

TMI 10.7 GHz 低分辨率亮温资料的细化处理方法研究

高越, 刘奇, 傅云飞, 衡志炜, 冼桃

(中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 由于良好的穿透性, 被动微波低频通道探测经常用于卫星遥感中, 但其较粗的空间分辨率容易导致像元充塞效应, 且无法直接匹配高频通道的细致分辨率, 严重影响到低频观测资料的使用. 以 TMI 10.7 GHz 通道探测数据为对象, 探讨如何便捷有效地提高微波低频数据的分辨率. 首先以 TMI 85.5 GHz 垂直极化通道探测分辨率(约 5 km)为基准, 利用就近取值法、距离反比权重法和动态最小二乘曲面拟合法这 3 种方法做算法进行自检验分析. 对比结果表明, 最优方法为动态最小二乘曲面拟合法, 距离反比权重法次之, 就近取值法效果最差. 在此基础上, 选取洋面(170°E~180°E, 10°N~20°N)、陆面(110°W~100°W, 29°N~38°N)、海陆交界区(140°E~150°E, 13°S~3°S) 3 个不同的区域进行 TMI 10.7 GHz 与 85.5 GHz 两套观测数据的匹配, 并将匹配结果应用到台风个例分析中. 研究结果为实现在 85.5 GHz 高频通道的细致水平分辨率上, 统一高低频通道观测资料的计算分辨率, 得到多通道被动微波融合亮温资料提供了依据.

关键词: 被动微波; 低频通道; 粗分辨率; 细化处理

中图分类号: P405 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2013.05.001

引用格式: Gao Yue, Liu Qi, Fu Yunfei, et al. Research on the resolution enhancement of brightness temperature at TMI 10.7 GHz[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2013, 43(5):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[J]. 中国科学技术大学学报, 2013, 43(5):345-354.

Research on the resolution enhancement of brightness temperature at TMI 10.7 GHz

GAO Yue, LIU Qi, FU Yunfei, HENG Zhiwei, XIAN Tao

(School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The relatively coarser spatial resolution of low frequency channels of passive microwave remote sensing tends to cause the beam-filling effect, which essentially affects the retrieval of atmospheric parameters and efficiency of usage. With the TMI 10.7 GHz measurements as the target, discussions were conducted on how to effectively enhance the data resolution of microwave low frequency channels. Firstly, nearest neighbor interpolation, inverse distance weighted and moving least-squares were analyzed separately based on the spatial resolution (about 5 km) of the vertical polarization channel at TMI 85.5 GHz. Results show that the best method for self-verification is moving least-squares, followed by inverse

收稿日期: 2013-03-12; 修回日期: 2013-05-13

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2010CB428601), 国家自然科学基金重点项目(41230419), 国家自然科学基金(41075041)资助.

作者简介: 高越, 女, 1988年生, 硕士生. 研究方向: 卫星遥感及应用. E-mail: gaoyuejy@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 傅云飞, 博士/教授. E-mail: fyf@ustc.edu.cn

distance weighted, and the worst one is nearest neighbor interpolation. Then, three typical areas of ocean ($170^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{N}\sim 20^{\circ}\text{N}$), land ($110^{\circ}\text{W}\sim 100^{\circ}\text{W}$, $29^{\circ}\text{N}\sim 38^{\circ}\text{N}$) and costal regions ($140^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$, $13^{\circ}\text{S}\sim 3^{\circ}\text{S}$) were chosen for matching resolution at TMI 10.7 GHz and 85.5 GHz. Finally, an application to a typhoon case was put forward. This study provides a basis for enhancing the coarse resolution at TMI low frequencies to a fine one at 85.5 GHz, and for producing a set of multichannel passive microwave data with fine calculated resolution.

Key words: passive microwave; low frequency channel; coarse resolution; resolution enhancement

0 引言

被动微波遥感常用于观测水汽、温度、风速、土壤湿度、云水(冰)含量、降水等大气参数。与传统的可见光/红外遥感相比,微波遥感具有不可替代的优势^[1-2]。首先,可见光遥感仅能在白天工作,红外遥感虽然可以全天候工作,但会受到云、雨滴和气溶胶散射以及水汽吸收的干扰,而微波波长比红外长得多,使得微波在大气中的衰减较少,并能在云、雨、大气中有很强的穿透性,因此微波可以提供全天候、全天时的观测;其次,微波对于某些地物目标具有很强的鉴别能力,例如水和冰在微波波段中的比辐射率分别为 0.4 和 0.97,两者对应的微波亮温差别达到了 100 K, AMSR-E (advanced microwave scanning radiometer-earth observing system) 正是利用这一原理来探测极地海冰。

尽管微波遥感有上述优势,但其低频通道较粗的空间分辨率是一个不容忽视的问题,如 TMI (TRMM microwave imager, 简称 TMI), 其 5 个频率的空间分辨率就相差甚大(见表 1), 从 85.5 GHz 的 5 km, 到 10.7 GHz 的 37 km 左右^[3]。如将微波低频资料用于降水信息的反演就会出现, 因为强降水雨团的变化尺度常常只有百十米到几公里^[4], 低频通道视场内往往会存在不同的降水单体甚至非降水区, 这种充塞效应^[5]导致反演过程中带来较大的误差, 并一直困扰着微波降水反演的发展。

因此, 如何提高微波低频数据的计算分辨率成为研究热点。前人曾围绕 SSM/I (special sensor microwave/imager)^[6]的不同通道不同分辨率而展开很多研究: 如 1970 年 Backus 等^[7]提出的 BG 理论(Backus-Gilbert theory)在卫星辐射观测中的应用^[8]; Poe^[9]曾利用 BG 理论对 SSM/I 数据进行插值、重采样和平滑, 以得到高质量的图像和更加细节的信息; Robinson 等^[10]为了消除 SSM/I 不同通道之间分辨率不匹配的问题对反演云水、降水等参数

