来进一步提高降尺度算法的精度是下一步研究的方向。

参考文献(References)

- Anderson M C, Norman J M, Mecikalski J R, Otkin J A and Kustas W P. 2007. A climatological study of evapotranspiration and moisture stress across the continental United States based on thermal remote sensing: 2. Surface moisture climatology. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112(D11): D11112 [DOI: 10.1029/2006JD007507]
- Das N N, Entekhabi D, Dunbar R S, Colliander A, Chen F, Crow W, Jackson T J, Berg A, Bosch D D, Caldwell T, Cosh M H, Collins C H, Lopez-Baeza E, Moghaddam M, Rowlandson T, Starks P J, Thibeault M, Walker J P, Wu X L, O'Neill P E, Yueh S and Njoku E G. 2018. The SMAP mission combined active-passive soil moisture product at 9 km and 3 km spatial resolutions. *Remote Sensing of Environment*, 211: 204-217 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.011]
- Das N N, Entekhabi D and Njoku E G. 2011. An algorithm for merging SMAP radiometer and radar data for high-resolution soil moisture retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(5): 1504-1512 [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2089526]
- Das N N, Entekhabi D, Njoku E G, Shi J J C, Johnson J T and Colliander A. 2014. Tests of the SMAP combined radar and radiometer algorithm using airborne field campaign observations and simulated data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(4): 2018-2028 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2257605]
- Dobriyal P, Qureshi A, Badola R and Hussain S A. 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458-459: 110-117 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.021]
- Entekhabi D, Njoku E G, O'Neill P E, Kellogg K H, Crow W T, Edelstein W N, Entin J K, Goodman S D, Jackson T J, Johnson J, Kimball J, Piepmeier J R, Koster R D, Martin N, McDonald K C, Moghaddam M, Moran S, Reichle R, Shi J C, Spencer M W, Thurman S W, Tsang L and Van Zyl J. 2010. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5): 704-716 [DOI: 10.1109/JPROC.2010.2043918]
- Guo P, Shi J C and Zhao T J. 2013. A downscaling algorithm for combining radar and radiometer observations for SMAP soil moisture retrieval//*IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Melbourne, VIC, Australia: IEEE: 731-734 [DOI: 10.1109/IGARSS.2013.6721261]
- Jackson T J. 1993. III. Measuring surface soil moisture using passive microwave remote sensing. *Hydrological Processes*, 7(2): 139-152 [DOI: 10.1002/hyp.3360070205]
- Kerr Y H. 2007. Soil moisture from space: where are we? *Hydrogeology Journal*, 15(1): 117-120 [DOI: 10.1007/s10040-006-0095-3]
- Kim Y and van Zyl J J. 2009. A time-series approach to estimate soil moisture using polarimetric radar data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2519-2527 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2014944]
- Legates D R, Mahmood R, Levia D F, DeLiberty T L, Quiring S M, Houser C and Nelson F E. 2011. Soil moisture: a central and unifying theme in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 35(1): 65-86 [DOI: 10.1177/0309133310386514]
- Liang S, Bai R, Chen X, Cheng J, Fan W, He T, Jia K, Jiang B, Jiang L, Jiao Z, Liu Y, Ni W, Qiu F, Song L, Sun L, Tang B, Wen J, Wu G, Xie D, Yao Y, Yuan W, Zhang Y, Zhang Y, Zhang Y, Zhang X, Zhao T and Zhao X. 2020. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 24(6): 618-671 (梁顺林,白瑞,陈晓娜,程洁,范闻捷,何涛,贾坤,江波,蒋玲梅,焦子锦,刘元波,倪文俭,邱凤,宋柳霖,孙林,唐伯惠,闻建光,吴桂平,谢东辉,姚云军,袁文平,张永光,张玉珍,张云腾,张晓通,赵天杰,赵祥. 2020. 2019年中国陆表定量遥感发展综述. *遥感学报*, 24(6): 618-671) [DOI: 10.11834/jrs.20209476]
- Loew A, Stacke T, Dorigo W, de Jeu R and Hagemann S. 2013. Potential and limitations of multidecadal satellite soil moisture observations for selected climate model evaluation studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(9): 3523-3542 [DOI: 10.5194/hess-17-3523-2013]
- Lu H, Koike T, Fujii H, Ohta T and Tamagawa K. 2009. Development of a physically-based soil moisture retrieval algorithm for spaceborne passive microwave radiometers and its application to AMSR-E. *Journal of the Remote Sensing Society of Japan*, 29(1): 253-262 [DOI: 10.11440/rssj.29.253]
- Montopoli M, Pierdicca N and Marzano F S. 2012. Spectral downscaling of integrated water vapor fields from satellite infrared observa-

