

风云三号卫星微波和光谱信号的匹配及其反演应用

陈逸伦^①, 张昇祺^①, 傅云飞^{①②*}, 张鹏^③, 卢乃锰^③, 何清^④

① 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;

② 安徽省气象科学研究所, 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031;

③ 国家卫星气象中心, 北京 100081;

④ 中国气象局沙漠气象研究所, 乌鲁木齐 830002

* 联系人, E-mail: fyf@ustc.edu.cn

2016-03-25 收稿, 2016-06-12 修回, 2016-06-14 接受, 2016-08-19 网络版发表

国家公益性行业支撑项目(GYHY201306077)和国家自然科学基金(41230419, 91337213)资助

摘要 风云三号(FY-3)气象卫星作为我国第二代极轨气象卫星, 已在轨运行了7年有余, 它上面搭载了微波成像仪(MWRI)和可见光红外扫描辐射计(VIRR)等多台仪器, 可有效地对全球大气、海洋和陆面进行遥感观测. MWRI的多通道对云和降水等具有很好的探测能力, 其空间分辨率随通道的频率而变化, 低频通道空间分辨率低; VIRR各通道则具有很高的空间分辨率, 可获取目标物的表面信息. 本文依据多信息匹配及融合概念及原理, 在VIRR像元上获得MWRI各通道亮温, 其目的是在VIRR像元上获得光谱信号相应的微波信号, 同时也获得了MWRI的高计算分辨率. 为实现上述两种资料的信息匹配, 分别采用了距离反比权重法(inverse distance weighted, IDW)和就近取值法(nearest neighbor interpolation, NNI), 首先通过两种方法的自检验分析比较其结果的优劣, 然后确定误差较小的IDW方法作为两仪器探测信号的匹配方法; 计算结果表明, 该方法在获得高MWRI计算分辨率的同时, 产生的低频通道误差小于1 K、高频通道误差小于3 K, 未对原始信号产生不可接受的歪曲. 作为该匹配数据的应用, 本文利用匹配数据中的微波低频通道对云具有一定穿透性的特点, 反演了青藏高原地表温度, 通过比较该温度与热红外通道亮温识别晴空区和云区, 然后利用该数据中的光谱信号识别雪和云相态. 由于综合了FY-3微波与光谱信息, 从而提高了云和雪的识别能力.

关键词 风云三号, 微波, 光谱, 匹配融合, 云和雪识别

风云三号卫星(FY-3)是我国新一代极轨气象卫星, 它的首颗星风云三号A星(FY-3A)于2008年5月成功发射升空^[1], 至今已有3颗在轨卫星(A星、B星和C星), 积累了大量探测数据. FY-3搭载的可见光红外扫描辐射计(VIRR)和微波成像仪(MWRI)等多台仪器, 能对全球的大气、陆面和海面进行遥感观测, 为大气环境、数值预报和气候变化等研究提供了绝佳机遇^[2]. 利用FY-3的遥感观测资料, 目前已有对云冰含量^[3]、臭氧分布^[4]和降水^[5]等参数的反演研究, 取得

了很多成果^[6,7].

微波遥感通常是利用1~1000 GHz频率获得目标物的信号, 由于微波比可见光和红外线的波长得得多, 它基本不受大气中的烟雾、气溶胶、云(在低频通道)影响, 可实现全天候全天时的对地遥感观测^[8]. 根据微波遥感原理, 微波的低频通道可表征地表及云中水粒子的发射辐射信息, 而高频通道受冰粒子散射影响, 可用于云冰的反演^[9]. 目前, 学者们已开发出了大气水汽柱浓度^[10]、地表雪水当量^[11]、地表

引用格式: 陈逸伦, 张昇祺, 傅云飞, 等. 风云三号卫星微波和光谱信号的匹配及其反演应用. 科学通报, 2016, 61: 2939–2951

Chen Y L, Zhang A Q, Fu Y F, et al. A method and its retrieval application for collocating the FY-3 microwave and VIS/IR data (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 2939–2951, doi: 10.1360/N972016-00102

降水强度^[12]等诸多参数的反演算法。然而,与可见光红外扫描仪约1 km的高分辨率相比,微波成像仪的分辨率较低,通常大于10 km,这极大地制约了微波通道的精细探测能力。一方面,如何提高微波通道的计算分辨率是目前亟需解决的问题;另一方面,由于FY-3上的诸多仪器在同一时刻注视的目标物不同、探测的分辨率不同,多仪器探测同一目标物的信号融合问题也需要解决。提高微波多通道遥感数据的计算分辨率,并将其融合到高空间分辨率的光谱像元上,不仅能实现微波与光谱的协同观测,增强获取目标物的信息,还能提高大气参数和地表参数等反演的确定性。

为解决上述问题,研究者曾围绕SSM/I(special sensor microwave/imager)多通道不同分辨率展开很多研究,如Poe^[13]曾利用BG理论(Backus-Gilbert theory)对SSM/I数据进行插值、重采样和平滑,获得了较高质量微波图像;Robinson等人^[14]则利用BG理论将所有通道统一到37 GHz的分辨率上,以消除SSM/I不同通道之间分辨率差异对反演云水、降水等参数的影响;Farrar和Smith^[15]则利用去卷积的方法将低频通道分辨率匹配至高频通道85 GHz的分辨率上;Long和Daum^[16]则利用BGI(Backus-Gilbert inversion)和SIR(scatterometer image-reconstruction)算法来提高SSM/I数据图像质量,结果表明两种算法对计算分辨率提高的能力相近;Migliaccio和Gambardella^[17]利用GBI求解积分方程和TSVD(truncated singular value decomposition)奇异值分解矩阵这两种算法来提高SSM/I的计算分辨率,这两种算法均通过辐射计观测值的加权求和来重建亮温,但前者计算复杂,需要多组系数,而后者则需要获得一组系数。由于目前卫星微波成像仪探测时,其低频通道相邻的像元存在部分重合,客观上就造成了小范围(10~40 km)内低频通道的亮温空间分布基本连续,这从数学上为提升微波成像仪低频通道的计算分辨率带来了便利,基于此Fu等人^[18]提出了利用动态最小二乘法的二次曲面拟合技术方法,来构建PR(Precipitation Radar)像元附近多个TMI(TRMM Microwave Imager)像元亮温构成的二次曲面,然后在该曲面PR像元位置重新采样,从而获得了PR像元位置相应的TMI 9个通道的亮温,实现了TMI低频通道计算分辨率的提高及其与PR的融合。高越等人^[19]还评估了多种融合方法对提升TMI计算分辨率的影响。

由于匹配融合资料具有目标物的综合信息,因此对卫星多仪器探测结果的综合应用具有极大的帮助,如作者利用上述融合方法,得到了台风云娜降水特征及其降水云与非降水云的微波信号及光谱信号特征^[9]。目前,该融合方法及其资料已有了很多应用^[20~23]。本文将针对FY-3的MWRI与VIRR的探测特点,研发一套原理简明、计算方便、具有普适性和可移植性的快速信息匹配融合计算方法,实现MWRI多通道微波亮温具有高空间计算分辨率,并实现其与VIRR光谱信号的匹配融合。作为示范应用,本文最后给出了利用两者匹配融合数据,进行了晴空区与云区及雪区的识别,并反演了地表温度及积雪。

1 数据和方法

1.1 试验数据

FY-3B星是FY-3(01批)试验星的第二颗星,它充分继承了A星的成熟技术,于2010年11月5日发射升空,投入业务运营^[24]。该卫星轨道高度831 km,轨道倾角98.81°,绕地球一周约102 min。本文使用资料为FY-3B的L1级产品,分别由VIRR和MWRI探测得到。

VIRR在0.44~12.5 μm 的波长范围内共有10个探测通道,扫描宽度为 $\pm 55.4^\circ$,星下分辨率1.1 km,可用于观测云、植被、雪、气溶胶、陆/海表温度等参量;VIRR的探测结果每5 min存为一个文件,分别给出了目标物的反射率和热辐射温度;VIRR探测的红外亮温误差低于0.3 K,等效反射率误差低于0.002。MWRI使用10.65, 18.7, 23.8, 36.5和89 GHz频率进行对地探测,每个频率包含垂直和水平两种极化方式;该仪器采用绕轴旋转的扫描方式,其星下点分辨率与其扫描频率有关,10.65 GHz的星下点分辨率为51 km $\times$ 85 km,而89 GHz的为9 km $\times$ 15 km;MWRI的灵敏度为0.6~2 K,定标误差为1.2~2.8 K,且误差随频率增加而增加;MWRI可以全天候监测降水、地表温湿等参量。MWRI的数据产品则是以轨道为单位进行输出^[1,2]。

1.2 匹配融合方法

VIRR每5 min即可获得包含2048 $\times$ 1800个像素单幅图像,数据量大。利用去卷积方法提升计算分辨率的运算过于复杂,而且提高计算分辨率而导致的噪声增大仍然无法避免。相对而言,IDW方法和NNI方

法计算更加快捷简便. 一些研究结果表明这些方法均能获得较好的资料匹配融合效果, 如利用IDW融合TRMM平台上的多仪器探测结果^[21].