带来的影响, 同样利用了 BG 理论将所有通道分辨率统一到 37 GHz 上, 形成新的数据集, 以便于参数反演; 然而在利用 BG 理论提高分辨率的同时也导致了仪器噪声的快速增大^[8-10], 因此 Farrar 等^[11-12]试图引入调整参数来平衡两者之间的关系, 但是该参数的确定必须经过大量的数据测试才能决定, 这无疑又使原本就复杂的计算更加繁琐。鉴于以上原因, 学者们试图寻找更加合适的方法来提高 SSM/I 的分辨率, 得到高质量的图像。例如, Long 等^[13]比较了 BGI (Backus-Gilbert inversion) 和 SIR (scatterometer image reconstruction) 两种算法, 前者是建立在 BG 理论上的一种线性插值方法, 将给定的目标像元周围的若干观测数据经过线性组合得到更高的计算分辨率, 后者的插值则是非线性的, 通过变异的乘型代数重建方法获得高质量的图像。研究表明, 这两种算法对 SSM/I 图像分辨率的提高能力相近, 只是 SIR 可以通过迭代次数的改变实现对分辨率和噪声平衡的调节, 并且计算量仅 BGI 的 1/30。Migliaccio 等^[14]指出提高数据的固有分辨率(实际仪器的固有分辨率由仪器制式决定, 这里说的提高是对计算分辨率而言), 对不同辐射通道以及多传感器的数据融合有着至关重要的意义。他们评估 BGI 和 TSVD (truncated singular value decomposition) 两种算法对 SSM/I 分辨率提高能力的结果表明, 两种算法均通过对辐射计观测值的加权求和来重建亮温场, 只是前者通过求解积分方程达到去卷积的目的, 且计算过程需要引入多组权重系数, 而后者则是通过截断奇异值的方法求解矩阵, 仅需一组与奇异值相关的权重系数即可, 因此对 SSM/I 分辨率的提高能力更强。

前人在研究中使用的方法, 无论是经典的 BG 理论, 还是后来发展起来的 SIR, TSVD 算法, 它们提高分辨率的实质都等效于对辐射计天线模式的去卷积, 只是具体的数学求解方式不同而已, 且都能够提高辐射计观测的分辨率, 得到高质量的图像。然

而,处理过程的复杂运算却是一个不容忽视的问题,尤其是对于 BG 理论来说,在求解过程中还必须考虑到辐射计天线增益的差异等^[13];另外,提高分辨率导致的噪声增大仍然无法避免.为此,本文利用 TMI 高(85.5 GHz)低(10.7 GHz)频通道的探测结果,对如何快捷简便地提高微波低频通道的粗分辨率,选用就近取值法、距离反比权重法和动态最小二乘曲面拟合法进行了探讨.我们的出发点是数据处理过程要回避微波辐射计(或成像仪)的天线,这样就无需考虑天线配置或增益模式的差异,同样无需引入调整参数来控制仪器噪声的增大;其次,希望处理方法的数学运算原理比较简单,无需大量的积分、迭代过程;最后,得到的方法在实际中具有普适性,可以移植到其他微波探测器的资料处理.以下将介绍将 10.7 GHz 的粗分辨率数据处理到 85.5 GHz 的高分辨率的具体过程(提高低频微波资料的计算分辨率),最后还举例介绍方法的应用.

1 资料和方法

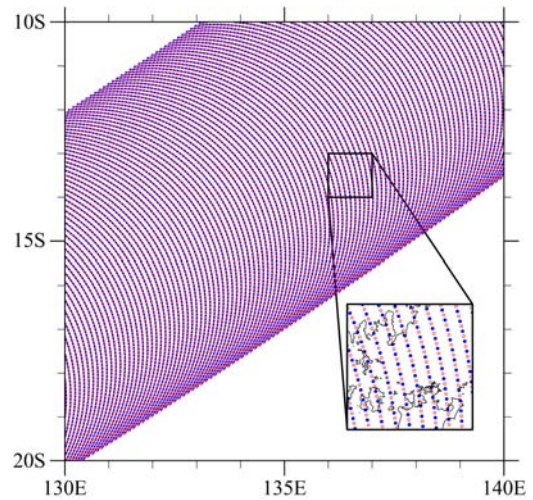
本文所使用的微波资料 1B11,是热带测雨卫星(tropical rainfall measuring mission, TRMM)^[15]上搭载的微波成像仪(TMI)的一级产品资料,由美国航空航天局(NASA)哥达德飞行中心(GSFC)和日本空间发展署(JAXA)地球观测研究中心(EORC)发布. TMI 是一个 5 频段 9 通道的被动微波成像仪,频率为 10.7, 19.4, 21.3, 37.0, 85.5 GHz(85.5 GHz 也被称为高频通道),各个通道的水平分辨率不同(见表 1).

表 1 TMI 各通道主要参数

Tab. 1 Main characteristics for TMI channels

通道号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
中心频率/GHz	10.7	10.7	19.4	19.4	21.3	37.0	37.0	85.5	85.5
极化方式	V	H	V	H	V	V	H	V	H
像元数/横轨扫描线	104	104	104	104	104	104	104	208	208
分辨率/km	37	37	18	18	18	9	9	5	5

1B11 数据由 TMI 的探测资料经处理和标定后得到;在每条横轨扫描线上,85.5 GHz 给出 208 个像元,而其他通道仅有 104 个像元;1B11 给出了每个像元的探测时间、地理位置和亮温等信息^[3].图 1 给出了任意一条 TRMM 轨道局部(2000 年 7 月 1 日 TRMM 第 14921 轨)的 85.5 GHz 和 10.7 GHz 像元分布情况.从图 1 可以很清楚地看出 10.7 GHz 像元的分布均与 85.5 GHz 的奇数像元重合,而



红色空心圆为 85.5 GHz,蓝色实心圆为 10.7 GHz
图 1 TMI 85.5 GHz 和 10.7 GHz 通道的像元分布
Fig. 1 Distribution of pixels for TMI 85.5 GHz and 10.7 GHz measurement

85.5 GHz 偶数像元没有 10.7 GHz 像元对应.为此,如果在 85.5 GHz 像元位置获得 10.7 GHz 的亮温值,那么相当于提高了 10.7 GHz 通道的分辨率.

我们这里试验了 3 种方法,就近取值法(nearest neighbor interpolation, NNI)、距离反比权重法(inverse distance weighted, IDW)和动态最小二乘曲面拟合法(moving least-squares, MLS). NNI 最早由 Sibson^[16]提出,它是泰森多边形和三角法的综合^[17].实际上,就近取值法存在一隐含假设条件,即任一点 $p(x, y)$ 的属性值与距离它最近位置点的属性值相同,即可以用待定点最邻近点的值来作为待定点的值.根据这个原理,85.5 GHz 像元位置相对应的 10.7 GHz 微波亮温 T_p 可用距该位置最近的 10.7 GHz 微波亮温 T_{xx} 表示,其中 xx 表示 85.5 GHz 与 10.7 GHz 像元位置的最小距离,即 $T_p = T_{xx}$.

