

高度计风速与辐射计风速的变分融合研究*

姜祝辉[†] 游小宝 肖义国

(北京应用气象研究所, 北京 100029)

(2013年1月7日收到; 2013年2月18日收到修改稿)

为实现高度计风速与辐射计风速的融合, 采用 Kriging 插值方法将辐射计风速插值到高度计路径得到高度计风速观测算子, 建立高度计风速与辐射计风速融合的代价函数; 利用变分方法求解分析风速, 得出融合结果. 分别在仅高度计风速有误差、仅辐射计风速有误差和两者都有误差的情况下开展了模拟试验, 结果表明变分融合结果更接近于理想风速, 尤其在高度计路径上更为明显. 选取 Jason-1 高度计第 241 周期风速资料和与其时空匹配的国防气象卫星计划 F17 上所搭载的专用传感器微波成像仪辐射计风速资料开展了实例试验, 结果表明融合后的结果更加接近于浮标观测结果, 证实了变分融合方法的有效性. 经统计, 上述高度计和辐射计资料有 60% 时空匹配, 开展风速融合有重要的理论及应用价值. 该变分融合方法可应用于我国海洋二号卫星所载高度计与辐射计风速反演结果的融合.

关键词: 高度计, 辐射计, 风速, 融合

PACS: 92.60.Gn

DOI: 10.7498/aps.62.129202

1 引言

1978 年美国 Seasat-A 发射至今, 已经有十多颗载有高度计和辐射计的卫星升空^[1]. 众多学者在高度计和辐射计反演海面风速领域开展了大量研究工作, 取得了丰硕成果, 积累了三十多年高度计和辐射计风速资料^[2,3]. 高度计风速沿轨分辨率高、误差小, 辐射计风速覆盖范围广、精度高, 两者均有广泛的应用前景^[4]. 经统计, Jason-1 高度计第 241 周期风速资料与国防气象卫星计划 (defense meteorological satellite program, DMSP) F17 上所搭载的专用传感器微波成像仪 (special sensor microwave imager sounder, SSMIS) 辐射计风速资料有 60% 时空匹配, 所以开展风速融合有重要的理论意义及应用价值.

气象、海洋等预报精度在很大程度上取决于观测资料多寡, 如果将卫星反演的海面风场融合并应用到气象、海洋预报中, 有望提高预报精度. 高度计与辐射计是获取海面风场的重要载荷, 且均仅能获取风速分量 (本文不考虑全极化微波辐射计),

两者之间的融合是海面风场融合的基础性工作. 针对高度计风速与辐射计风速之间融合的相关研究较少.

Jacques 等^[5] 对热带大西洋船测风场与高度计风速进行了资料融合, Ruchi 和 Deo^[6] 提出对远海的高度计风浪参量场利用神经网络方法投射到指定的沿海区的方法, 姜祝辉等^[7] 利用变分结合正则化方法对高度计风速资料调整海面风场开展了初步研究, 齐亚琳等^[8] 利用 Kriging 插值方法将美国环境预报中心风场与海洋二号散射计风场开展了融合试验, Atlas 等^[9] 利用变分方法融合辐射计资料 SSM/I 海面风速、常规观测和欧洲中期数值预报中心分析值, 生成了变分分析风场. 美国气候数据中心把美国遥感系统 (remote sensing system, RSS) 利用多个卫星辐射计 (SSM/I, TMI, Seawinds, AMSR-E 等) 反演生成的风速进行融合, 得到可覆盖全球海洋每 6 h 更新一次的海面风速, 分辨率为 25 km^[10-12].

本文采用 Kriging 插值方法将辐射计风速插值到高度计路径上得到高度计风速观测算子, 建立高

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB951901) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: jiangzhuhui@sina.com

度计风速与辐射计风速融合的代价函数, 利用变分方法求解分析风速并得出融合结果. 在仅高度计风速有误差、仅辐射计风速有误差和两者都有误差三种情况下开展了模拟试验, 结果表明变分融合结果更接近于理想风速, 尤其在高度计路径上更为明显. 选取 Jason-1 高度计第 241 周期风速资料和与其时空匹配的 DMSP F17 上所搭载的 SSMIS 辐射计风速资料开展了实例试验, 表明融合后的结果更加接近于浮标观测结果, 证实了本文提出的变分融合方法的有效性. 本文所提出的变分融合方法可应用于我国海洋二号卫星所载高度计与辐射计风速反演结果的融合.

2 变分融合方法

数据融合问题常采用变分方法、谱方法、样条方法、谱系数统计插值方法、响应函数方法等^[13], 其中变分方法被认为是一种非常有潜力的融合方法, 其他四种方法目前处在研究应用阶段, 或仅作为融合系统中的辅助手段^[14].

本文针对高度计风速与辐射计风速的融合问题, 采用变分方法. 首先利用 Kriging 插值方法将辐射计风速插值到高度计路径以得到高度计风速观测算子 H , 然后利用变分融合方法构建分析风速.

假定 V_i 为辐射计风速中第 i 个点的风速 ($i = 1, 2, \dots, N$), \bar{V}_k 为辐射计风速插值到高度计路径上第 k 个点 (观测点) 的风速, k 为高度计轨迹上第 k 个点 ($k = 1, 2, \dots, K$), h_i^k 为第 i 个数据对第 k 个目标点的贡献权重, 记

$$\begin{aligned} \bar{Y} &= (\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_K)^T, \\ X &= (V_1, V_2, \dots, V_N)^T, \end{aligned}$$

则

$$\bar{Y} = HX.$$

观测算子 H 可表示为

$$H = (h_i^k)_{K \times N}.$$

贡献权重 h_i^k 由以下 Kriging 方程组^[15] 得到

$$\begin{pmatrix} h_1^k \\ \vdots \\ h_n^k \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c(x_1, x_1) & \cdots & c(x_1, x_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & 1 \\ c(x_n, x_1) & \cdots & c(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1}$$

$$\times \begin{pmatrix} c(x_1, x^k) \\ \vdots \\ c(x_n, x^k) \\ 1 \end{pmatrix},$$

这里 μ 为极小化处理时的拉格朗日乘子, $c(x_i, x_j)$ 为辐射计风速中网格点 x_i 与 x_j 之间的协方差函数, x^k 为高度计路径上的插值点. 本文采用指数型插值函数^[16,17]

$$c(L) = \begin{cases} 0 & (L = 0), \\ c_0 + c_1 \left(1 - \exp\left(\frac{-3L}{a}\right) \right) & (L > 0), \end{cases}$$

其中 L 为插值点与观测点之间的距离, c_0, c_1, a 为常数.

