

合成孔径雷达反演海面风场变分模型分析*

姜祝辉[†] 周晓中 游小宝 易欣 黄为权

(北京应用气象研究所, 北京 100029)

(2014年3月2日收到; 2014年3月31日收到修改稿)

为考察合成孔径雷达反演海面风场变分模型精度, 开展了误差分析试验. 在背景场误差为极大值条件下分析场误差低于背景场误差, 且随背景场风向增大呈周期性变化; 在背景场误差逐渐变大条件下分析场误差逐渐增大, 误差偏离方向与背景场误差偏离方向一致; 在特定背景场条件下与直接反演模型相比, 低风速时反演误差略高, 中高风速时反演误差明显较低. 总体来讲, 变分模型误差小于背景场误差, 风速反演误差小于 1.60 m/s, 风向误差小于 17.15°.

关键词: 合成孔径雷达, 海面风场, 变分模型

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

DOI: 10.7498/aps.63.148401

1 引言

海面风场在气象海洋预报、海洋资源的开发利用等方面起着十分重要的作用. 能够现场观测海面风场的有限数量的海洋站、锚系浮标以及船舶报等空间分辨率低, 与精细化气象海洋科研业务之间的矛盾日益凸显. 星载合成孔径雷达以其高空间分辨率的独特优势, 逐渐成为获取海面风场的主要手段之一^[1-3].

合成孔径雷达反演海面风场相关研究始于 20 世纪 70 年代末, Weissman 等^[4] 分析指出合成孔径雷达强度图像与海面风场存在相关性 (注: 为简化起见, 本文“风速”和“风向”均指海面风场的风向和风速), 其中强度图像的风条纹方向与风向基本一致, 强度大小与风速相关. 随后, 大量学者开展了卓有成效的研究, 主要集中在以下几个研究方向: 1) 从合成孔径雷达强度图像的风条纹中提取风向, 代表性的方法有傅里叶变换方法^[5]、Sobel 算子方法^[6]、数值微分方法^[7]和小波变换方法^[8]等; 2) 将合成孔径雷达图像中反演得到的海面风向或数值预报、浮标中的海面风向当作反演的风向, 并将其

输入到地球物理模型中, 直接反演海面风速 (本文称之为直接反演模型); 3) 借鉴散射计反演海面风场原理, 假定相邻风矢量非常接近, 利用最大似然法反演海面风场^[9]; 4) 基于贝叶斯理论, 将后向散射截面与数值预报结果中的海面风场引入到变分方程中, 通过求取代价函数极小来确定最优风矢量^[10,11], 姜祝辉等^[12]给出了考虑正则化参数的变分方法反演海面风场的新思路, 模拟试验表明该思路可行. 由于合成孔径雷达数据刈幅窄, 且海上现场观测资料匮乏, 不同文献给出的反演误差略有不同, 风速均方根误差一般分布于 1.9 m/s ± 0.2 m/s 之间, 风向均方根误差分布于 20° ± 5° 之间.

本文在姜祝辉等^[12]工作的基础上, 深入分析通过变分模型反演海面风场的基本原理, 开展在不同背景场条件下变分模型误差分析试验, 对比变分模型与直接反演模型之间的结果差异, 讨论变分模型的适用性. 结果表明, 通过变分模型反演合成孔径雷达海面风场能够将风速均方根误差控制在 1.60 m/s 以内, 将风向均方根误差控制在 17.15° 以内.

* 高分辨率对地观测系统重大专项青年创新基金 (批准号: GFZX04060103-3-12) 和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

2 变分模型

2.1 地球物理模型

Hersbach 等^[13]经大量试验建立了后向散射截面与海面风场之间关系的地球物理模型

$$\sigma^o(V, \theta, \phi) = B_0(V, \theta)(1 + B_1(V, \theta) \cos \phi + B_2(V, \theta) \cos 2\phi)^\alpha, \quad (1)$$

其中 B_0, B_1, B_2 是风速 V 和入射角 θ 的函数, ϕ 为风向, α 为常数. 地球物理模型中后向散射截面与海面风场之间的关系见图 1. 图 1(a) 给出了随着风速的增大后向散射截面的变化, 可见当风速较小时, 后向散射截面的变化较快, 风速较大时, 后向散射截面的变化较小, 而图 1(b) 中后向散射截面随着风向的增大呈周期性变化, 一个后向散射截面最多对应四个风向.