IDW 是一种简单易行的插值方法,常用于气象要素的空间插值.它的计算公式如下:

$$T_p = \frac{\sum_{i=1}^n (1/d_i) T_i}{\sum_{i=1}^n (1/d_i)}$$

其中, T_p 是 85.5 GHz 像元位置相对应的 10.7 GHz 微波亮温,它是由周围小区域内若干个 10.7 GHz 亮温值 T_i 通过距离加权平均得到的.

MLS 由传统的最小二乘法发展而来,拥有精度高、光滑性好的优点^[18].通过建立二次曲面,以待定点为中心,利用待定点周围值求取一个二次多项式

曲面,最后在拟合曲面上得到待定点位置相应的值.这一方法被广泛应用于工程和 GPS 测绘等领域.根据这一原理,我们根据落在 85.5 GHz 像元位置周围的若干个 10.7 GHz 微波亮温值(通常不少于 9 个点),利用最小二乘法来建立 85.5 GHz 像元位置的 10.7 GHz 亮温场二次多项式,得到 10.7 GHz 亮温场二次曲面,这样在该曲面上就可以得到 85.5 GHz 位置相应的 10.7 GHz 的微波亮温值 T_p :

$$T_p = A\Delta x^2 + B\Delta x\Delta y + C\Delta y^2 + D\Delta x + E\Delta y + F,$$

其中, $\Delta x, \Delta y$ 分别为 TMI 85.5 GHz 与 10.7 GHz 像元位置在 x 方向和 y 方向的距离, A, B, C, D, E, F 为待定常数,当 $\Delta x, \Delta y$ 均为为零时, F 就是待定的 T_p . 傅云飞等^[19]指出由于 TMI 的 10.7 GHz 相邻像元在空间分布上存在重叠,使得该频率探测的亮温空间连续性好,因此最小二次曲面方法能很好地给出拟合曲面;由于我们用这种方法计算逐个 85.5 GHz 像元位置相应的 10.7 GHz 亮温曲面,给出的二次曲面不断变化,因此这一过程是一个动态,故该方法称为动态最小二乘曲面拟合法.

2 检验

为了解 3 种方法的优劣,我们对就近取值法、距离反比权重法和动态最小二乘曲面拟合法进行比较分析.我们的目的是将 10.7 GHz 观测资料匹配到 85.5 GHz 细致分辨率上.因此,我们首先利用 85.5 GHz 观测资料做自检验,即随机抽取(用随机算法) 85.5 GHz 部分像元的亮温(样本)作为亮温真值,然后利用上述 3 种方法(仅使用除该像元以外的轨道上其他所有像元亮温为数据源)计算得到这些像元上的计算亮温(模拟亮温),通过比较计算

亮温与真值亮温的差异,即可判断多种方法的精度优劣.

图 2 给出了 TMI 85.5 GHz 垂直极化通道(2000 年 7 月 1 日 TRMM 第 14921 轨)20%样本的自检验结果,图 2(a), (b)和(c)的横坐标表示随机抽取像元位置对应的真实亮温,纵坐标分别表示我们选取的 3 种方法之一计算所得的模拟亮温.从图 2 可以看出,这 3 种方法得到的模拟亮温均与真实亮温有较好的一致性,但也可以看到一些点偏离了对角线,这表明模拟值相对于真实值存在不同程度的偏差,且 3 种方法得到的偏差也有明显不同.相比于图 2(a)和图 2(b),图 2(c)得到的结果更加集中在对角线上,相关系数也最大(0.999),显示出利用动态最小二乘曲面拟合法得到的计算亮温与观测真值之间的系统性差异最小,因此,这种方法给出的模拟亮温对观测亮温的歪曲性最小.

由于地面辐射在卫星低频通道观测信号中往往有较大贡献,而水面和各种陆面环境在低频通道发射率存在较大差异,因而亮温数值本身在洋面、陆面上的分布情况有较大差异.为了研究方法的普适性,我们在洋面和陆面上选取了 3 个不同的区域,分别使用前面所述的 3 种方法对 10.7 GHz 亮温进行细化处理,以考察下垫面条件对 3 种方法的影响.这 3 个选定区域分别为洋面区域(170°E~180°E, 10°N~20°N)、陆面区域(110°W~100°W, 29°N~38°N)、海陆交界区域(140°E~150°E, 13°S~3°S). 2000 年 7 月 1 日 TRMM 第 14921 轨道经过了这 3 个区域,图 3 给出了 10.7 GHz 水平极化和垂直极化通道的观测亮温.可以看出,洋面区域的 10.7 GHz 亮温值远远低于陆面区域,且垂直极化通道亮温均高于水