通过上述计算即可得到变分融合过程中所必须的观测算子 H . 高度计风速与辐射计风速的变分融合需满足高度计风速代价函数与辐射计风速代价函数之和最小, 即

$$J[X] = \min[J^a + J^s], \quad (1)$$

其中高度计风速代价函数为

$$J^a = [Y^a - HX]^T R^{-1} [Y^a - HX], \quad (2)$$

辐射计风速代价函数为

$$J^s = [X - X^s]^T B^{-1} [X - X^s], \quad (3)$$

Y^a 为高度计风速, X^s 为辐射计风速, X 为待求分析风速, R 与 B 分别为高度计风速与辐射计风速的误差协方差矩阵. 将 (2) 和 (3) 式代入 (1) 式可得

$$\begin{aligned} X &= X^s + (B^{-1} + H^T R^{-1} H)^{-1} \\ &\quad \times H^T R^{-1} (Y^a - Y^s), \end{aligned}$$

通过求解上式便可得出高度计风速与辐射计风速的变分融合后的分析风速.

3 模拟试验

本节通过模拟试验来考查变分方法融合高度计风速和辐射计风速的有效性. 首先模拟高度计及辐射计风速, 然后分别在辐射计风速存在误差时、高度计风速存在误差时、高度计和辐射计风速均存在误差时分析变分方法的融合效果.

模拟的辐射计风速探测点位置分布及高度计路径如图 1 所示. 经向距离取值范围为 $[-300 \text{ km},$

300 km], 纬向距离取值范围为 [-250 km, 250 km]. 经向纬向的分辨率均为 50 km. 模拟的高度计路径由南向北, 起于 (50 km, -250 km)、止于 (275 km, 250 km), 轨道倾角为 75°, 如图中右侧密集点线示. 高度计星下点分辨率为 6 km (在后面计算结果的图像显示时降到 18 km). 图中左侧起于 (-250 km, -250 km), 止于 (-25 km, 250 km) 的稀疏点线为参考路径, 该线将用于变分方法融合高度计与辐射计风速资料后, 将该参考路径上的融合结果与高度计路径上的融合结果进行对比, 以考查高度计扫描线上和非高度计扫描线上的融合效果. 图中分成两个灰色区域, 分别为 A 区和 B 区, 用以考查高度计扫描过的区域与高度计未扫描过的区域的融合结果的误差.

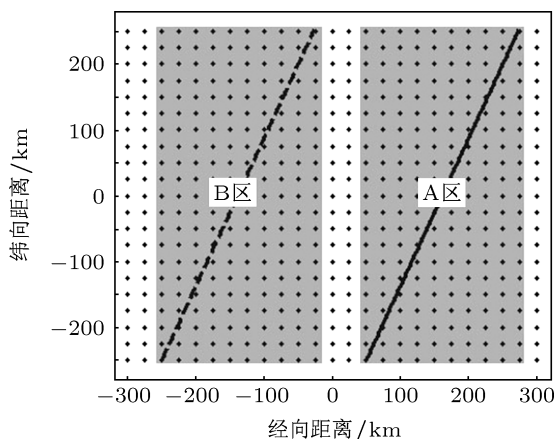


图1 模拟的背景风速探测点位置分布及高度计路径

模拟的辐射计风速构造函数如下

$$V = \sqrt{\cos^2 x \sinh^2 y + \sin^2 x \cosh^2 y},$$

其中 x 为经向距离向量, y 为纬向距离向量, V 为模拟的理想辐射计风速. 利用 Kriging 插值方法将理想辐射计风速插值到高度计路径上得出理想高度计风速, 利用 Kriging 插值方法将理想辐射计风速插值到参考路径上得出参考路径理想风速, 模拟的高度计辐射计风速及参考路径上的风速如图 2 所示. 从图 2 中可见, 该模拟的辐射计风速由东到西风速逐渐增大, 最小风速为 0, 最大风速为 15.8568 m/s. 在同一经线上风速经历一个由小变大, 再由大变小的过程, 选取的高度计风速经历一个 3—14 m/s 的缓慢上升过程, 如此选取的原因是单从一次试验中即可反映出不同理想风速情况下融合的效果. 参考路径上的风速为 0.2—2 m/s 的低风速.

由于无论是辐射计反演风速模型还是高度计反演风速模型均需要大量观测资料同理想模型进行拟合, 以获取最佳系数, 来得到较准确的反演结果. 然而事实情况是浮标、船舶报等海面风场的观测资料中绝大多数是中低风速的情况, 即风速 0—15 m/s, 能够达到 15 m/s 以上的资料相对较少, 而且风速越高, 资料越少. 资料匮乏必将导致反演模型在高风速情况下精度下降, 而且在高风速情况下降雨、白沫及拖拽系数的非单调性亦给理想模型提出了较大考验^[10]. 所以, 一般情况下, 风速小的时候误差小些, 风速大的时候误差大一些. 所以本文对理想高度计辐射计风速添加随机扰动时充分考虑到了这一点, 对理想风速添加了最大幅度为 50% 的随机误差, 如图 3 所示.