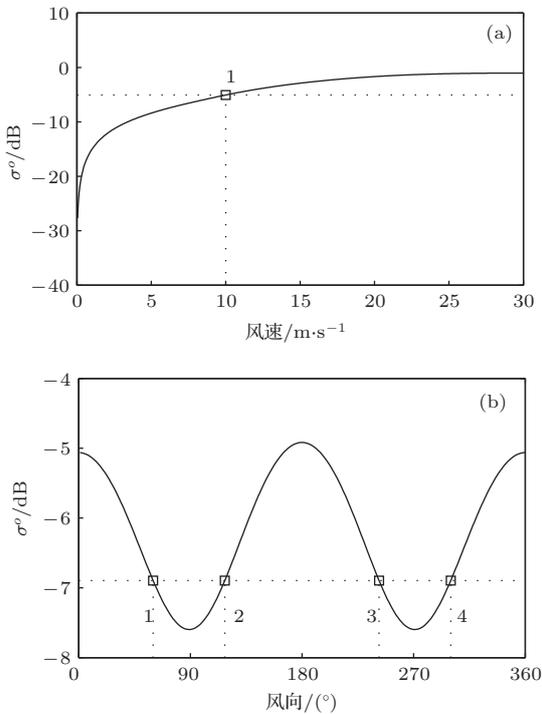


图 1 地球物理模型

2.2 变分模型

直接反演模型是将风向作为已知量来计算风速(本文将直接反演模型计算得到的风速和风向称之为直接反演风速和直接反演风向). 当风向存在误差时, 将直接导致风速更大的误差, 尤其当风速较大时, 后向散射截面的微小变化将导致风速反演很大的变化(见图 1). 为此, 建立变分模型^[12]

$$J(u, v) = J_o(u, v) + \gamma J_b(u, v), \quad (2)$$

其中 γ 为正则化参数^[14,15], u 和 v 分别为分析场风速在 X 轴和 Y 轴方向分量. 令 u_b 和 v_b 为背景场风速在 X 轴和 Y 轴方向分量, 记背景场风速和分析场风速分别为 $V_b = \sqrt{u_b^2 + v_b^2}$, $V = \sqrt{u^2 + v^2}$. 令 ϕ_b 与 ϕ 分别为背景场风向和分析场风向, 引入 $J_o(V, \phi)$ 与 $J_b(V, \phi)$ 如下

$$J_o(V, \phi) = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma^a(V, \theta, \phi) - \sigma^o}{SD_{\sigma^o}} \right)^2,$$

$$J_b(V, \phi) = \frac{1}{2} \left(\frac{V - V_b}{SD_V} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\phi - \phi_b}{SD_\phi} \right)^2,$$

这里 $\sigma^a(V, \theta, \phi)$ 指的是通过直接反演模型计算得到的分析场后向散射截面, σ^o 为观测得到的合成孔径雷达后向散射截面; SD_{σ^o} 为观测场的均方根误差, 取 $SD_{\sigma^o} = 0.1\sigma^o$; 背景场风速的均方根误差 $SD_V = 1.7 \text{ m/s}$ ^[11], 背景场风向的均方根误差 $SD_\phi = 20^\circ$. 由于观测场和背景场选取的不同, 这三个量在实际应用之前需通过统计得出具体值. 通过 (2) 式求代价函数的极小值, 即可计算得到最优的海面风场结果.

2.3 两个模型计算流程

直接反演模型将合成孔径雷达数据与给定的风向共同输入到地球物理模型中计算风速, 将给定的风向与计算得到的风速作为待求海面风场输出(图 2). 变分模型将合成孔径雷达数据与给定的海面风场共同输入到变分模型中计算海面风场并输出(图 3). 两者的相同点是输入量均是合成孔径雷达数据和遥感反演、数值预报相关信息, 通过模型计算得到所求风场. 不同点是: 1) 输入量, 直接反演模型不需要输入风速, 变分模型需要将风速、风向均需作为输入量; 2) 核心算法, 直接反演模型中的地球物理模型算法简单, 而变分模型计算流程中的变分模型包含了地球物理模型, 算法较为复杂; 3) 输出量, 直接反演模型结果中的风向等于输入的风向, 地球物理模型对风向没有影响, 而变分模型对输入的风速风向都进行调整并遴选最优海面风场, 反演的风速风向结果与输入的风速风向均不同.

3 误差分析

为考查第二节中变分模型的反演误差, 分别在背景场误差为极大值条件下分析场误差分析、背景

场误差逐渐变大条件下分析场误差分析和特定背景场条件下直接反演模型与变分模型两者之间的误差对比分析三个方面开展试验研究, 给出误差分布趋势和统计误差大小, 并讨论直接反演模型与变分模型两者的优劣.

试验方案为: 首先给出真实风速风向, 然后分别对风速风向添加指定大小的误差作为背景场, 观测场 (即后向散射截面) 由真实风速风向和 (1) 式计算得出. 实际应用过程中只输入背景场与观测场, 真实风速风向仅在计算分析场误差时使用.

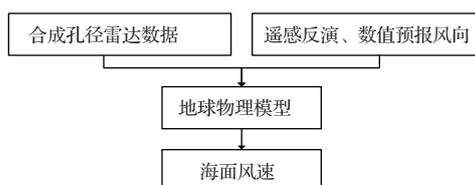


图2 直接反演模型计算流程

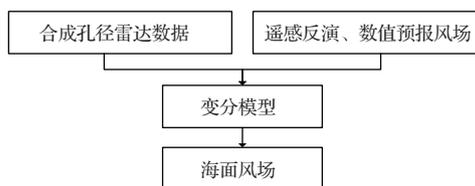


图3 变分模型计算流程

3.1 背景场误差为极大值条件下的分析场误差

为全面考查变分模型精度, 背景场风速在 0—25 m/s 范围内等分选取 12 个值, 背景场风向在 0°—360° 范围内等分选取 72 个值 (本节每组试验样本量为 864 对).