IDW是基于“地理第一定律”的基本假设: 两个物体相似性随他们之间的距离增大而减小. 在已知点信息分布均匀的情况下, IDW的效果更好, 故它常用于气象场的插值. 根据IDW计算公式, VIRR像元上待计算的微波亮温 T_c (下标c代表英文collocating(匹配), T_c 即提升计算分辨率后的亮温)可表示为

$$T_c = \frac{\sum_{i=1}^n (1/d_i)^k T_i}{\sum_{i=1}^n (1/d_i)^k}, \quad (1)$$

式中, T_c 由该VIRR像元周围小区域内 n 个MWRI像元亮温(T_i ; $i=1, \dots, n$)计算得到, d_i 为第 i 个MWRI像元与该VIRR像元直接的距离, k 是加权幂指数, 用来调节插值函数曲面的形状. 在本文中, 幂指数 k 取2, 小区域的半径为15 km, 即找出该区域内所有MWRI像元进行IDW的计算. 这样的设置保证了每个VIRR像元周围均有6~20个MWRI的探测点, 既降低了整个插值过程的计算量, 又能最大程度地保留原始的探测信息.

NNI方法基于一个隐含的假设条件, 即任意一点的属性值与距离其最近位置点的属性值相同, 也就是由待计算点的信息可用其最邻近点的信息代替. 根据此原理, VIRR像元上的微波亮温可由距该VIRR像元位置最近的MWRI的微波亮温表示. 由于两部仪器的像元位置定标精度都很高, VIRR像元距离两个MWRI像元距离相同的概率极低, 但如果出现这种情况, 选取两个最近点亮温的均值作为VIRR像元上的微波亮温.

1.3 两种方法的检验

在将MWRI匹配融合到VIRR的分辨率上之前, 有必要先了解VIRR的探测情况, 图1给出了FY-3B在过境青藏高原时VIRR的探测结果, 探测时间为2013年12月14日07:55(UTC), 这一时次对应当地午后; 由于VIRR分辨率较高, 各通道的影像看着十分细腻. VIRR的第四通道(图1(d))表明青藏高原西部(78°~83°E)大部分为晴空, 亮温在270~285 K之间, 在这片晴空区西侧, 有一片积雪区(亮温低于230 K); 83°E以东的高原上从各通道来看, 短波波段(可见光及近红外)高反射率(大于0.2)基本上反映了晴空地表积雪、冰

川及云的位置, 而中波和长波的低辐射亮温区(低于263 K)基本反映了云的位置, 第十通道作为水汽吸收带, 也一定程度说明了高原东南部存在大量的水汽. 此外, VIRR各通道影像中, 青藏高原轮廓清晰, 可见该仪器探测结果对地域特征具有很好的探测能力. 由此可见, 如果将粗分辨率的MWRI匹配融合到高分辨率的VIRR分辨率上, 将大大地改善MWRI的观测能力.

首先, 使用自检验方法来评估上述两种匹配融合方法的优劣. 所谓自检验方法, 就是随机抽取MWRI探测的部分像元位置(坐标)作为待检验点, 这些点的微波亮温为真值; 随后选取这些待检验点周围MWRI像元亮温, 利用NNI和IDW两种方法, 分别计算获得待检验点的微波亮温(计算亮温); 然后将待检验点的微波真值与该计算亮温进行比较(真值和计算值之差), 就可以知道两种方法的优劣.

为清楚地表示上述所言的自检验效果, 使用概率密度分布图和散点分布图来进行分析, 如图2和3所示. 选取检验的数据为2013年12月14日MWRI各通道扫描的一整条轨道的微波亮温. 图2的横坐标为计算亮温与微波真值之差, 而图3的横坐标为亮温真值, 纵坐标为计算亮温, σ 为均方根偏差, R 为相关系数. 从图2和3中看出, 在低频通道亮温真值与IDW方法得到的计算亮温差异极小, 标准偏差仅有0.38~1 K左右, 远低于它的定标误差(1.2~2 K), 且计算亮温与微波真值之差呈现准正态分布. 这主要由于低频通道相邻像元之间存在部分重叠, 因而低频通道探测的亮温呈现较好的连续性分布, 这一特性十分有利于IDW法获取MWRI低频粗分辨率的高计算分辨率. 图2和3表明随着MWRI频率的升高, 计算亮温与微波真值之差的标准偏差明显增大, 最大可达2.87 K, 但二者之差的概率密度分布仍稳定在0 K, 相关系数也稳定在0.99以上, 由此可见计算亮温与微波真值具有很好的一致性, 再次表明IDW法的可靠性. MWRI高频通道的计算亮温与微波真值之间差异增大的原因, 可能是MWRI高频通道的像元分辨率较高, 其相邻像元之间没有重叠部分, 因此高频通道亮温分布的连续性比低频通道的差. 这一现象与Fu等人^[18]在融合TMI各通道亮温时所遇情况类似, 不过匹配融合MWRI要比融合TMI产生的标准偏差小0.6~1 K, 是否说明MWRI探测性能优于TMI呢?