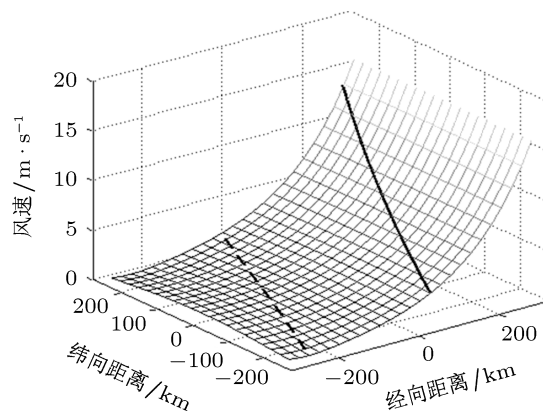


图2 模拟的理想高度计辐射计风速及参考路径上的风速

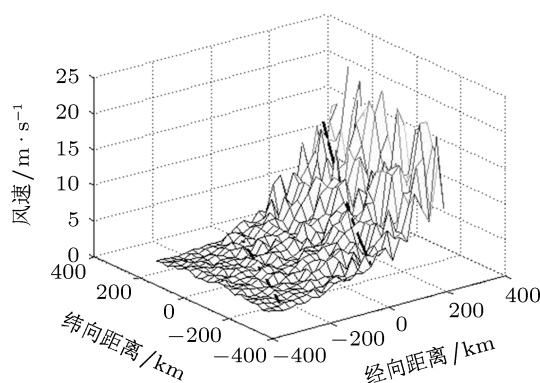


图3 添加扰动后的辐射计风速及高度计路径、参考路径上的风速

为深入地分析融合结果, 本文分三个部分来考查误差对融合结果的影响: 1) 当高度计风速为理想风速, 而辐射计风速为含有误差的风速时, 讨论融合结果的误差; 2) 当高度计风速为含有误差的风速, 而辐射计风速为理想风速时, 讨论融合结果的误差; 3) 当高度计风速与辐射计风速均含有误差时, 讨论

融合结果的误差.

3.1 辐射计风速有误差、高度计风速无误差的情况

进行辐射计风速有误差而高度计风速无误差时的反演结果分析,目的是考查变分方法在高度计风速无误差且覆盖范围相对较小的情况下辐射计误差是否能够得到有效抑制,整体风速的误差是否能够降低.图4是当辐射计风速有误差、高度计风速无误差时,高度计路径上的风速(理想风速用黑点标注,高度计风速用空心圆标注).从图4中可见,由于高度计风速无误差,所以高度计风速与理想风速在图中标注的位置相同,而辐射计风速由于添加了上述50%的误差,所以扰动幅度较大,而且风速越大扰动幅度越大.由于分辨率的不同,高度计风速相对密集,而辐射计风速及分析风速(分析风速分辨率与辐射计风速分辨率相同)相对稀疏.为显示直观,本文将辐射计风速与分析风速分别用虚线和实线连接,而非散点.经过变分方法进行融合后,分析风速明显趋向理想风速,由于利用变分方法进行融合处理时辐射计风速和高度计风速有相同的权重,所以分析风速只能在理想风速和辐射计风速之间.在该情况下的参考路径上的风速如图5所示.从图5中可见,辐射计风速曲线与分析风速曲线几乎重合,也就是说在远离高度计轨迹的位置上,即使高度计的风速是理想值,融合效果也不明显.为定量考查辐射计风速有误差,而高度计风速无误差的情况下高度计路径上的风速融合结果,将分析风速与理想风速进行比较得出整体区域、A区和B区的风速误差,见表1.从表1中可见,在整体区域中,辐射计风速误差为1.7048 m/s,分析风速误差为1.6543 m/s,即在高度计风速无误差的情况下,辐射计风速经变分分析后得出的分析风速误差降低约2.7%.由于所选取的A区处于高风速区,本文实验过程中在高风速区添加的误差更大,所以A区的辐射计风速误差要高于整体区域的风速误差,经变分分析后,误差降低了4%;所选取的B区处于低风速区,辐射计的风速误差亦较小;经统计,分析风速误差和辐射计误差几乎相等,也就是说在远离高度计路径的区域高度计风速的融合效果不明显.表2统计了在辐射计风速有误差,而高度计风速无误差的情况下,高度计路径上和参考路径上的风速误差.在高度计路径上辐射计风速误差为

1.5770 m/s,而分析风速误差降低到0.7058 m/s,降低了55.2%,即融合效果相当明显,而参考路径上辐射计风速误差和分析风速误差均为0.2288 m/s,融合效果不明显.

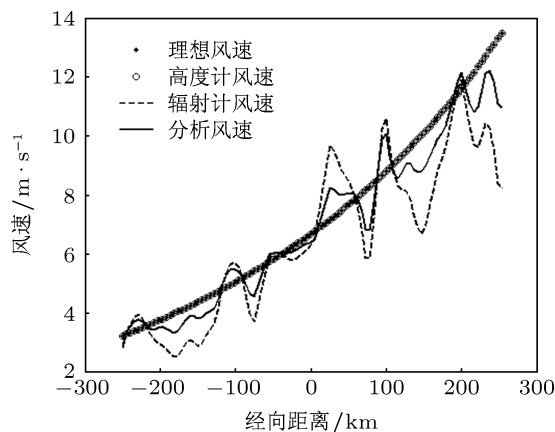


图4 辐射计风速有误差、高度计风速无误差时,高度计路径上的风速

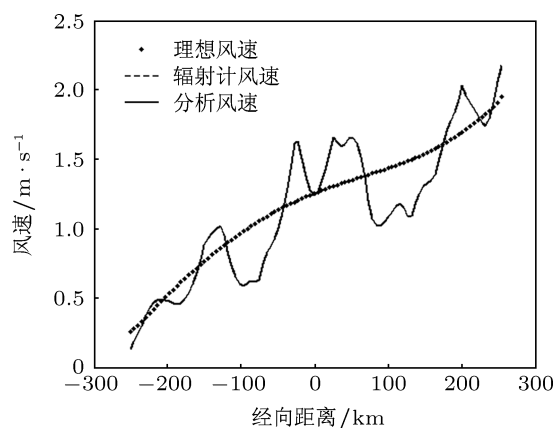


图5 辐射计风速有误差、高度计风速无误差时,参考路径上的风速

表1 辐射计风速有误差、高度计风速无误差时,整体区域、A区和B区风速误差

区域	辐射计风速误差/m·s ⁻¹	分析风速误差/m·s ⁻¹
整体	1.7048	1.6543
A区	2.3288	2.2359
B区	0.3737	0.3737