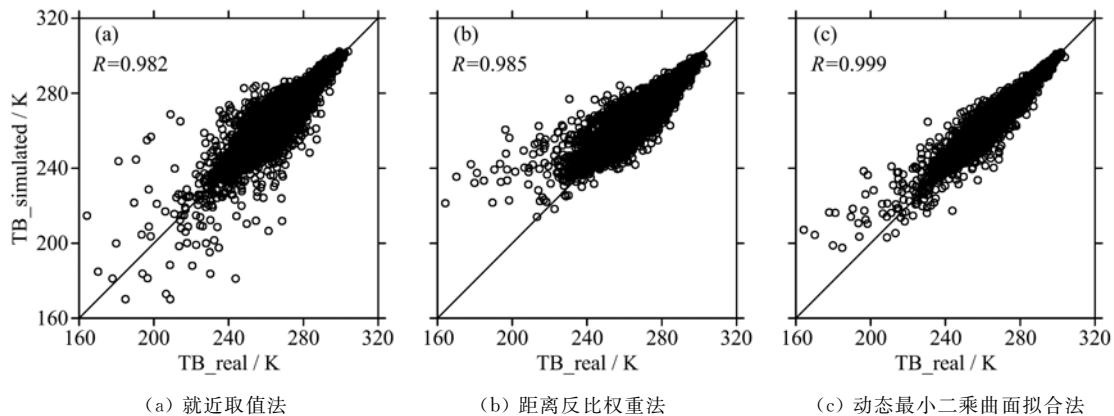


图 2 TMI 85.5 GHz 垂直极化通道自检验结果

Fig. 2 Result of self-verification for TMI 85.5 GHz channel vertically polarized

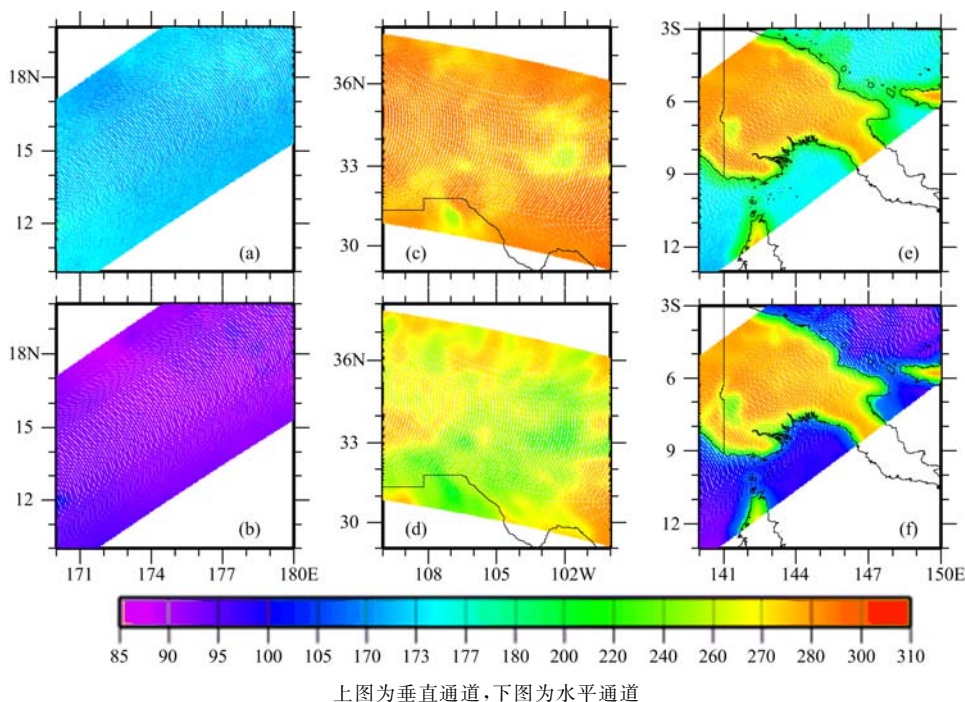
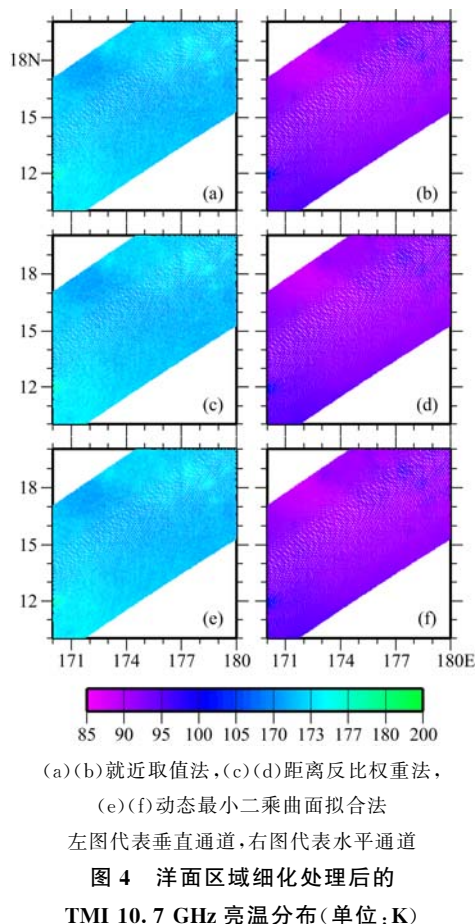


图 3 TMI 10.7 GHz 探测亮温在洋面(a)(b)、陆面(c)(d)、海陆交界(e)(f)的分布情况(单位:K)

Fig. 3 Distribution of TMI brightness temperature at 10.7 GHz on ocean (a)(b), land (c)(d), coastal regions (e)(f) (unit:K)

平极化通道亮温. 另外, 在 10.7 GHz 的横轨扫描方向, 可以看到像元之间明显的间隙, 这是因为低频通道像元数目较少的缘故, 这从图 1 中也可看到. 图 3 (e)和(f)表明 10.7 GHz 亮温在海陆分界处存在一个过渡带, 这是因为该通道分辨率粗, 以至于该通道同一个像元内既含有陆面, 又含有洋面, 这种单一像元内存在不同属性辐射就造成了这个亮温过渡带. 本文采用的 3 种方法究竟哪种方法能细化好这个过渡带 10.7 GHz 亮温信号, 对方法的普适性极为重要.

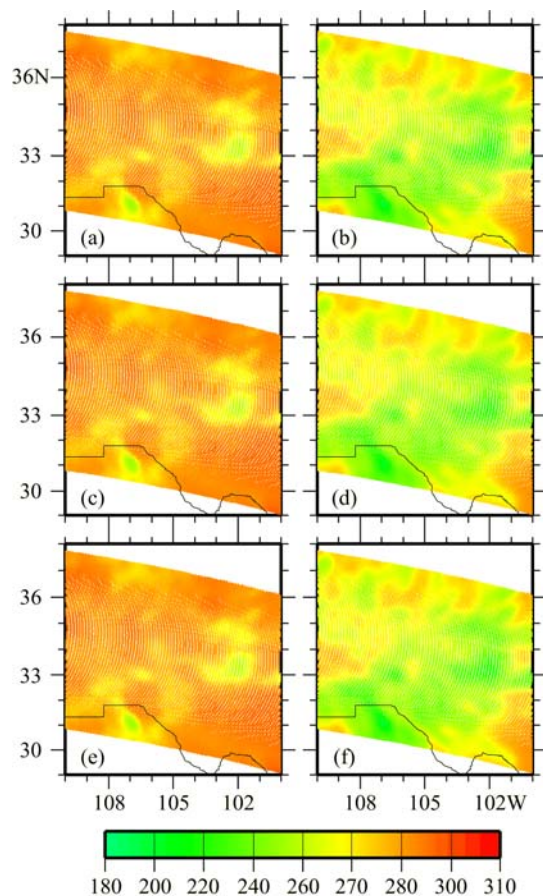
下面将分别讨论这 3 种方法对洋面、陆面、海陆交界 3 个区域内 TMI 10.7 GHz 亮温的细化处理结果(见图 4 至图 6). 总体上看, 处理后的 3 个区域内亮温分布情况与图 3 所示的原始亮温分布大致相同, 表明这 3 种方法的细化处理均不会对 10.7 GHz 的原始亮温造成扭曲. 但在细节上, 由于细化处理后的 10.7 GHz 像元数量增多一倍, 图 3 中 10.7 GHz 原始亮温分布的条纹减少, 尤其沿轨方向(即卫星行进方向)的条纹明显消失. 所以, 文中所使用的 3 种方法均可以在保留原始值的基础上, 提高 10.7 GHz 亮温的计算分辨率, 且不会对原始亮温数值造成歪曲; 视觉上, 似乎动态最小二乘曲面拟合法给出的图像更细腻(见图 4、图 5 和图 6 中的(e)和(f)); 必须指出, 在使用动态最小二乘曲面拟合法处理 10.7 GHz