NNI方法得到的计算亮温与亮温真值之差同样

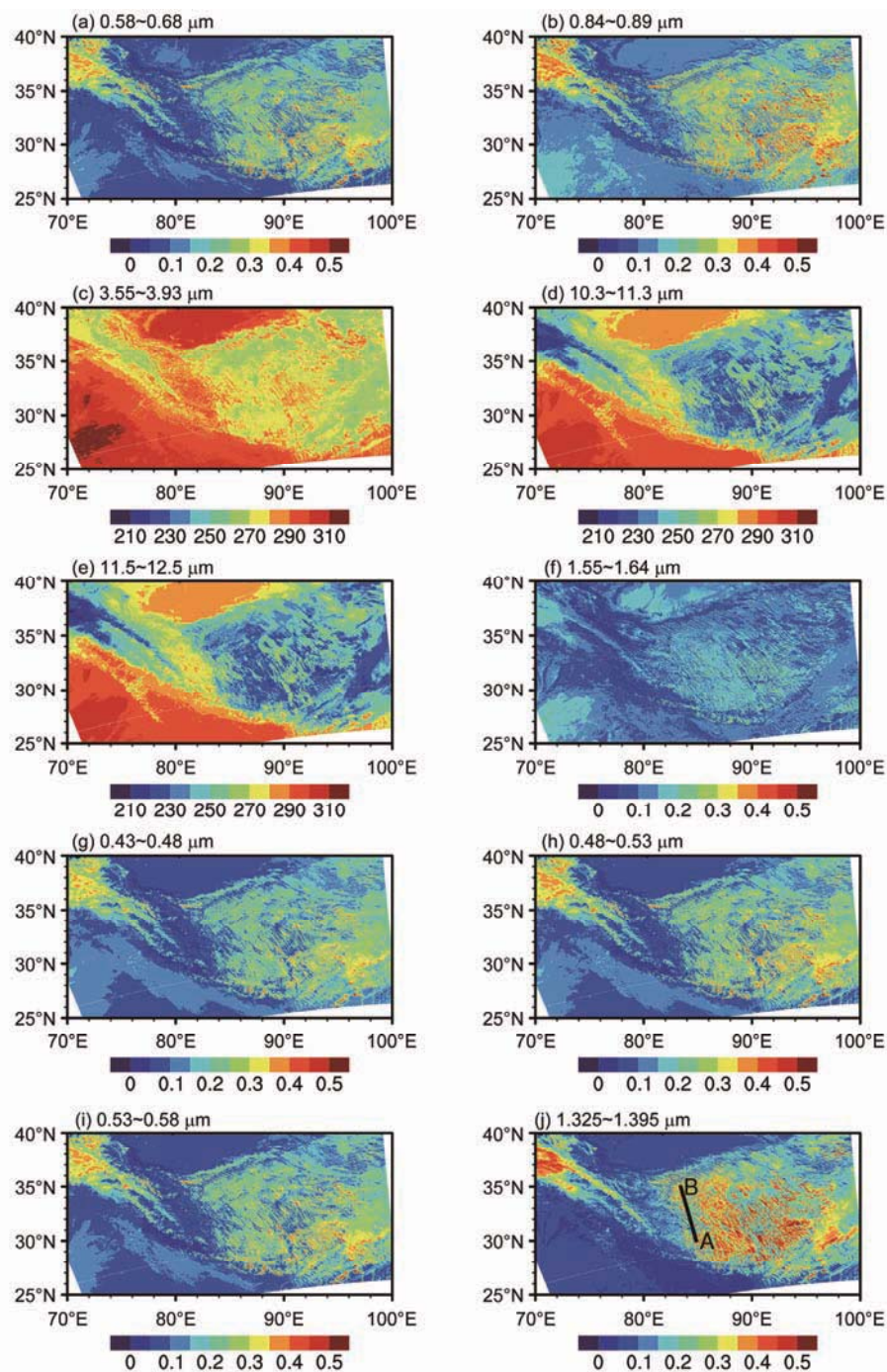


图1 2013年12月14日07:55(UTC)VIRR的10个可见光(红外)通道探测的反射率(亮温)

Figure 1 Reflectivity (brightness temperature) of 10 visible (infrared) channels of VIRR at 07:55 UTC on 14 December 2013

符合正态分布,但其标准差甚至可以达到IDW方法标准差的2倍。在10个微波通道下,NNI方法的标准差全部高于IDW方法的标准差,相关系数也全部低于IDW方法。虽然Liu等人^[25]将NNI方法多次用在了卫星数据融合上,并由该数据集得到了许多结果,不过

本文研究表明,IDW方法在提升FY-3的MWRI计算分辨率方面要优于NNI方法。因此,本文之后的工作均选用IDW方法进行。

图4为这条MWRI轨道通过青藏高原时探测的结果以及利用IDW方法匹配融合到VIRR像元上的结

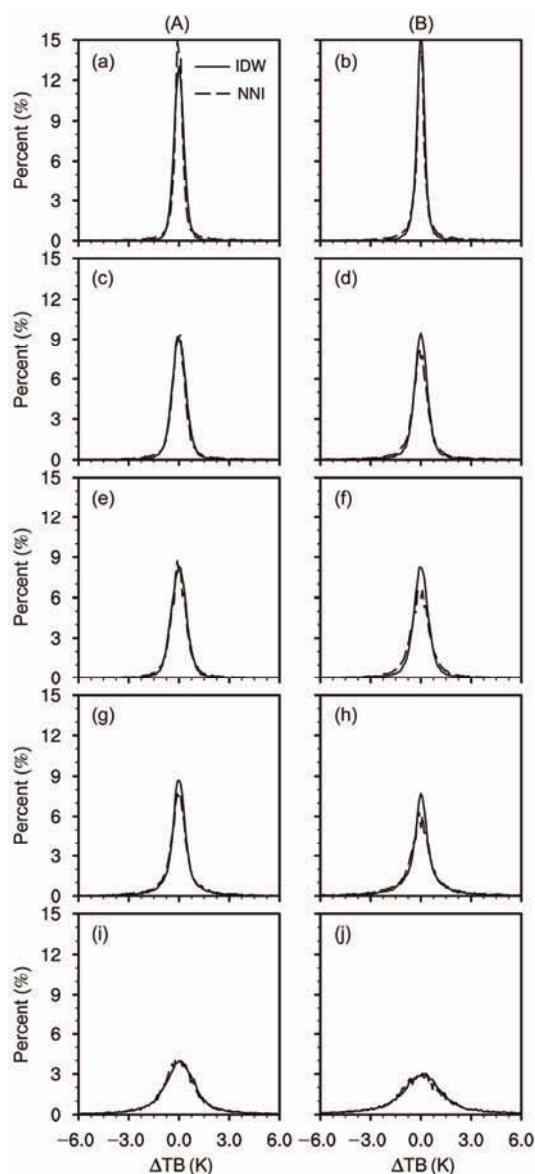


图2 2013年12月14日MWRI一整条轨道扫描的微波通道通过IDW和NNI方法得到的计算亮温与微波真值之差(ΔTB)的概率密度分布。(A) 垂直极化通道(V); (B) 水平极化通道(H); (a), (b) 10.65 GHz; (c), (d) 18.7 GHz; (e), (f) 23.8 GHz; (g), (h) 36.5 GHz; (i), (j) 89 GHz
Figure 2 Probability density distribution of the difference between calculation brightness temperature and true value (ΔTB) calculated by IDW and NNI method from a whole MWRI track on 14 December 2013. (A) vertical polarization channels (V), (B) horizontal polarization channels (H); (a), (b) 10.65 GHz; (c), (d) 18.7 GHz; (e), (f) 23.8 GHz; (g), (h) 36.5 GHz; (i), (j) 89 GHz

果。高频通道对冰粒子的散射十分敏感, 90°E区域可能存在冰云或深厚降水; 18.7和36.5 GHz通道对积雪较为敏感, 可得到雪的相关信息。原始探测结果与IDW匹配融合结果的整体分布情况基本相同, 并未发生失真、歪曲, 并且提升计算分辨率后, 图像显得

更加细致, 这说明IDW方法不仅实现了MWRI与VIRR的匹配融合, 同时也提高了MWRI的计算分辨率。

为了确信提升微波成像仪计算分辨率的效果, 对IDW方法产生的匹配融合数据进行了统计分析。表1给出了图4所示轨道在高原区域(70°~100°E, 26°~40°N)的各项统计特征, 表明各通道亮温匹配融合前后均值的差异都很小, 差异最大的89H通道为2.41 K, 对应的相对偏差约为1.01%, 其余各通道的相对差异均小于0.75%, 这表明IDW方法对MWRI各通道分辨率的细化结果可以接受。根据IDW方法本身的数学和物理意义, 它会对原始的数据产生一定的平滑, 因此细化后亮温的最小值会增加, 最大值会减小, 标准差也会相应的减小。表1显示, 细化后的标准差降低了0.14~1.31 K。值得注意的是, 由于MWRI原始探测像元所包含的信息固定(也具有非均一特点, 如云区不能充满像元), 利用IDW方法只是提高微波成像仪的计算分辨率而非实际分辨率, 因此一些极值的损失不可避免, 这也是粗分辨率降尺度过程的代价。

为了解细化过程(也是像元的降尺度过程)引起原始信息丢失的程度, 进行了信息逆向还原分析, 即计算原始粗分辨率范围(像元大小)内多个(约1000个VIRR像元)细化后亮温值的和(相当于升尺度计算)。图5为升尺度还原的计算结果, 横轴为MWRI原始亮温, 纵轴为升尺度至MWRI像元上的亮温, 选取的区域为前面所取的高原范围, 还原计算结果表明在低于37 GHz的各通道上其与像元原始亮温值之间存在偏差很小, 只是在89 GHz通道上产生稍大的差异; 产生上述差异的原因为两步计算后造成了最小值的增高。整体而言, 升尺度计算后的亮温与原始亮温之间的相关系数仍然很高, 差值的标准差也可以接受。因此, 本文使用IDW方法匹配融合VIRR与MWRI的探测结果可行。