表2 辐射计风速有误差、高度计风速无误差时,高度计路径上的风速误差

	辐射计风速误差/m·s ⁻¹	分析风速误差/m·s ⁻¹
高度计路径上	1.5770	0.7058
参考路径上	0.2288	0.2288

3.2 辐射计风速无误差、高度计风速有误差的情况

由于真实海面情况、大气状况复杂多变,即使建立了完全符合物理规律的高度计风速反演模型,其后与实际资料进行的系数拟合等运算必然引入误差,而且在高风速阶段的拟合数据量偏小亦增大了反演误差,所以在变分方法融合高度计辐射计风速的同时,有必要考查当高度计风速有误差的情况对融合结果的影响。

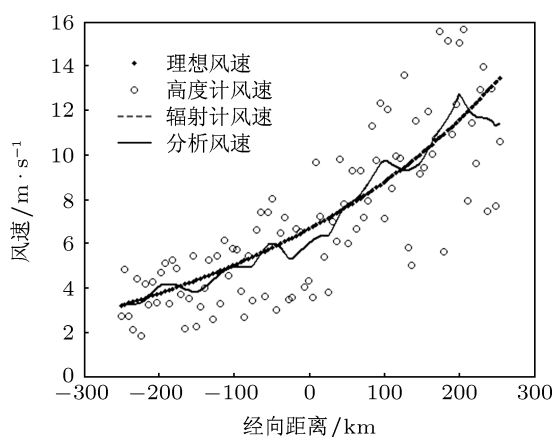


图6 辐射计风速无误差、高度计风速有误差时,高度计路径上的风速

本文对高度计路径上的理想风速添加 50% 的误差,来模拟高度计风速.当辐射计风速无误差,而高度计风速有误差时,高度计路径上的风速如图 6 所示.从图 6 中可见,由于辐射计风速无误差,所以辐射计风速和理想风速重合,而高度计风速存在较大误差,如图中小圆圈所示.经过变分分析得到分析风速,分析风速受到高度计风速误差的影响亦偏离理想风速.然而和上面高度计风速无误差,而辐射计风速有误差的情况相比,分析风速偏离理想风速的幅度要小得多,在添加的随机误差相同的情况下,高度计误差对融合结果的影响明显降低,其原因可能在于高度计的分辨率更高,在相同误差情况下,更高的分辨率资料对融合结果有积极作用.在参考路径上,在辐射计风速无误差,高度计风速有误差的情况下,高度计的误差对融合结果影响很小,如图 7 所示,辐射计风速和分析风速理想风速几乎在同一条曲线上.

下面进一步考查高度计路径上的风速误差(表 3)和参考路径上的风速误差(表 4).在高度计风速存在误差的情况下,A 区分析风速误差为 0.2637 m/s, B 区分析风速误差接近于 0,整体

分析风速误差为 0.1668 m/s,相对于辐射计存在同样幅度误差的情况下对分析风速的影响较小.而从表 4 可见,高度计路径上的高度计风速误差为 2.1291 m/s,分析风速误差为 0.5806 m/s,分析风速将误差降低到原来的 27.2%,参考路径上的分析风速接近于 0.从上述数据可以看出,当高度计风速存在误差的时候,对融合结果存在影响,但影响的强度没有辐射计风速存在误差的情况下影响强度大,而且变分方法的融合结果能够有效降低高度计风速存在误差的影响。

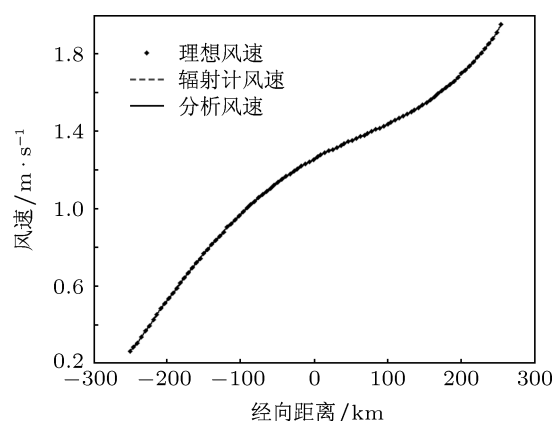


图7 辐射计风速无误差、高度计风速有误差时,参考路径上的风速

表3 辐射计风速无误差、高度计风速有误差时,高度计路径上的风速误差

区域	辐射计风速误差/m·s ⁻¹	分析风速误差/m·s ⁻¹
整体	0	0.1668
A 区	0	0.2637
B 区	0	1.7967 × 10 ⁻⁵

表4 辐射计风速无误差、高度计风速有误差时,参考路径上的风速误差

	辐射计风速误差/m·s ⁻¹	分析风速误差/m·s ⁻¹
高度计路径上	0	0.5806
参考路径上	0	7.3368 × 10 ⁻⁵

3.3 高度计及辐射计风速均有误差的情况

真实情况下,高度计风速和辐射计风速均存在误差.本节考查在高度计和辐射计风速均存在误差的情况下变分方法融合的效果.为便于比较,本节试验过程中添加的高度计风速误差和 3.2 节相同,