(a)(b)就近取值法, (c)(d)距离反比权重法, (e)(f)动态最小二乘曲面拟合法
左图代表垂直通道, 右图代表水平通道

图 4 洋面区域细化处理后的 TMI 10.7 GHz 亮温分布(单位:K)

Fig. 4 Distribution of TMI brightness temperature at 10.7 GHz on ocean after resolution enhancement (unit: K)

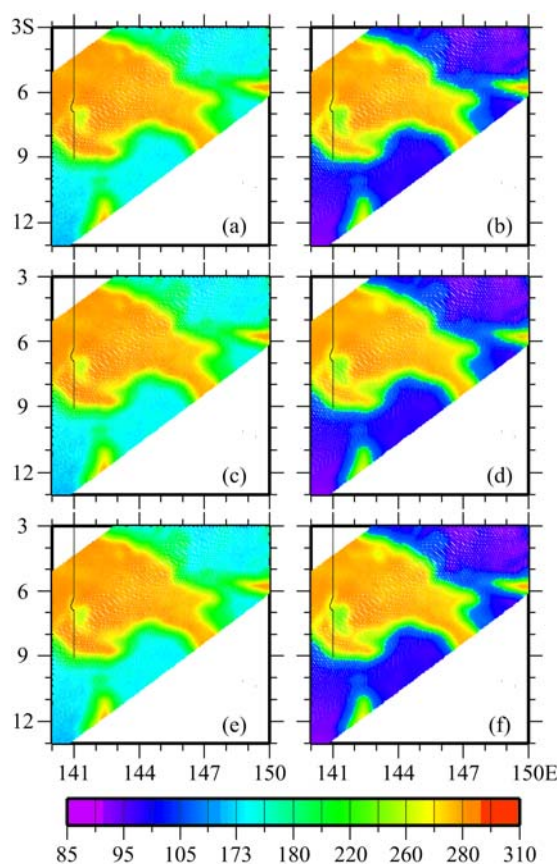


(a)(b)就近取值法, (c)(d)距离反比权重法,
(e)(f)动态最小二乘曲面拟合法
左图代表垂直通道, 右图代表水平通道
图 5 陆面区域细化处理后的
TMI 10.7 GHz 亮温分布(单位: K)

Fig. 5 Distribution of TMI brightness temperature at 10.7 GHz on land after resolution enhancement (unit: K)

亮温时, 要求以 85.5 GHz 像元位置为原点的 4 个象限内, 必须存在至少一个 10.7 GHz 像元, 方可进行拟合计算^[19], 因此在轨道的边缘, 不能使用该方法计算, 故轨道最外缘亮温将不予处理(在处理时给出记号), 这是使用动态最小二乘曲面拟合法获取更高精度付出的代价(这部分数据占总数据量的比例约 0.96%, 可以接受).

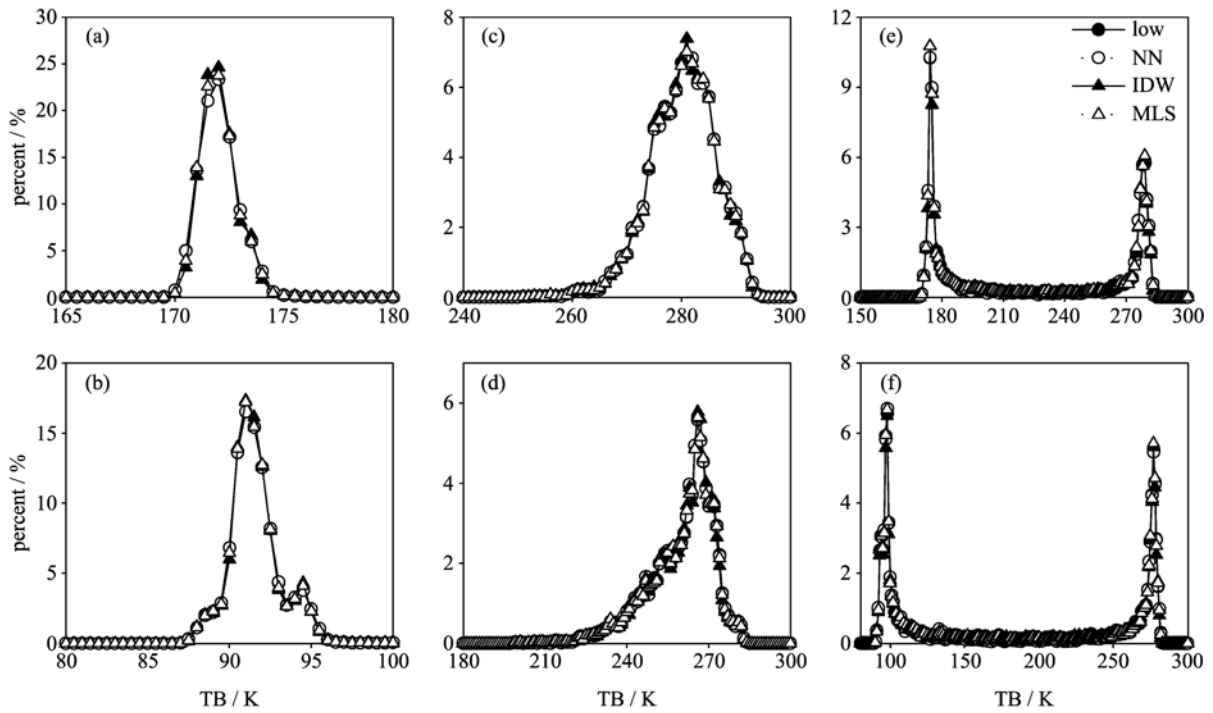
为进一步检验上述 3 种方法的优劣, 我们计算出 2000 年 7 月 1 日 TRMM 第 14921 轨 TMI 10.7 GHz 两个极化通道细化前后亮温的概率密度分布 (possibility density function, PDF), 并在图 7 中给出. 由于洋面上亮温的数值差距较小, 因此在计算 PDF 时, 洋面(图 7(a), (b))的亮温间隔(ΔK)为 0.5 K, 陆面(图 7(c), (d))和海陆交界(图 7(e),