为了清楚展现IDW方法的匹配融合效果, 图6给出了沿VIRR图像AB线上(图1(j))经IDW匹配融合计算后的MWRI低频通道10.65 GHz和高频通道89 GHz的水平极化亮温分布、VIRR的0.58~0.68 μm 通道反射率和10.3~11.3 μm 通道红外辐射温度分布。图6中可见沿AB线上, 30.5°N和31.5°N附近的VIRR可见光通道反射率小于0.1, 对应晴空区, 而其他位置的反射率变化于0.1~0.35之间(特别是在33.5°~34.5°N之间), 大体对应浅薄的非降水云, 它们在VIRR远红外通道

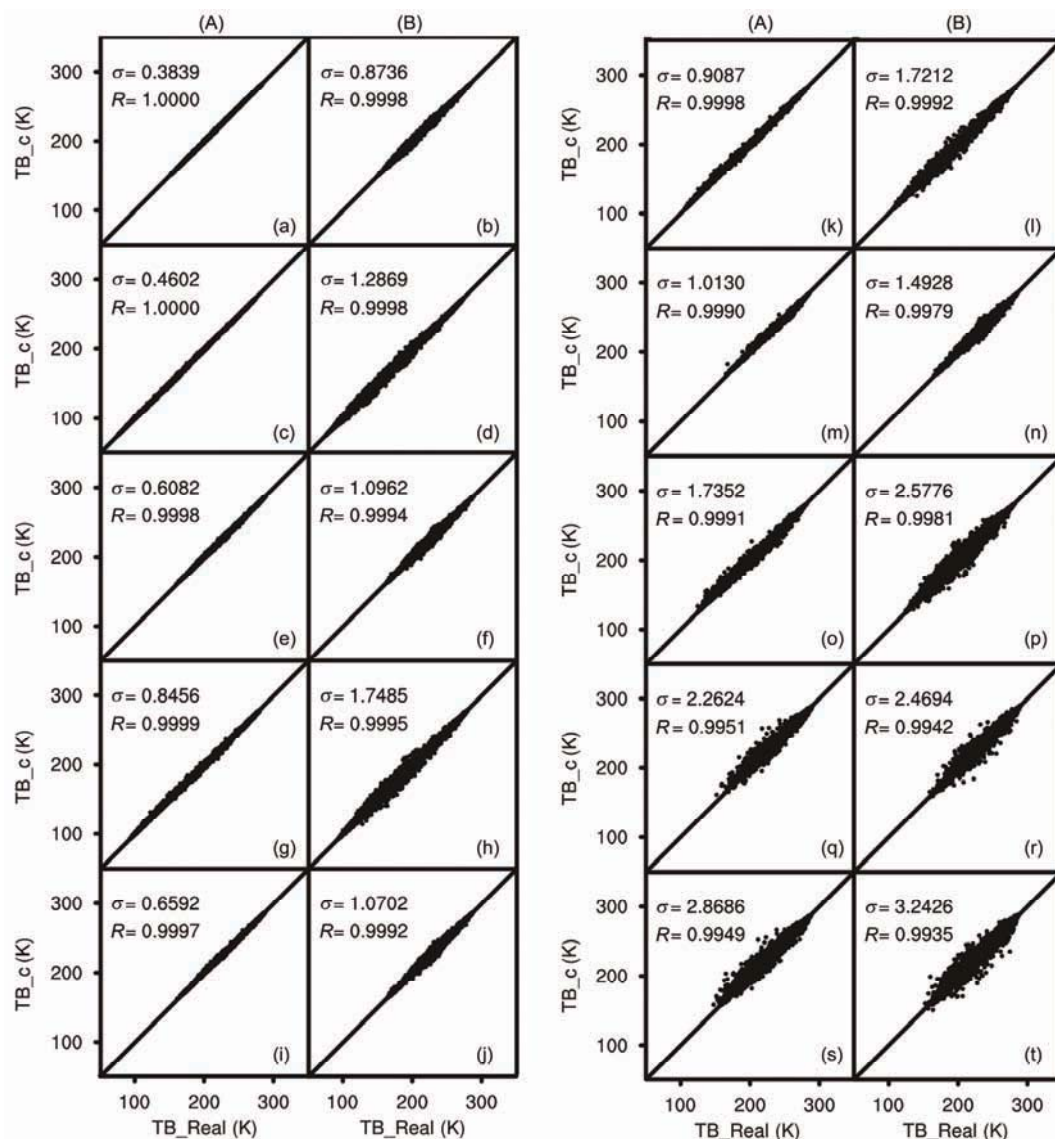


图3 2013年12月14日MWRI一整条轨道扫描的微波通道经IDW和NNI得到的亮温真值(TB_Real)与计算亮温(TB_c)的分布。(A) IDW方法;(B) NNI方法;(a), (b) 10.65V通道;(c), (d) 10.65H通道;(e), (f) 18.7V通道;(g), (h) 18.7H通道;(i), (j) 23.8V通道;(k), (l) 23.8H通道;(m), (n) 36.5V通道;(o), (p) 36.5H通道;(q), (r) 89V通道;(s), (t) 89H通道

Figure 3 Distribution of real value (TB_Real) and calculated brightness temperature (TB_c) from a whole MWRI track on 14 Dec 2013. (A) IDW method; (B) NNI method; (a), (b) 10.65V; (c), (d) 10.65H; (e), (f) 18.7V; (g), (h) 18.7H; (i), (j) 23.8V; (k), (l) 23.8H; (m), (n) 36.5V; (o), (p) 36.5H; (q), (r) 89V; (s), (t) 89H

上也有清楚的物理对应, 即30.5°N和31.5°N附近的晴空区红外辐射温度分别高于250和270 K, 而非降水云区的红外辐射温度均低于240 K, 表明这些云的云顶为冰相态。依据微波不同频率对云水云冰和降水的响应特点可知, MWRI的10.65 GHz通道对降水粒子发射信号敏感, 而89 GHz通道则对冰粒子散射信号敏感, 因此, 图6上VIRR反映的晴空区和云区在MWRI这两个通道具有明确对应: 10.65 GHz亮温变

化平缓, 大约变化于220 K附近, 表明没有降水存在; 89 GHz亮温在云区(33.5°~34.5°N之间)小, 说明云中存在冰粒子。由此可见, 经过IDW方法匹配融合MWRI和VIRR后, 在统一空间尺度(即VIRR分辨率)上的光谱与微波的匹配融合信息对目标物具有更方便更清楚的综合表征能力。