- tions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(2): 415-428 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2161996]
- Montzka C, Jagdhuber T, Horn R, Bogena H R, Hajnsek I, Reigber A and Vereecken H. 2016. Investigation of SMAP fusion algorithms with airborne active and passive L-band microwave remote sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(7): 3878-3889 [DOI: 10.1109/TGRS.2016.2529659]
- Narayan U, Lakshmi V and Jackson T J. 2006. High-resolution change estimation of soil moisture using L-band radiometer and radar observations made during the SMEX02 experiments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6): 1545-1554 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.871199]
- Njoku E G and Chan S K. 2006. Vegetation and surface roughness effects on AMSR-E land observations. *Remote Sensing of Environment*, 100(2): 190-199 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.017]
- Njoku E G and Li L. 1999. Retrieval of land surface parameters using passive microwave measurements at 6-18 GHz. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1): 79-93 [DOI: 10.1109/36.739125]
- Njoku E G, Wilson W J, Yueh S H, Dinardo S J, Li F K, Jackson T J, Lakshmi V and Bolten J. 2002. Observations of soil moisture using a passive and active low-frequency microwave airborne sensor during SGP99. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(12): 2659-2673 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.807008]
- Ochsner T E, Cosh M H, Cuenca R H, Dorigo W A, Draper C S, Hagimoto Y, Kerr Y H, Larson K M, Njoku E G, Small E E and Zreda M. 2013. State of the art in large-scale soil moisture monitoring. *Soil Science Society of America Journal*, 77(6): 1888-1919 [DOI: 10.2136/sssaj2013.03.0093]
- Owe M, de Jeu R and Holmes T. 2008. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F1): F01002. [DOI: 10.1029/2007JF000769]
- Peng J, Loew A, Merlin O and Verhoest N E C. 2017. A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*, 55(2): 341-366 [DOI: 10.1002/2016RG000543]
- Piles M, Entekhabi D and Camps A. 2009. A change detection algorithm for retrieving high-resolution soil moisture from SMAP radar and radiometer observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(12): 4125-4131 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2022088]
- Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, Hornbuckle B K, Jones S B, Knight R, Ogden F, Selker J and Wendroth O. 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: a review. *Vadose Zone Journal*, 7(1): 358-389 [DOI: 10.2136/vzj2007.0143]
- Seneviratne S I, Wilhelm M, Stanelle T, Hurk B, Hagemann S, Berg A, Cheruy F, Higgins M E, Meier A, Brovkin V, Claussen M, Ducharme A, Dufresne J, Findell K L, Ghattas J, Lawrence D M, Malyshev S, Rummukainen M and Smith B. 2013. Impact of soil moisture-climate feedbacks on CMIP5 projections: first results from the GLACE-CMIP5 experiment. *Geophysical Research Letters*, 40(19): 5212-5217 [DOI: 10.1002/grl.50956]
- Shi J C, Jiang L M, Zhang L X, Chen K S, Wigneron J P, Chanzy A and Jackson T J. 2006. Physically based estimation of bare-surface soil moisture with the passive radiometers. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3145-3153 [DOI: 10.1109/TGRS.2006.876706]
- Wagner W, Lemoine G and Rott H. 1999. A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data. *Remote Sensing of Environment*, 70(2): 191-207 [DOI: 10.1016/S0034-4257(99)00036-X]
- Wigneron J P, Calvet J C, Pellarin T, Van de Griend A A, Berger M and Ferrazzoli P. 2003. Retrieving near-surface soil moisture from microwave radiometric observations: current status and future plans. *Remote Sensing of Environment*, 85(4): 489-506 [DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00051-8]
- Wigneron J P, Waldteufel P, Chanzy A, Calvet J C and Kerr Y. 2000. Two-dimensional microwave interferometer retrieval capabilities over land surfaces (SMOS mission). *Remote Sensing of Environment*, 73(3): 270-282 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00103-6]
- Wu X L, Walker J P, Das N N, Panciera R and Rüdiger C. 2014. Evaluation of the SMAP brightness temperature downscaling algorithm using active-passive microwave observations. *Remote Sensing of Environment*, 155: 210-221 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.08.021]
- Zhan X W, Houser P R, Walker J P and Crow W T. 2006. A method for retrieving high-resolution surface soil moisture from hydros L-band radiometer and radar observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6): 1534-1544 [DOI: 10.1109/TGRS.2005.863319]
- Zhao T J, Shi J C, Lv L, Xu H, Sun Y, Chen D, Cui Q, Huang S, Niu S, Li X, Yan G, Jia L, Chen L, Liu Q, Zhao K, Zheng X, Zhao L, Zheng C, Ji D, Xiong C, Wang T, Li R, Pan J, Wen J, Yu C, Zheng Y, Jiang L, Chai L, Lu H, Yao P, Ma J, Lv H, Wu J, Zhao W, Yang N, Guo P, Li Y, Hu L, Geng D, Zhang Z, Hu J and Du A. 2020. Comprehensive remote sensing experiment of water cycle and energy balance in the Shandian River basin (Chinese). *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 25(4): 871-887 (赵天杰, 施建成, 吕利清, 徐红新, 孙彦龙, 陈德清, 崔倩, 黄硕, 牛升达, 李秀伟, 阎广建, 贾立, 陈良富, 柳钦火, 赵凯, 郑兴明, 赵利民, 郑超磊, 姬大彬, 熊川, 王天星, 李睿, 潘金梅, 闻建光, 穆西哈, 余超, 郑姚闯, 蒋玲梅, 柴琳娜, 卢麾, 姚盼盼, 马建威, 吕海深, 武建军, 赵伟, 杨娜, 郭鹏, 李玉霞, 胡路, 耿德源, 张子谦, 胡建峰, 杜爱萍. 2021. 闪电河流域水循环和能量平衡遥感综合试验. *遥感学报*, 25(4): 871-887)
- Zhao T J, Shi J C, Lv L, Xu H, Chen D, Cui Q, Jackson T J, Yan G, Jia L, Chen L, Zhao K, Zheng X, Zhao L, Zheng C, Ji D, Xiong C, Wang T, Li R, Pan J, Wen J, Yu C, Zheng Y, Jiang L, Chai L, Lu H, Yao P, Ma J, Lv H, Wu J, Zhao W, Yang N, Guo P, Li Y, Hu L, Geng D and Zhang Z. 2020. Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 240: 111680 [DOI: 10.1016/j.res.2020.111680]