(a)(b)就近取值法, (c)(d)距离反比权重法,
(e)(f)动态最小二乘曲面拟合法
左图代表垂直通道, 右图代表水平通道
图 6 海陆交界区域细化处理后的
TMI 10.7 GHz 亮温分布(单位: K)

Fig. 6 Distribution of TMI brightness temperature at 10.7 GHz on coastal regions after resolution enhancement (unit: K)

(f))取 ΔK 为 1.0 K. 从图上可以清楚地看出, 动态最小二乘曲面拟合法插值得到的 PDF 均优于距离反比权重法, 且与 10.7 GHz 原始亮温的 PDF 基本吻合. 值得注意的是, 就近取值法得到的 PDF 与原始 PDF 基本吻合, 这是因为就近取值法的计算原理是利用距离每个目标像元(对应于 TMI 85.5 GHz 的像元位置)最近的一个 10.7 GHz 像元的微波亮温直接作为对该目标点亮温值的估计, 这样我们得到的一系列高计算分辨率亮温仅仅是 10.7 GHz 原始亮温的简单重复, 理论上就近取值法得到的 PDF 应与 10.7 GHz 原始亮温 PDF 完全重合. 这种 PDF 的完全重合与就近取值法的原理有关, 且处理过程人为地增加了数据的空间梯度, 不能代表就近取值法是最优方法. 而动态最小二乘曲面拟合法则是利



上图代表垂直通道, 下图代表水平通道

图 7 细化处理前后 TMI 10.7 GHz 亮温在洋面(a)(b)、陆地(c)(d)、海陆交界(e)(f)的概率密度分布

Fig. 7 Possibility density function of brightness temperature at TMI 10.7 GHz before and after resolution enhancement on ocean (a)(b), land (c)(d), coastal regions (e)(f)

用目标像元附近的若干个 10.7 GHz 像元亮温经过严格的条件限制建立二次曲面, 能够保证数据的空间连续性, 尽管其 PDF 相对于原始数据 PDF 有偏差, 但计算结果更具有说服力和代表性. 结合图 2 TMI 85.5 GHz 亮温的自检验结果, 以及傅云飞等^[19]利用一系列统计参数对就近取值法和动态最小二乘曲面拟合法的比较结果, 总体表明动态最小二乘曲面拟合法细化结果具有较高的可靠性. 因此我们确定提高 TMI 10.7 GHz 计算分辨率的最优方法是动态最小二乘曲面拟合法, 在本文第 3 部分将对该方法加以应用.

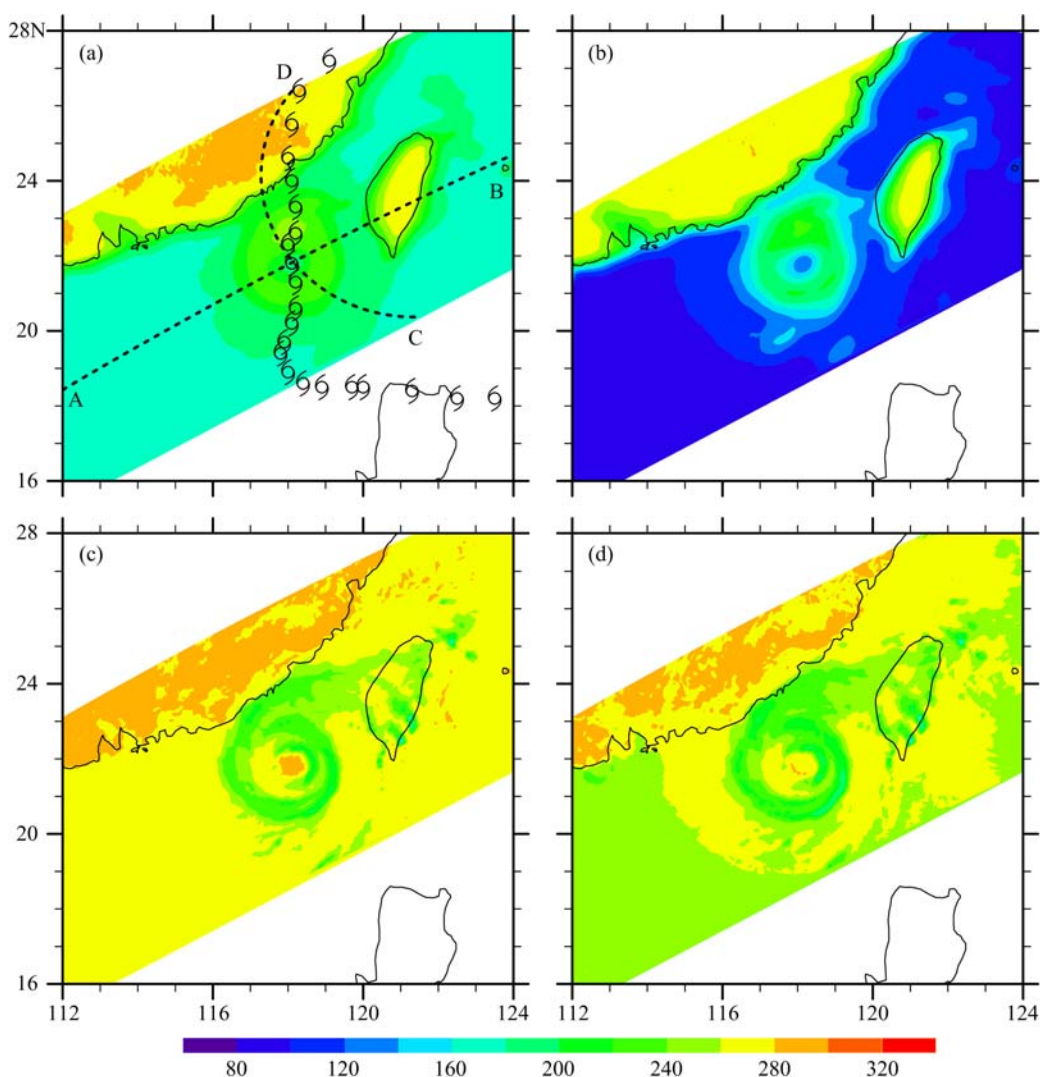
3 应用

为体现微波低频数据细化处理在实际应用中所带来的方便, 这里我们将匹配结果应用到一个台风实例上. 这里选取的台风个例是 1999 年 10 月 2 日~11 日经过西北太平洋区域的台风 DAN, 在 1999 年 10 月 8 日 01:09(UTC)刚好被 TRMM 探测到, 轨道号为 10710. 图 8 给出的是 TMI 10.7 GHz 和 85.5 GHz 通道探测的 DAN 台风云系微波辐射亮温的分布情况.