在实现提升MWRI计算分辨率至VIRR像元后, 就可以充分结合MWRI各通道微波探测的优势与

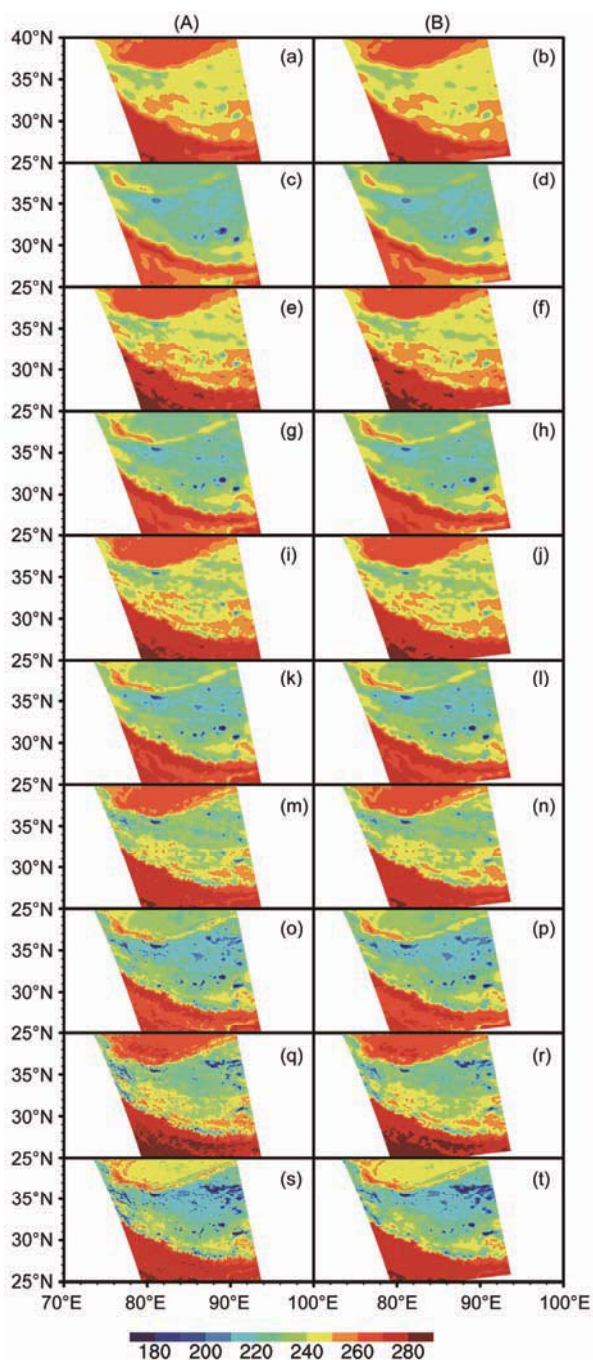


图4 MWRI的10个微波通道匹配融合前(A)和利用IDW方法匹配融合后(B)的亮温。(a), (b) 10.65V通道; (c), (d) 10.65H通道; (e), (f) 18.7V通道; (g), (h) 18.7H通道; (i), (j) 23.8V通道; (k), (l) 23.8H通道; (m), (n) 36.5V通道; (o), (p) 36.5H通道; (q), (r) 89V通道; (s), (t) 89H通道

Figure 4 Brightness temperature of MWRI's 10 channels. (A) Original brightness temperature; (B) brightness temperature by IDW method; (a), (b) 10.65V; (c), (d) 10.65H; (e), (f) 18.7V; (g), (h) 18.7H; (i), (j) 23.8V; (k), (l) 23.8H; (m), (n) 36.5V; (o), (p) 36.5H; (q), (r) 89V; (s), (t) 89H

VIRR各通道光谱探测的优势, 利用已有的诸多方法, 如可见光/红外对云和晴空的识别算法、微波的地表

参数反演算法等, 进行光谱和微波联合的参数反演; 利用光谱与微波的匹配融合数据, 还可以在夜晚发挥微波探测的优势, 弥补夜晚光谱信号信息少的缺陷。

2 MWRI与VIRR融合数据的应用

2.1 地表温度反演

青藏高原测站稀少且分布极不均匀, 常规气象观测对大范围气象参数的表征性差, 而卫星遥感观测可有效地弥补这些缺点^[26~28]。地表温度作为表征大气下边界的状况参数之一, 也是数值天气预报模式重要初始场; 长期的地表温度序列还是表征气候变化的重要参数之一, 是全球变化重要的指示剂。微波遥感反演地表温度的技术已广为运用, Hollinger等人^[29]提出的基于SSM/I微波反演地表温度的方法已业务运行数十年, 该方法充分考虑了水汽吸收、散射对微波的影响, 并考虑了下垫面的类型(茂密植被、草原、耕地、半干旱区、沙漠等), 地表温度反演精确度为 ± 2.5 K。由于MWRI通道涵盖了SSM/I的七通道, 因此完全可以借用SSM/I的地表温度反演算法, 利用该算法, 使用本文匹配融合计算得到的MWRI与VIRR融合数据, 反演上文所示轨道的地表温度。

图7为利用MWRI原始分辨率亮温反演的地表温度(图7(a))和利用MWRI各通道亮温匹配融合至VIRR像元后的微波亮温反演的地表温度(图7(b))。反演的地表温度并没有显著的差异, 融合后的略微细致一些; 表明青藏高原地表温度远低于其两侧的非高原地区的地表温度, 在青藏高原上最低地表温度可达到250 K左右, 而高原南侧的印度北部地表温度为280~290 K左右, 高原北侧的塔里木盆地地表温度约为280 K, 这符合冬季午后上述地区地表温度的气候值。将图7(a)和(b)中 $3^\circ \times 1.5^\circ$ 的黑框区域图像放大后, 就可以看到MWRI匹配融合前后的显著差异: 融合前(图7(c))地表温度呈现出明显的马赛克分布特征, 这是因为MWRI原始分辨率粗, 相邻像素反演得到的地表温度差可达5 K以上; 而利用融合后MWRI反演的地表温度分布就显得非常细腻和连续, 这也符合地表温度空间分布的特点。本文还对MWRI融合前后亮温反演的地表温度分布进行了统计分析, 结果表明MWRI融合后亮温反演的地表温度与融合前亮温反演的地表温度相比, 均值增加约0.8 K, 标准差降

表1 IDW匹配融合前后微波各通道亮温统计特征(K)

Table 1 Statistical characteristics of the brightness temperature before and after collocation using IDW method (K)

通道	原始数据				IDW融合后数据				偏差			
	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差
10.65V	220.28	281.31	254.54	11.79	221.66	280.85	255.20	11.61	1.38	-0.46	0.66	-0.18
10.65H	175.68	273.70	235.37	16.81	177.66	272.88	234.86	16.64	1.98	-0.82	-0.51	-0.17
18.7V	204.74	285.54	255.72	13.88	208.34	284.57	255.44	13.73	3.60	-0.97	-0.28	-0.16
18.7H	146.59	278.22	238.92	18.27	153.25	277.79	237.83	18.00	6.66	-0.43	-1.09	-0.27
23.8V	190.72	284.61	253.36	15.10	193.08	284.14	252.26	14.97	2.36	-0.47	-1.11	-0.14
23.8H	138.27	278.10	238.63	19.07	145.76	277.48	237.78	18.73	7.49	-0.62	-0.85	-0.34
36.5V	164.10	281.83	248.29	17.23	168.92	281.34	246.45	16.92	4.82	-0.49	-1.83	-0.31
36.5H	127.12	276.73	236.58	19.86	138.22	276.45	236.24	19.14	11.10	-0.28	-0.34	-0.71
89V	159.98	287.47	248.03	21.64	164.12	285.89	246.36	20.59	4.14	-1.58	-1.67	-1.05
89H	146.25	284.06	238.09	23.73	152.28	283.08	240.50	22.42	6.03	-0.98	2.41	-1.31

低了约0.2 K, 最大值降低了1.2 K, 最小值增加了2.7 K, 而这些差异均小于地表温度反演算法本身的误差(2.5 K), 表明IDW方法既能提高MWRI各通道计算分辨率, 同时也不会影响其反演产品的精度.

2.2 晴空-云-积雪识别

冬季大面积积雪覆盖了青藏高原地区, 对其上的大气与其下的地表都有着重要影响, 特别是它本身的辐射效应以及融化会吸收大量的热量, 会造成明显的区域或局地气候效应. 较厚的积雪是冬季农牧区主要的自然灾害, 还容易产生雪崩、吹雪等次生灾害^[30]. 由于地面站分布的有限, 利用卫星遥感反演才能得到青藏高原全境的积雪资料. 微波和光谱均可探测积雪, 但由于其原理不同, 它们具有不同的优势和不足. 可见光和红外波段探测分辨率高, 但容易受到云的干扰, 且夜晚对雪的观测能力减弱; 而微波能有效穿透云, 但分辨率较粗, 且易受地表发射的辐射影响. 利用上述融合算法将MWRI与VIRR在VIRR分辨率上融合, 得到两者的融合数据, 就可以实现在高空间分辨率对晴空、雪和云进行有效识别.

图8(a)给出了仅使用匹配融合资料中的微波数据识别的雪盖类型, 该识别方法是李晓静等人^[31]根据微波多通道法改进的更适用于青藏高原的积雪识别方法, 该方法的阈值是由星载数据结合地面站观测数据确定. 图8(b)给出了微波光谱协同识别算法给出的云和积雪分布, 该识别算法原理是利用2.1节中用微波反演算法得到的地表温度与VIRR的10.3~

11.3 μm 通道进行比较, 如果反演的地表温度高于红外亮温值, 则判定该像元为云, 反之则判定为晴空或雪. 当判定像元为云时, 可按照近红外亮温阈值法获得云的属性^[32]; 当判定像元为晴空或雪时, 则利用光谱通道计算归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和归一化雪指数(normalized difference snow index, NDSI), 从而确定积雪的判定阈值, 进而分离出积雪和晴空^[33]. 图8(c)为微波和光谱探测的云-积雪的叠加图, 由于光谱探测难以穿透云, 在对积雪进行识别时, 晴空时使用光谱判定结果, 有云时使用微波判定结果.