添加的辐射计风速误差和 3.1 节相同. 经过变分分析后, 高度计路径上的风速如图 8 所示. 从图 8 中可见, 与仅辐射计风速存在误差时分析风速和辐射计风速之间明显的联系相比 (分析风速的曲线和辐射计风速曲线形状极其相似, 只是相对于理想风速幅度小些, 如图 4 所示), 高度计风速和辐射计风速均存在误差时分析风速与辐射计风速之间的联系不明显. 在图 8 中经向距离为 -220 km 附近处, 虽然高度计风速存在误差, 但由于辐射计风速误差较小, 分析风速误差亦不大, 在经向距离为 20 km 附近, 辐射计风速相对于理想风速明显偏大, 而高度计风速有的接近于理想风速, 有的低于理想风速, 分析风速能够更加接近于理想风速, 即利用变分方法融合高度计和辐射计风速能够有效发挥两个资料的优点, 有效提高融合精度. 参考路径上的风速如图 9 所示. 与图 5 和图 7 相似, 高度计风速对参考路径上的风速融合效果不明显, 辐射计风速曲线和分析风速曲线几乎重合.

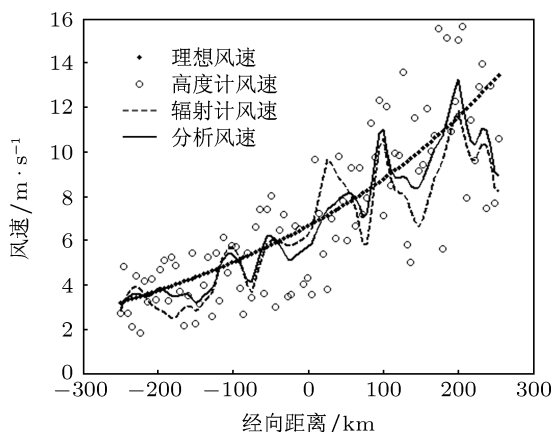


图 8 高度计辐射计风速均有误差时, 高度计路径上的风速

表 5 高度计辐射计风速均有误差时, 高度计路径上的风速误差

区域	辐射计风速误差/m·s ⁻¹	分析风速误差/m·s ⁻¹
整体	1.7048	1.6758
A 区	2.3288	2.2757
B 区	0.3737	0.3737

在高度计和辐射计均存在误差时, 经变分方法融合后高度计路径上的风速误差如表 5 所列. 整体区域、A 区分析风速误差低于辐射计风速误差, B 区融合效果不明显, 而由于高度计风速资料在 A 区, 所以 A 区的融合效果更为明显. 参考路径上的风速误差如表 6 所列, 高度计路径上辐射计

误差为 1.5770 m/s , 分析风速误差降低了 30%, 为 1.1009 m/s , 也就是说虽然高度计风速和辐射计风速均存在随机误差, 融合结果依旧能够趋向于理想风速. 参考路径上辐射计风速误差和分析风速误差几乎相等, 即远离高度计路径的融合结果不明显.

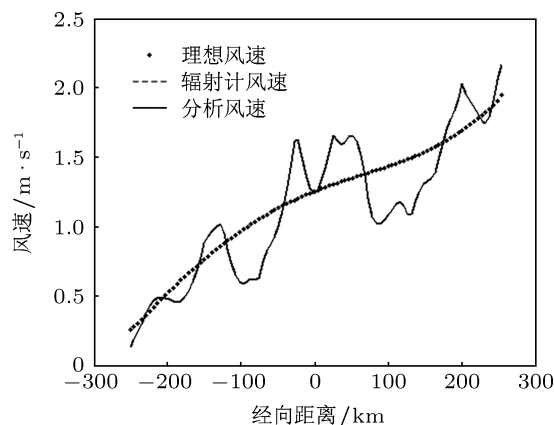


图 9 高度计辐射计风速均有误差时, 参考路径上的风速

表 6 高度计辐射计风速均有误差时, 参考路径上的风速误差

	辐射计风速误差/m·s ⁻¹	分析风速误差/m·s ⁻¹
高度计路径上	1.5770	1.1009
参考路径上	0.2288	0.2288

通过以上模拟试验可见, 高度计辐射计风速资料经变分融合后, 分析风速误差小于辐射计风速误差, 在高度计轨迹上, 分析风速误差小于高度计风速误差, 所以利用变分方法进行融合处理能够得到更加准确的分析风速.

4 实例试验

本试验采用的高度计数据是 Jason-1 雷达高度计第 241 周期的数据, 采用的辐射计数据是与高度计数据时空匹配的 DMSP F17 上所搭载的 SSMIS 数据, 采用的浮标数据为 TAO (Tropical Atmosphere Ocean array of moored buoys) 数据.

SSMIS 的每日数据是按照小时并区分升降轨存储的, 高度计每一轨历时 57 min 左右. 如果将每一个观测点的高度计与辐射计观测时间、观测地理位置之间进行匹配来判定 SSMIS 数据和高度计数据是否交会, 需要对 SSMIS 数据和高度计数据每一个观测点进行遍历, 将极其耗时. 本文为简化起见, 判定 SSMIS 数据与高度计数据交会的方法为:

1) 首先提取每一轨高度计经过赤道时的时间, 判断分钟数是否大于 30, 如果大于 30, 则将经过赤道时的时间的小时数加 1, 目的是将高度计经过赤道时的时间精确到小时;

2) 提取和这一轨高度计数据经过赤道时的时间相对应的辐射计资料;

3) 判断高度计数据每一个观测点和提取的辐射计资料每一个观测点之间的距离, 如果这两个观测点之间的距离小于 6.875 km (选取这个距离主要是出于对高度计分辨率的考虑), 则认为这两个观测点重合, 如果出现两组观测点重合则认为这一轨高度计数据和该提取的辐射计资料交会.

利用上述判定方法寻找高度计与辐射计交会的资料, 经统计计算, 在 Jason-1 第 241 周期内的 254 个资料中, 共有 147 个资料与辐射计资料交会. 有趣的是这 146 个交会资料中, 要么是高度计辐射计均处于升轨阶段, 要么是高度计辐射计均处于降轨阶段, 这可能和载有这两个仪器的卫星的轨道选择有关. 两者之间有交会的资料可以利用本文提出的变分方法来进行资料融合.