图 9 和图 10 分别给出了沿台风中心剖面 A-B

线和 C-D 线的云系微波辐射亮温分布. 两幅图比较可以看出, 10.7 GHz 两极化通道沿 C-D 线方向细化之后的数据量翻倍, 且像元位置与 85.5 GHz 一一对应, 细化之后的亮温与原始亮温分布情况基本一致. 而沿 A-B 线方向的数据量并没有发生变化, 因为在细化处理过程中, 只在横轨扫描线的方向上对 10.7 GHz 通道的像元进行了插值, 而并不涉及顺轨方向上的插值(低频通道和高频通道在顺轨方向的像元数量一致).

为了证明结果的普适性, 我们另外随机挑选了两条 TMI 轨道(2001 年 1 月 1 日第 17824 轨和第 17825 轨), 利用动态最小二乘曲面拟合法对 10.7 GHz 和 85.5 GHz 的观测亮温进行匹配, 并在图 11 中给出匹配结果. 可以看出, 细化处理前后亮温的整体分布情况基本相同, 并且与图(a)的原始亮温相比, 图(b)明显变得细致. 这表明本文挑选出的动态最小二乘曲面拟合法可以方便地细化 TMI 10.7 GHz 低分辨率亮温, 并且具有普遍适用性. 利用细化之后的 1B11 亮温数据进行大气/地表参数反演, 更容易获得相关结果的重要细节, 而这恰恰是低分辨率的原始亮温资料可能会遗漏的.



(a)(b) TMI 10.7 GHz 经细化处理后亮温, (c)(d) TMI 85.5 GHz 原始亮温, 6 表示台风路径

图 8 TMI 10.7 GHz 垂直(a)、水平(b)和 85.5 GHz 垂直(c)、水平(d)通道探测的 DAN 台风云系微波辐射亮温(单位:K)

Fig. 8 Microwave brightness temperature of vertical (a)(c), horizontal (b)(d) polarization at channels 10.7 GHz and 85.5 GHz in typhoon DAN at 01:09 UTC on OCT 8, 1999 (unit: K)

4 结论

被动微波遥感与传统的可见光/红外遥感相比,具有全天候、全天时观测的优点,但其低频通道较粗的空间分辨率严重影响其观测资料的使用效率,也为依据多通道微波资料的大气和地表参数反演过程带来了不便.本文以 TMI 10.7 GHz 通道探测资料为对象,以就近取值法、距离反比权重法和动态最小二乘曲面拟合法为算法,研究了如何简单有效地提高微波低频数据的计算分辨率.

本文首先利用 TMI 85.5 GHz 垂直极化通道探测亮温作为样本数据对 3 种方法进行了自检验分

析,检验样本随机取自单个轨道.自检验结果表明,3 种插值方法中,动态最小二乘曲面拟合法最优,距离反比权重法次之,就近取值法最差.为了说明结果的普适性,我们选择了洋面(170°E~180°E, 10°N~20°N)、陆面(110°W~100°W, 29°N~38°N)、海陆交界区(140°E~150°E, 13°S~3°S)3 个不同的区域来考察不同下垫面对 3 种插值方法的影响,结合细化前后 10.7 GHz 亮温的概率密度分布对比,发现动态最小二乘曲面拟合法是可用于提高 TMI 10.7 GHz 计算分辨率的最优方法.将该方法应用于探测实例,细化后微波数据更为丰富的图像细节证明了动态最小二乘曲面拟合法在资料细化处理中的普适性.

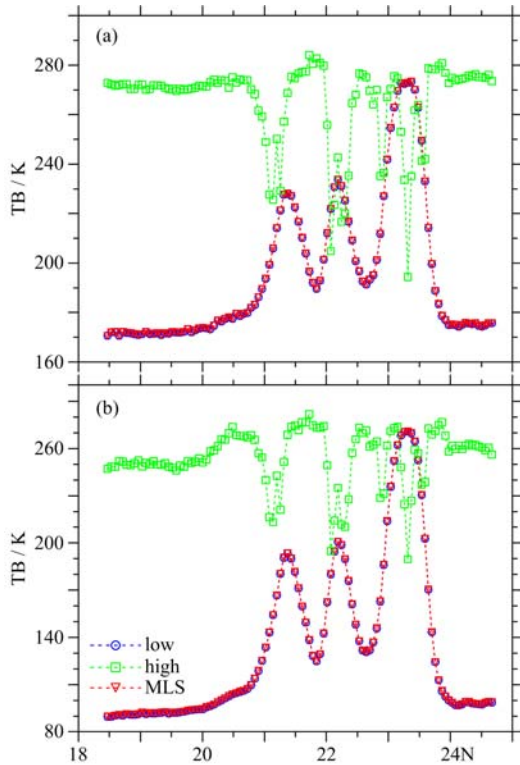


图 9 细化处理前后沿台风中心剖面(位置如图 8(a)中 A-B 所示)TMI 10.7 GHz 垂直(a)、水平(b)极化通道的亮温分布(单位:K)

Fig. 9 Height-distance cross-section of brightness temperature along AB line as shown in fig. 8(a) of vertical (a), horizontal(b) polarization channel at TMI 10.7 GHz before and after resolution enhancement (unit:K)

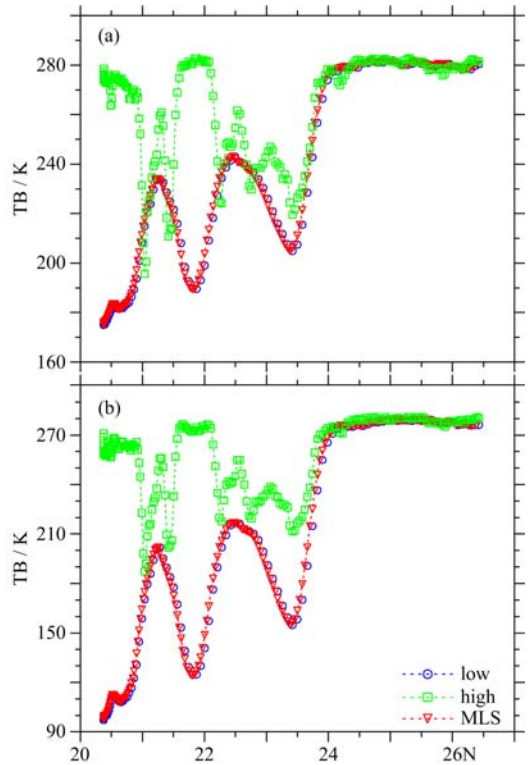


图 10 细化处理前后沿台风中心剖面(位置如图 8(a)中 C-D 所示)TMI 10.7 GHz 垂直(a)、水平(b)极化通道的亮温分布(单位:K)