图8(b)所示的积雪主要位于三大区域: 高原西北的昆仑山脉南麓、高原中部的可可西里山脉和唐古拉山脉交接部以及高原南部的喜马拉雅山脉. 以上这些区域均在图8(a)中存在积雪. 从图8(b)中还可看到, 卫星过境时高原中部很大程度被冰云、混合云II型和混合云I型覆盖, 由于光谱的局限性, 无法获得云下面的信息, 而图8(a)显示, 在这些云下方, 有雪覆盖. 不过, 图8还表明在光谱判定晴空的区域, 微波对雪盖的判定存在一定程度的高估, 这是由于微波对湿雪的判别精度有限, 现有阈值容易对湿雪产生误判^[31,33]. 图8(c)有效地揭示了被云层遮挡下的积雪覆盖情况, 确实有大量积雪位于云层下方, 这是现有的光谱资料难以探测到的. 对这幅图像的统计表明, 被云遮挡的积雪面积占总积雪面积的80.5%, 这部分积雪都会被单一的光谱探测所漏判; 仅用微波数据对于晴空区域的积雪空报率(false alarm ratio)则达到

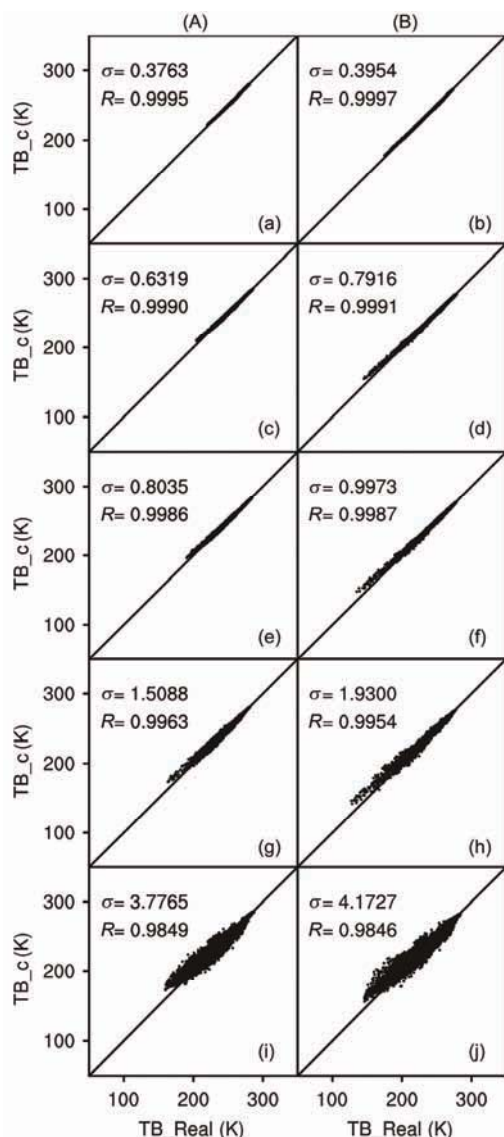


图 5 MWRI探测的微波亮温真值(TB_Real)与匹配融合后升尺度亮温(TB_c)的分布. (A) MWRI的垂直极化通道(V); (B) MWRI的水平极化通道(H); (a), (b) 10.65 GHz; (c), (d) 18.7 GHz; (e), (f) 23.8 GHz; (g), (h) 36.5 GHz; (i), (j) 89 GHz

Figure 5 Distribution of real value (TB_Real) and scaling-up brightness temperature (TB_c). (A) Vertical polarization channels (V); (B) horizontal polarization channels (H); (a), (b) 10.65 GHz; (c), (d) 18.7 GHz; (e), (f) 23.8 GHz; (g), (h) 36.5 GHz; (i), (j) 89 GHz

76%, 蒋玲梅等人^[34]将FY-3B的MWRI反演的积雪与MODIS的积雪产品相比, 计算的空报率甚至超过82%, 这说明仅用微波数据识别积雪还存在较大误差. 总体而言, 将微波与光谱进行融合来协同识别和反演, 可在晴空时减少微波反演雪盖的误差, 又可克服光谱无法获取有云地区的积雪, 还可得到云的参数. 利用上述反演结果可实现对云参数和地表参数

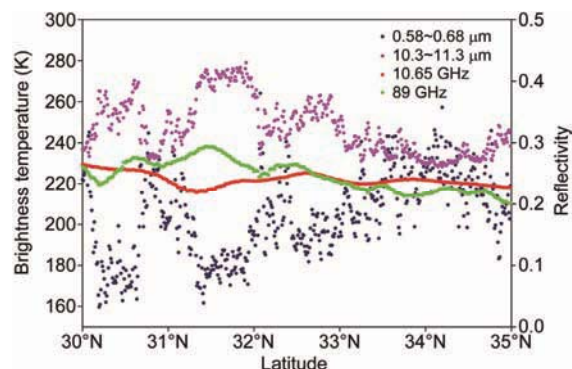


图 6 沿AB线的匹配融合资料的可见光通道反射率、远红外通道辐射温度、微波低频和高频通道亮温分布

Figure 6 Reflectivity, infrared temperature, and microwave brightness temperature from collocated data along AB line

进行综合分析, 提高获取雪情、云参数的获取能力, 这将大大地提高卫星多仪器遥感信息的应用效能.

3 结论

我国FY-3卫星上搭载的VIRR和MWRI等多台仪器, 对全球包括云和降水等大气参数、陆面参数和海表参数具有很强的遥感观测能力, 充分利用好同一卫星平台多仪器遥感结果, 实现对目标物综合信息的提取, 将会极大地提升卫星多仪器的遥感能力, 并在卫星资料应用中发挥有力的作用. 由于卫星上不同仪器的工作方式及原理不同, 它们遥感探测的水平空间分辨率会有所不同, 且在同一时刻注视的目标物也不同, 因此, 在卫星多仪器遥感获得资料后, 必须进行后续处理, 以实现卫星多仪器对同一目标物遥感探测的综合信息. 本文针对FY-3卫星上搭载的MWRI水平分辨率粗、VIRR具有很高水平分辨率的特点, 通过IDW方法在VIRR水平分辨率上实现MWRI微波各通道亮温与VIRR各通道光谱信号的快速匹配融合, 从而提高了MWRI的计算分辨率, 实现了同一目标物上微波信号与光谱信号的提取.

本文在分析IDW和NNI方法原理的基础上, 首先利用这两种方法对MWRI数据进行了匹配融合计算方法的自检验试验, 结果表明NNI方法的标准差均高于IDW方法的标准差, NNI方法的相关系数也均低于IDW方法的相关系数, 因此IDW方法的匹配融合效果更佳; IDW方法的匹配融合计算表明其融合误差在低频通道低于1 K, 在高频通道低于3 K, 相关系数均达到0.995以上, 故选定IDW方法作为MWRI各通道微波亮温与VIRR各通道光谱信号的融合计算方法.