下面通过三个实例来考查变分方法融合高度计辐射计资料的效果. 选取这三个实例主要是基于其位置附近有浮标以进行对比试验的考虑.

4.1 Jason-1 第 241 周期第 19 轨风速与 SSMIS 风速的融合

图 10 为 Jason-1 高度计的第 241 周期第 19 轨与 2008 年 7 月 22 日 16 时的 SSMIS 辐射计资料交会地理位置以及浮标位置图. 此时高度计和辐射计均处于升轨阶段. 高度计路径为灰色, 辐射计有效数据点为黑色, 由于有降雨等情况辐射计轨迹上有些无效数据, 用白色填充. 本文针对图 10 进行变分融合处理. 在图 10 中的灰色渐变色代表辐射计风速大小, 风速越小颜色越趋向于黑色, 风速越大颜色越趋向于白色; 而纯白色代表由于降雨等干扰而产生的反演无效点; 黑色连续点线为高度计路径; 两个黑色孤立点为附近的两个浮标位置, 这两个浮标数据如表 7 所列. 虽然 TAO 数据的最高时间分辨率为 1 h, 但由于一些不确定的因素, 往往有很多缺测数据. 浮标数据与在这一组交会数据的时间最接近的浮标数据时间就是 18 h. 浮标 1 距离高度计路径约 180 km, 浮标 2 距离高度计路径约 80 km.

经过变分分析, 高度计轨迹上的高度计风速、辐射计风速、分析风速和浮标风速如图 11 所示. 从图 11 中可见, 辐射计风速整体要高于高度计风速, 分析风速能够分布于高度计风速与辐射计风速之间, 亦消除了高度计数据本身的震荡. 浮标 1 风

表 7 Jason-1 高度计第 241 周期第 19 轨路径附近的浮标数据

	经度/(°)	纬度/(°)	观测时间/h	风速/m·s ⁻¹
浮标 1	205.0040	-4.9900	18	6.7000
浮标 2	204.9860	-1.9720	18	7.2000

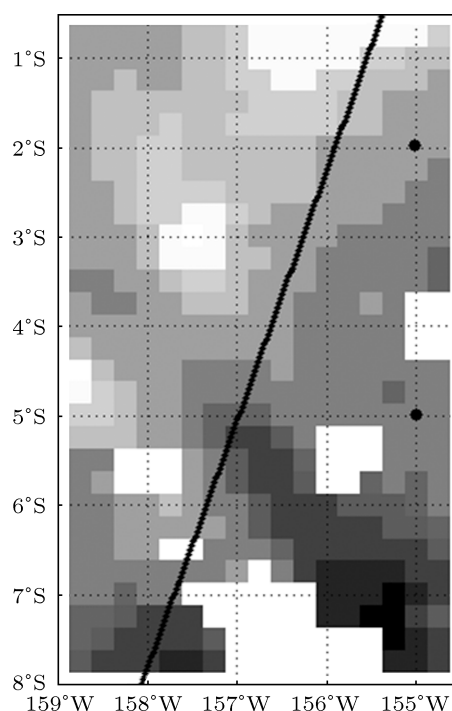


图 10 辐射计风速大小、Jason-1 高度计第 241 周期第 19 轨路径及浮标数据位置

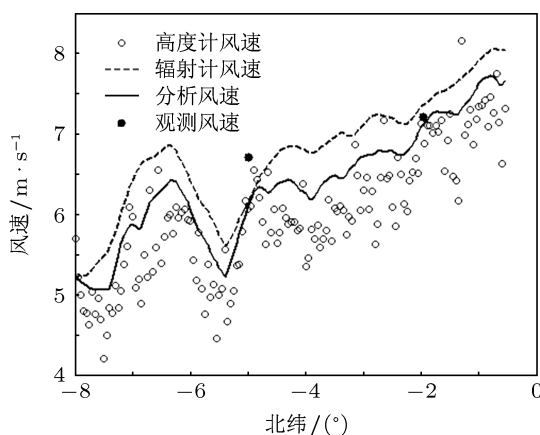


图 11 Jason-1 高度计第 241 周期第 19 轨路径上的风速与浮标风速的对比

速为 6.7 m/s, 略高于该位置上的高度计风速、辐射计和分析风速, 可能是由于浮标 1 距离高度计路径相对较远的原因 (如图 11 所示), 也有可能和高度计、辐射计观测时间和浮标观测时间相差 1.5 h 有关. 浮标 2 相对于浮标 1 距离高度计路径较近, 融合后的分析风速为 7.0 m/s, 和浮标 2 的风速仅相差 0.21 m/s.

4.2 Jason-1 第 241 周期第 54 轨风速与 SSMIS 风速的融合

选取的数据为 Jason-1 高度计第 241 周期第 54 轨与 2008 年 7 月 24 日 1 时的辐射计资料. 这两个仪器刚好在北纬 -45° 与北纬 5° 之间交会, 如图 12 所示. 此时的高度计时间为 2008 年 7 月 24 日 1 时 25 分. 从图 12 可见, 这两个资料均处于降轨阶段. 在北纬 -30° 到北纬 3° 之间辐射计资料较完整. 在高度计路径附近辐射计没有缺测数据, 而且选取的两个浮标资料距离高度计路径亦较近. 本节选取的浮标资料如表 8 所列. 这两个浮标距离高度计轨迹仅有 50 km 的距离, 观测时间浮标 1 为 0 时, 浮标 2 为 1 时, 和高度计辐射计观测时间较接近.