Fig. 10 Height-distance cross-section of brightness temperature along CD line as shown in fig. 8(a) of vertical (a), horizontal(b) polarization channel at TMI 10.7 GHz before and after resolution enhancement (unit:K)

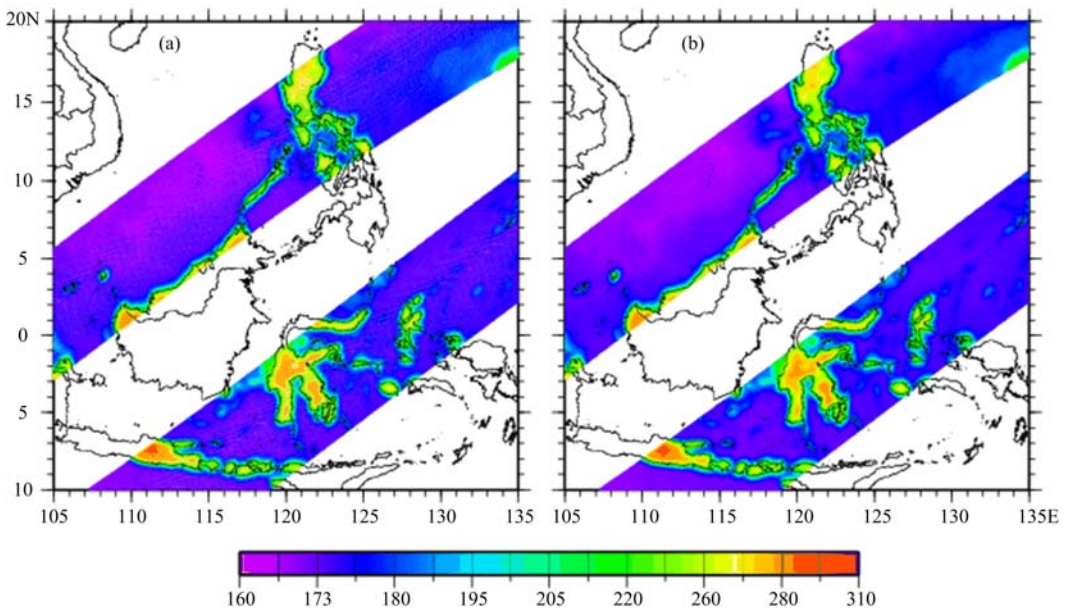


图 11 动态最小二乘曲面拟合法细化前(a)后(b)TMI 10.7 GHz 垂直通道亮温分布(单位:K)
Fig. 11 TMI brightness temperature of vertical polarization at channel 10.7 GHz before (a) and after (b) resolution enhancement by MLS (unit:K)

基于本文的研究结果,可以利用动态最小二乘曲面拟合法将 TMI 低频各通道数据都匹配至 85.5 GHz 的细致分辨率上,以形成统一的高计算分辨率微波融合亮温数据集. 这为利用 TMI 多通道数据进行大气和地表参数反演等后期处理过程提供了极大的便利,可以有效地提高多通道被动微波遥感亮温资料的使用效率.

参考文献(References)

- [1] 周秀骥,陶善昌,姚克亚. 高等大气物理学[M]. 北京:气象出版社,1991:1 035-1 048.
- [2] 张培昌,王振会. 大气微波遥感基础[M]. 北京:气象出版社,1995:384-410.
- [3] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(3): 809-817.
- [4] Tustison B, Foufoula-Georgiou E, Harris D. Scale-recursive estimation for multisensor quantitative precipitation forecast verification: A preliminary assessment [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107: 8 377; doi: 10.1029/2001JD001073.
- [5] Wilheit T T, Chang A T C, Chiu L S. Retrieval of monthly rainfall indices from microwave radiometric measurements using probability distribution functions [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1991, 8(1): 118-136.
- [6] Hollinger J P, Peirce J L, Poe G A. SSM/I instrument evaluation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 781-790.
- [7] Backus G E, Gilbert J F. Uniqueness in the inversion of inaccurate gross earth data [J]. *Philosophical Transactions*, 1970, 266(1173): 123-192.
- [8] Stogryn A. Estimates of brightness temperature from scanning radiometer data [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1978, 26(5): 720-726.
- [9] Poe G A. Optimum interpolation of imaging microwave radiometer data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28(5): 800-810.
- [10] Robinson W D, Kummerow C, Olson W S. A technique for enhancing and matching the resolution of microwave measurements from the SSM/I instrument [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(3): 419-429.
- [11] Farrar M R, Smith E A. Spatial resolution enhancement of terrestrial features using deconvolved SSM/I microwave brightness temperatures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2): 349-355.
- [12] Farrar M R, Smith E A, Xiang X W. The impact of spatial resolution enhancement of SSM/I microwave brightness temperatures on rainfall retrieval algorithms [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(3): 313-333.
- [13] Long D G, Daum D L. Spatial resolution enhancement of SSM/I data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(2): 407-417.
- [14] Migliaccio M, Gambardella A. Microwave radiometer spatial resolution enhancement [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(5): 1 159-1 169.
- [15] Simpson J, Adler R F, North G R. A proposed tropical rainfall measuring mission (TRMM) satellite [J]. *Bulletin American Meteorological*, 1988, 69(3): 278-295.
- [16] Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation [J]. *Interpreting Multivariate Data*, 1981: 21-36.
- [17] Hofstra N, Haylock M, New M, et al. Comparison of six method for the interpolation of daily, European climate data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D21110; doi: 10.1029/2008JD010100.
- [18] Zeng Q H, Lu D T. Curve and surface fitting based on moving least-squares methods [J]. *Journal of engineering graphics*, 2004, 25(1): 84-89.
曾清红, 卢德唐. 基于移动最小二乘法的曲线曲面拟合[J]. *工程图学学报*, 2004, 25(1): 84-89.
- [19] Fu Y F, Liu Q, Gao Y, et al. A feasible method for merging the TRMM microwave imager and precipitation radar data [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 122: 155-169.