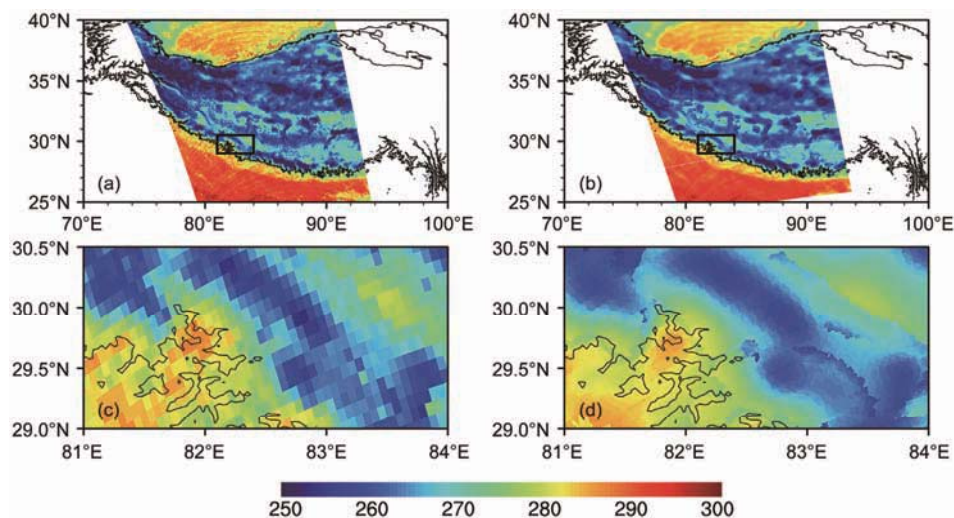


图7 MWRI的融合前((a), (c))和利用IDW方法匹配融合后((b), (d))计算的地表温度. (c), (d)为黑框区域的放大图, 黑色细线为 3000 m等高线
Figure 7 Land surface temperature calculated by microwave brightness temperature. (a), (c) Original brightness temperature; (b), (d) brightness temperature by IDW method; (c), (d) the enlarged black-box area, black lines for 3000 m contour

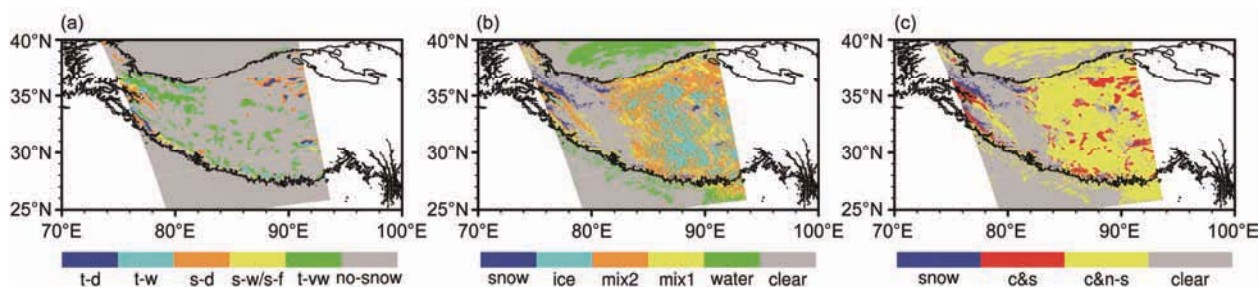


图8 利用匹配融合数据反演的云和地表特征. (a) 提升计算分辨率后的微波数据计算的雪的类型; t-d, 厚干雪; t-w, 厚湿雪; s-d, 浅干雪; s-w/s-f, 浅湿雪/森林浅雪; t-vw, 厚湿雪; no-snow, 无雪; (b) 协同识别算法得到的云-积雪分布; snow, 积雪; ice, 冰云; mix2, 混合云II型; mix1, 混合云I型; water, 水云; clear, 晴空且无积雪; (c) 协同算法得到的云-积雪叠加图; snow, 积雪且晴空; c&s, 积雪且有云; c&n-s, 无雪且有云; clear, 无雪且晴空

Figure 8 Cloud and surface features retrieved by collocated data. (a) Snow type identified by microwave brightness temperature which has been enhanced calculated resolution; t-d, thick dry snow; t-w, thick wet snow; s-d, shallow dry snow; s-w, shallow wet snow; or s-f, shallow snow under forest; t-vw, thick very wet snow; and no-snow, background; (b) cloud-snow distribution identified by synergetic algorithm; ice, ice cloud; mix2, mixed cloud II; mix1, mixed cloud I; water, water cloud; and clear, clear sky; (c) distribution of overlayed cloud and snow; c&s, snow and cloud; c&n-s, cloud and no-snow; and clear, background

通过对MWRI各通道微波亮温匹配融合前后的分析, 结果表明融合后微波亮温在空间分布上保持了融合前原始微波亮温的整体分布特征和细节分布特征, IDW方法的匹配融合计算结果可靠.

本文在最后利用基于IDW方法获得的MWRI微波各通道亮温与VIRR各通道光谱信号的匹配融合资料, 依据已有的微波地表温度反演方法和积雪识别方法, 对2013年12月14日07:55(UTC)青藏高原的地表温度进行了反演, 并对积雪和云类型进行了识别,

结果表明利用匹配融合数据反演的地表温度空间分布比原始数据反演的更细腻和合理, 且匹配融合反演结果没有马赛克和异值出现. 而利用融合数据识别的青藏高原地表积雪分布也更为合理, 且可准确地给出青藏高原地区云和积雪的空间分布.

本匹配融合技术实现了微波与光谱的协同观测, 增强了对目标物的辨识能力, 可以提高大气参数和地表参数反演的确定性. 相信本方法能为FY-3在多仪器联合反演上提供便利.

参考文献

- 1 Yang J, Dong C H, Lu N M, et al. FY-3A: The new generation polar-orbiting meteorological satellite of China (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 67: 501–509 [杨军, 董超华, 卢乃锰, 等. 中国新一代极轨气象卫星——风云三号. *气象学报*, 2009, 67: 501–509]
- 2 Dong C H, Yang J, Lu N M, et al. Main characteristics and primary applications of polar-orbiting satellite FY-3A (in Chinese). *J Geo-inf Sci*, 2010, 12: 458–465 [董超华, 杨军, 卢乃锰, 等. 风云三号 A 星(FY-3A)的主要性能与应用. *地球信息科学学报*, 2010, 12: 458–465]
- 3 Wang Y, Fu Y F, Fang X, et al. Estimating ice water path in tropical cyclones with multispectral microwave data from the FY-3B satellite. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2014, 52: 5548–5557
- 4 Huang F X, Huang Y, Flynn L E, et al. Radiometric calibration of the solar backscatter ultraviolet sounder and validation of ozone profile retrievals. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, 50: 4956–4964
- 5 Yang H, Zou X L, Li X Q, et al. Environmental data records from FengYun-3B microwave radiation imager. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2012, 50: 4986–4993
- 6 Huang F X, Liu N Q, Zhang P, et al. Comparison and evaluation of retrieved ozone profiles from solar backscatter ultraviolet sounder on FY-3A satellite (in Chinese). *Optics Precis Eng*, 2010, 18: 1568–1576 [黄富祥, 刘年庆, 张鹏, 等. 风云三号 A 星紫外臭氧垂直探测仪反演产品的比较和评估. *光学精密工程*, 2010, 18: 1568–1576]
- 7 Qi J, Zhang P, Qiu H, et al. Analysis of total solar irradiance observed by FY-3C Solar Irradiance Monitor-II (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 2447–2454 [齐瑾, 张鹏, 邱红, 等. 风云三号 C 星太阳总辐照度观测结果分析. *科学通报*, 2015, 60: 2447–2454]
- 8 Zhang J R. Current situation and prospect of microwave remote sensing in China (in Chinese). *Remote Sens Technol Appl*, 1997, 12: 59–65 [张俊荣. 我国微波遥感现状及前景. *遥感技术与应用*, 1997, 12: 59–65]
- 9 Fu Y F, Liu D, Wang Y, et al. Characteristics of precipitating and non-precipitating clouds in Typhoon Ranan as viewed by TRMM combined measurements (in Chinese). *Acta Meteorol Sin*, 2007, 65: 316–328 [傅云飞, 刘栋, 王雨, 等. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征. *气象学报*, 2007, 65: 316–328]
- 10 Wang Y, Fu Y F, Liu G S, et al. A new water vapor algorithm for TRMM Microwave Imager (TMI) measurements based on a log linear relationship. *J Geophys Res-Atmos*, 2009, 114: D21304
- 11 Dai L Y, Che T, Wang J, et al. Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China. *Remote Sens Environ*, 2012, 127: 14–29
- 12 Liu G S, Curry J A. Retrieval of precipitation from satellite microwave measurement using both emission and scattering. *J Geophys Res-Atmos*, 1992, 97: 9959–9974
- 13 Poe G A. Optimum interpolation of imaging microwave radiometer data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1990, 28: 800–810
- 14 Robinson W D, Kummerow C, Olson W S. A technique for enhancing and matching the resolution of microwave measurements from the SSM/I instrument. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 419–429
- 15 Farrar M R, Smith E A. Spatial-resolution enhancement of terrestrial features using deconvolved SSM/I microwave brightness temperatures. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1992, 30: 349–355
- 16 Long D G, Daum D L. Spatial resolution enhancement of SSM/I data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1998, 36: 407–417
- 17 Migliaccio M, Gambardella A. Microwave radiometer spatial resolution enhancement. *IEEE Geosci Remote Sens*, 2005, 43: 1159–1169
- 18 Fu Y F, Liu Q, Gao Y, et al. A feasible method for merging the TRMM microwave imager and precipitation radar data. *J Quant Spectrosc Ra*, 2013, 122: 155–169
- 19 Gao Y, Liu Q, Fu Y F, et al. Research on the resolution enhancement of brightness temperature at TMI 10.7 GHz (in Chinese). *J Univ Sci Technol Chin*, 2013, 43: 345–354 [高越, 刘奇, 傅云飞, 等. TMI 10.7 GHz 低分辨率亮温资料的细化处理方法研究. *中国科学技术大学学报*, 2013, 43: 345–354]
- 20 Liu Q, Fu Y F. Comparison of radiative signals between precipitating and non-precipitating clouds in frontal and typhoon domains over East Asia. *Atmos Res*, 2010, 96: 436–446
- 21 Fu Y F, Liu P, Liu Q, et al. Climatological characteristics of VIRS channels for precipitating cloud in summer over the tropics and subtropics (in Chinese). *J Atmos Environ Opt*, 2011, 6: 129–140 [傅云飞, 刘鹏, 刘奇, 等. 夏季热带及副热带降水云可见光/红外信号气候分布特征. *大气与环境光学学报*, 2011, 6: 129–140]
- 22 Yang Y J, Lu D R, Fu Y F, et al. Spectral characteristics of tropical anvils obtained by combining TRMM precipitation radar with visible and infrared scanner data. *Pure Appl Geophys*, 2015, 172: 1717–1733
- 23 Wang Y, Fu Y F, Wang Z F, et al. Retrieval of liquid water path inside nonprecipitating clouds using TMI measurements. *Acta Meteorol Sin*, 2008, 22: 342–350