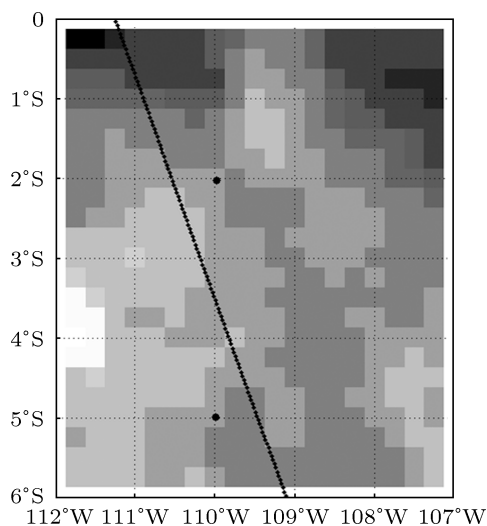


图 12 辐射计风速大小、Jason-1 高度计第 241 周期第 54 轨路径及浮标数据位置

利用变分方法融合这一组高度计、辐射计资料, 得出高度计路径上的分析风速, 以及高度计风速、辐射计风速、浮标风速如图 13 所示. 从图 13 中可见, 高度计风速值误差较大, 且明显比辐射计资料要小, 但整体趋势相同, 均经历一个从大缓慢减小的过程. 经过变分分析后得到分析风速, 分析

风速介于高度计和辐射计风速之间. 浮标 3 比分析风速大 0.42 m/s, 与北纬 -4.9° 与 -4.8° 之间的三个高度计风速值比较接近; 浮标 4 与分析风速几乎重合, 仅相差 0.04 m/s.

表 8 Jason-1 高度计第 241 周期第 54 轨路径附近的浮标数据

	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	观测时间/h	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
浮标 3	250.0080	-4.9950	0	7.7000
浮标 4	250.0170	-2.0200	1	7.2000

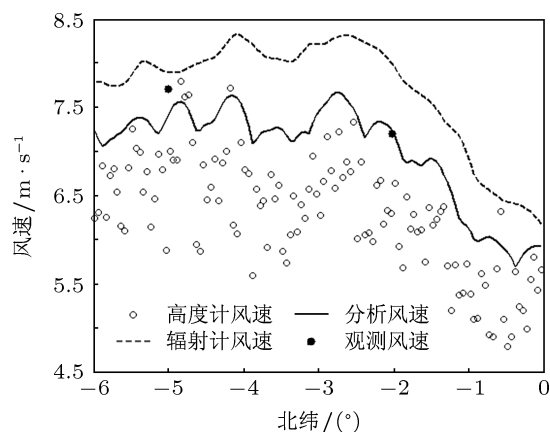


图 13 Jason-1 高度计第 241 周期第 54 轨路径上的风速与浮标风速的对比

4.3 Jason-1 第 241 周期第 108 轨风速与 SSMIS 风速的融合

选取的第三组高度计与辐射计资料为 2008 年 7 月 26 日 4 时的辐射计资料和第 241 周期第 108 轨的高度计资料, 该高度计经过赤道的时间为 2008 年 7 月 24 日 4 时, 即和辐射计资料的时间刚好一致. 从图 14 可见, 高度计与辐射计在北纬 -38° 与北纬 10° 之间交会, 辐射计资料中有很多无效点. 浮标的具体信息如表 9 所列. 浮标的观测时间和高度计辐射计相同. 然而从图 14 中可见浮标 5 距离高度计路径较远, 达 200 km, 浮标 6 距离高度计路径较近, 仅 30 km. 然而距离浮标 6 不远的区域, 如北纬 -4° 附近, 高度计辐射计均有缺测点, 这有可能与该区域的降雨有关.

表 9 Jason-1 高度计第 241 周期第 108 轨路径附近的浮标数据

	经度/ $^\circ$	纬度/ $^\circ$	观测时间/h	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
浮标 5	204.9680	-8.2690	4	6.7000
浮标 6	205.0010	-4.9860	4	6.2000

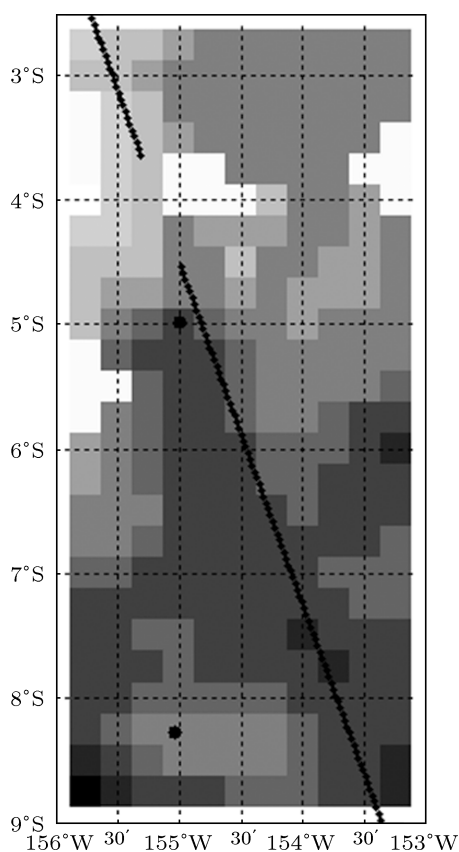


图 14 辐射计风速大小、Jason-1 高度计第 241 周期第 108 轨路径及浮标数据位置

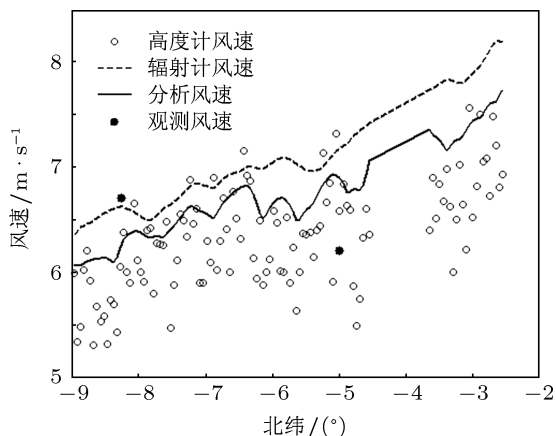


图 15 Jason-1 高度计第 241 周期第 108 轨路径上的风速与浮标风速的对比

利用所选取的高度计、辐射计资料进行变分方法融合,得到分析风速如图 15 所示. 北纬 -4.48° 与北纬 -3.71° 之间高度计风速缺失. 分析风速介于高度计与辐射计风速之间, 浮标 5 高于辐射计风速高度计风速和分析风速, 其原因可能在于浮标 5 距离高度计路径较远, 而浮标 6 风速低于分析风速, 与其附近的高度计风速值较接近, 这有可能是由于辐射计和高度计数据在该区域附近有太多缺测值.