Downscaling algorithm using active–passive microwave observations with variable incident angle

GUO Peng¹, ZHAO Tianjie², SHI Jiancheng³, SUN Yanlong⁴, HUANG Shuo⁴, NIU Shengda⁵

1. College of Information Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;
2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China;
3. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109 China;
5. Shanghai Satellite Engineering Institute, Shanghai 201109, China

Abstract: Soil moisture derived from passive microwave remote sensing has a low spatial resolution, which cannot meet the requirement for the application of regional hydrological and agricultural activities, such as meteorological forecast, flood forecast, and irrigation management. The integrated microwave load of radar and radiometer loaded on “land-water resource satellite,” which is planned and demonstrated by Chinese civil space infrastructure, will obtain high-resolution soil moisture with the combination of active and passive microwave observation by using a one-dimensional synthetic aperture imaging observation mode. However, the incidence angle changes during observation. Present downscaling algorithms with combination of active and passive microwave observations are developed under the condition of fixed incident angles of radar and radiometer. In this study, downscaling algorithms based on time series regression analysis and spectral analysis are tested using the air flight experimental data of a lightning river basin to demonstrate that the feasibility of each for application to the incidence angles of radiometer and radar differs.

The downscaling method based on time series regression analysis is the basic algorithm for Soil Moisture Active and Passive. The principal theoretical basis for this method is the linear relationship between the brightness temperature observation of radiometer and the backscatter coefficient observation of radar, and the linear relationship is related to surface roughness, vegetation, and incident angle. The spectral analysis downscaling method was first proposed and applied to remote sensing water vapor downscaling. Its theoretical basis is to obtain a high-resolution image by correctly simulating the spatial characteristics of the image spectral domain.

The downscaling results based on active and passive observation regression analysis can reproduce spatial details, but the root-mean-square error (RMSE) is large. The minimum RMSE of V polarization is 7.57 K, and the minimum RMSE of H polarization is 7.46 K. The downscaling results based on spectral analysis can basically reflect the spatial distribution of the original observation. Nevertheless, evident plate phenomena occur in some areas, the spatial transition is not smooth, and the traces of downscaling are obvious. The minimum RMSE of H polarization is 7.13 K, and that of V polarization is 6.61 K. In accordance with the RMSE, the overall accuracy of the spectral downscaling method is higher than that of the time series regression analysis.

The downscaling method based on the regression analysis of active and passive observation depends on the time series observation of active and passive microwave observation. The method of spectrum analysis does not need to regress to determine the relationship between active and passive microwave. It directly uses low-resolution passive radiometer observation and high-resolution radar copolarization ($\nu\nu$) observation for downscaling and does not need to rely on long-term time observation. The experimental results indicate that the time series regression analysis downscaling method can obtain the best results when the incident angle of radiometer is 27.5° and that of radar is 52.5° or 55°. The minimum RMSEs of V and H polarizations are 7.57 K and 7.46 K, respectively. The minimum RMSEs of V and H polarizations are 7.13 K and 6.61 K, respectively, for the spectral analysis downscaling method, which are 0.44k and 0.85 K, respectively, lower than those of the time series regression analysis downscaling method.

Key words: microwave remote sensing, radiometer, radar, downscaling, soil water

Supported by National Key Basic Research Program of China (No. 2015CB953700); The 13th Five-Year Plan of Civil Aerospace Technology Advanced Research Projects; the Youth Innovation Promotion Association of Chinese Academy of Sciences (No. 2016061)