- 24 Zhang P, Yang H, Qiu H, et al. Quantitative remote sensing from the current Fengyun 3 satellites (in Chinese). *Adv Meteorol Sci Tech*, 2012, 2: 6–11 [张鹏, 杨虎, 邱红, 等. 风云三号卫星的定量遥感应用能力. *气象科技进展*, 2012, 2: 6–11]
- 25 Liu C T, Zipser E J, Cecil D J, et al. A cloud and precipitation feature database from nine years of TRMM observations. *J Appl Meteorol Clim*, 2008, 47: 2712–2728
- 26 Fu Y F, Liu G S, Wu G X, et al. Tower mast of precipitation over the central Tibetan Plateau summer. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L05802
- 27 Feng S, Fu Y F, Xiao Q N. Is the tropopause higher over the Tibetan Plateau? Observational evidence from Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC) data. *J Geophys Res-Atmos*, 2011, 116: D21121
- 28 Pan X, Fu Y F. Analysis on climatological characteristics of deep and shallow precipitation cloud in summer over Qinghai-Xizang Plateau (in Chinese). *Plateau Meteorol*, 2015, 34: 1191–1203 [潘晓, 傅云飞. 夏季青藏高原深厚及浅薄降水云气候特征分析. *高原气象*, 2015, 34: 1191–1203]
- 29 Hollinger J P, Dmsp S, Cal I, et al. DMSP Special Sensor Microwave/Imager Calibration/Validation: Final Report. Naval Research Laboratory, 1991
- 30 Shen Y P, Su H C, Wang G Y, et al. The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards effects (in Chinese). *J Glaciol Geocryol*, 2013, 35: 1355–1370 [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应. *冰川冻土*, 2013, 35: 1355–1370]
- 31 Li X J, Liu Y J, Zhu X X, et al. Snow cover identification with SSM/I data in China (in Chinese). *J Appl Meteorol Sci*, 2007, 18: 12–20 [李晓静, 刘玉洁, 朱小祥, 等. 利用 SSM/I 数据判识我国及周边地区雪盖. *应用气象学报*, 2007, 18: 12–20]
- 32 Fu Y F, Qin F. Summer daytime precipitation in ice, mixed, and water phase as viewed by PR and VIRS in tropics and subtropics. In: *Proceedings of the SPIE, Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V*. Washington: SPIE, 2014. 925906
- 33 Bao H Y, Zhang X F, Liao C H, et al. Co-inversion of snow parameters in Xinjiang based on MODIS and AMSR-E data (in Chinese). *J Nat Disaster*, 2013, 22: 41–49 [包慧漪, 张显峰, 廖春华, 等. 基于 MODIS 与 AMSR-E 数据的新疆雪情参数协同反演研究. *自然灾害学报*, 2013, 22: 41–49]
- 34 Jiang L M, Wang P, Zhang L X, et al. Improvement of snow depth retrieval for FY3B-MWRI in China. *Sci China Earth Sci*, 2014, 57: 1278–1292 [蒋玲梅, 王培, 张立新, 等. FY3B-MWRI 中国区域雪深反演算法改进. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 531–547]

A method and its retrieval application for collocating the FY-3 microwave and VIS/IR data

CHEN YiLun¹, ZHANG AoQi¹, FU YunFei^{1,2}, ZHANG Peng³, LU NaiMeng³ & HE Qing⁴

¹ School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

² Key Laboratory of Atmosphere Sciences and Satellite Remote Sensing of Anhui Province, Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China;

³ National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

⁴ Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China

As the second generation polar-orbiting meteorological satellite in China, FY-3 has been in operation for more than 7 years. Among the several Earth observing instruments, FY-3 is equipped with the Micro-Wave Radiation Imager (MWRI) and the Visible and Infrared Radiometer (VIRR), which can observe the global atmosphere, land, and ocean. A combined use of the multi-sensor remote sensing observations from FY-3 will enable us to extract comprehensive information of an Earth target. The multi-channel MWRI has a good ability to detect clouds and precipitation, although its spatial resolution changes with frequency. All VIRR channels have a high spatial resolution, but they can only obtain the information on the surface of a target. To get microwave signal at each VIRR pixel and enhance the calculated resolution of MWRI, in this study, a method is developed based on the principle of multi-information collocating, so that brightness temperature at each MWRI channel is collocated to a VIRR pixel.

Based on their principle and applicability, the inverse distance weighted (IDW) and the nearest neighbor interpolation (NNI) methods were respectively tested in the process of collocating two kinds of data. After comparing the errors of the two methods by self-check analysis, IDW method was selected to collocate VIRR and MWRI signals, which results in a relatively small error. The result shows that IDW can enhance the calculated resolution of MWRI, while the error is less than 1 K at low frequency channels, and less than 3 K at high frequency channels. By analyzing the microwave brightness temperatures before and after the collocation at each MWRI channel, the spatial distribution of the collocated microwave brightness temperatures is found to have similar overall and detailed characteristics to the original data. The averaged deviation between before and after the collocation is small. The 89H channel has the largest difference of 2.41 K, whose relative deviation is less than 1.01%. Reverse information analysis shows that correlation coefficient between the scaled-up and original brightness temperatures is higher than 0.98 for every channel, and the standard deviation of their difference is between 0.4–4 K. The above results confirm the reliability of the IDW method in this collocation problem.

As an application, land surface temperature of the Tibetan Plateau was retrieved by microwave signal in the collocated data. Clear-sky and cloudy regions were identified by comparing the land surface temperature and the thermal infrared brightness temperature. Snow and cloud phase were identified by using the infrared temperature in the collocated data. Because of the combination of FY-3 microwave and VIS/IR information, the error in snow retrieval using microwave data will be reduced, and the problem associated with visible and infrared being unable to penetrate through clouds can also be solved. Furthermore, cloud parameters can be retrieved. Using the retrieval results from the collocated data, cloud and surface features can be analyzed comprehensively, which can improve the ability in identifying snow and retrieving cloud parameters. Finally, the improved retrievals can provide observational facts for disaster warning and climate change assessment.

FY-3, microwave, spectral, collocate, cloud and snow identification

doi: 10.1360/N972016-00102