5 结论

由于海洋现场探测资料的匮乏, 所以众多星载探测器升空以探测海洋参数, 三十多年来积累了宝贵的高度计风速资料和辐射计风速资料. 在轨运行的高度计有 HY-2, Jason-1/2, Envisat 等, 辐射计亦有 SSM/I, TMI, AMSR-E, JMR, SSMIS 等, 所以交会的资料会更多, 两个资料的融合有实际意义. 本文提出利用变分方法融合高度计风速与辐射计风速, 以提高风场的精度. 模拟试验表明, 在高度计风速有误差、辐射计资料无误差的情况下, 高度计因其分辨率高, 对融合结果影响不大; 在辐射计风速资料有误差的情况下, 高度计风速资料对高度计轨迹所覆盖的区域融合效果明显, 对远离高度计轨迹的区域融合效果不明显. 统计试验表明, 与第 141 周期的 Jason-1 高度计时空匹配的 SSMIS 辐射计数据有 147 轨, 即两者之间的融合有应用价值. 与现场浮标风速值比较后表明, 变分方法融合高度计、辐射计资料后得到的分析风速相对于现场观测资料误差更小, 体现了变分方法融合这两种资料的可行性. 本文提出的变分融合方法可应用于我国海洋二号卫星所搭载的高度计和辐射计海面风速反演结果的融合.

本文所提出的变分融合方法得到解放军理工大学气象学院黄思训教授的悉心指导, 在此谨表谢意.

[1] Zieger S, Vinoth J, Young I R 2009 *J. Atmos. Ocean Tech.* **26** 2549
 [2] Jiang Z H, Huang S X, Liu G 2011 *Marine Sci. Bull.* **30** 588 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 刘刚 2011 海洋通报 **30** 588]
 [3] Witter D L, Chelton D B 1991 *J. Geophys. Res.* **96** 8853
 [4] Atlas R 2010 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Honolulu, USA, July 25–30, 2010* p3538
 [5] Jacques S, Francis G, Alain M 1993 *J. Atmos. Ocean Tech.* **10** 880
 [6] Ruchi K, Deo M C 2007 *Coastal Eng.* **54** 187
 [7] Jiang Z H, Huang S X, Du H D, Liu B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8968 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 杜华栋, 刘博 2010 物理学报 **59** 8968]
 [8] Qi Y L, Lin M S 2012 *Spacecraft Engineering* **21** 117 (in Chinese) [齐亚琳, 林明森 2012 航天器工程 **21** 117]
 [9] Atlas R, Hoffman R N, Ardizzone J, Leidner M, Jusem J C 2008 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Boston,*

- USA, July 6–11, 2008 pI-106
- [10] Portabella M, Stoffelen A, Johannessen J A 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 3086
- [11] Ding L, Weng F, Chen Y, Zhu T 2012 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* Munich, Germany, July 22–27, 2012 p875
- [12] Sun N, Weng F 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 1006
- [13] Hirota S, Sean A M, Zimmerman D A, Timothy C C 2005 *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **19** 71
- [14] Jiang Z H, Huang S X, Shi H Q, Zhang W, Wang B 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 108402 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 石汉青, 张伟, 王彪 2011 物理学报 **60** 108402]
- [15] Jouhaud J C, Sagaut P, Labeyrie B 2006 *J. Fluids Eng.* **128** 847
- [16] Li J, Huang S X 2001 *Sci. China D* **31** 70 (in Chinese) [李俊, 黄思训 2001 中国科学 D **31** 70]
- [17] Huang S X, Wu R S 2001 *Methods of Mathematical Physics in Atmospheric Science* (Beijing: China Meteorological Press) p422 (in Chinese) [黄思训, 伍荣生 2001 大气科学中的数学物理问题 (北京: 气象出版社) 第 422 页]

Research on the method of variational fusion of altimeter wind speed and radiometer wind speed*

Jiang Zhu-Hui[†] You Xiao-Bao Xiao Yi-Guo

(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China)

(Received 7 January 2013; revised manuscript received 18 February 2013)

Abstract

In order to realize the fusion of altimeter wind speed and radiometer wind speed, the Kriging method is used to interpolate radiometer wind speed to the altimeter path to obtain the altimeter wind speed observation operator, a cost function is established, and then the variational method is adopted to construct and analyze wind speed and derive fusion results. Simulation tests are carried out when only altimeter wind speed contains error, only radiometer wind speed contains error, both altimeter and radiometer wind speed contain error. The results show that through the variational fusion, the accuracy is improved, especially in the altimeter path. The Jason-1 altimeter cycle 241 wind speed data and spatial temporally matched Special Sensor Microwave Imager Sounder wind speed data (carried by Defense Meteorological Satellite Program F17) are selected to carry out the real test, and the results show that the fused wind speed is more close to the buoy observation, so it is confirmed that the variational fusion method is effective, statistics shows that 60% altimeter and radiometer data matched, which means that fusion is an important theory and has application value. The variational fusion method can be applied to the fusion of HY-2 satellite altimeter and radiometer wind inversion results.

Keywords: altimeter, radiometer, wind speed, fusion

PACS: 92.60.Gn

DOI: 10.7498/aps.62.129202

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB951901).

[†] Corresponding author. E-mail: jiangzhuhui@sina.com