当背景场中一个量误差为极大值 (令背景场风速误差极大值为 2 m/s、背景场风向误差极大值为 20°)、另一个量无误差的条件下分析场误差分布情况如图 4 所示. 曲面代表了误差的分布, 颜色趋向于白色的点代表值大, 颜色趋向于黑色的点代表值小. 可以看出图 4 所有子图的曲面均随着背景场风向增大呈周期性变化, 在 90°, 180°, 270°, 360° 附近往往会出现极大值点或极小值点. 当背景场风速风向误差分别为 0 m/s 和 20° 时 (图 4(a), (b)), 在背景场风向的影响下, 分析场风速误差产生了小幅度的波动, 误差在 -0.51—0.63 m/s 范围内呈周期性变化 (表 1), 均方根误差为 0.26 m/s, 尤其在背景场风速较小时分析场风速误差小, 分析场风向误差的偏离方向与背景场风向误差的偏离方向

一致, 在 90°, 180°, 270°, 360° 附近误差偏大, 但整体更趋向于 0°, 分析场风向误差在背景场风速较小时误差偏大, 周期性变化的幅度小, 在背景场风速较大时误差小, 周期性变化的幅度大. 整体上讲分析场风向误差在 10.84°—22.88° 之间, 均方根误差为 16.88°, 较背景场风向更趋向于真值. 背景场风速风向误差分别为 0 m/s 和 -20° 时 (图 4(c), (d)) 的结果与背景场风速风向误差分别为 0 m/s 和 20° 时的结果相似. 当背景场风速风向误差分别为 2 m/s 和 0° 时 (图 4(e), 4(f)), 分析场风速误差的偏离方向与背景场风速误差的偏离方向一致, 在 90°, 180°, 270°, 360° 附近误差小, 整体更趋向于 0°, 分析场风速误差在背景场风速较小时误差小, 周期性变化的幅度小, 在背景场风速较大时误差大, 周期性变化的幅度亦大, 整体上讲分析场风向误差在 0.99—1.97 m/s 之间, 均方根误差为 1.56 m/s, 较背景场风向更趋向于真值. 虽然背景场风向无误差, 但背景场风速的误差将导致分析场的风向稍微偏离真值, 出现了 -5.95°—5.95° 范围的误差, 均方根误差为 3.71°. 当背景场风速风向误差分别为 -2 m/s 和 0° 时 (图 4(g), 4(h)), 亦呈类似的趋势, 分析场风速风向误差分别为 1.56 m/s 和 3.39°. 综合图 4 和表 1 中的前四组数据可以看出, 背景场一个量误差为极大值、另一个量无误差的条件下, 分析场中极大值的量误差减小 20% 左右, 无误差的量存在小幅波动.

当背景场中两个量误差均为极大值条件下分析场误差分布情况如图 5 所示. 图 5 中所有子图的曲面均随着背景场风向增大呈周期性变化, 分析场误差偏离方向与背景场误差偏离方向一致, 幅度趋小. 与图 4 相似, 图 5 中背景场风速较小时分析场风速误差相对较小, 但分析场风向误差较大, 在背景场误差较小时分析场风速风向变化幅度均比背景场风速较大时的幅度小. 从表 1 后四组数据中分析场最大误差和最小误差角度看, 最大误差均比背景场风速风向误差大, 最小误差与背景场误差偏离方向相同, 值较小. 背景场风速风向误差均为极大值条件下, 分析场风速均方根误差为 1.60 m/s, 分析场风向均方根误差在 17.15° 左右, 均明显低于背景场风速风向误差.

鉴于图 4, 图 5 和表 1 中计算结果的对称性, 仅针对背景场风速风向误差分别为 0 m/s 和 20° 和背景场风速风向误差分别为 2 m/s 和 20° 两个条件下分析场误差大于背景场误差占比情况进行两次试

验, 如表 2 所列. 在第一组试验中, 分析场风速误差大于 2 m/s 的情况占比为 0%, 分析场风向误差大于 20° 的情况占比 8.33%; 而在第二组试验中, 分析场风速风向误差大于背景场误差占比大于第一组试验, 且由于背景场风速存在 2 m/s 的误差, 分析场风速误差大于 2 m/s 的情况占比也超过了 20%.

但总体来讲, 在背景场为极值的条件下, 分析场误差大于背景场误差的占比均低于 30%.

综合图 4, 图 5, 表 1 和表 2 可见, 分析场均方根误差均低于背景场的极值误差, 表明在背景场误差为极值的条件下, 变分模型能够有效降低误差.

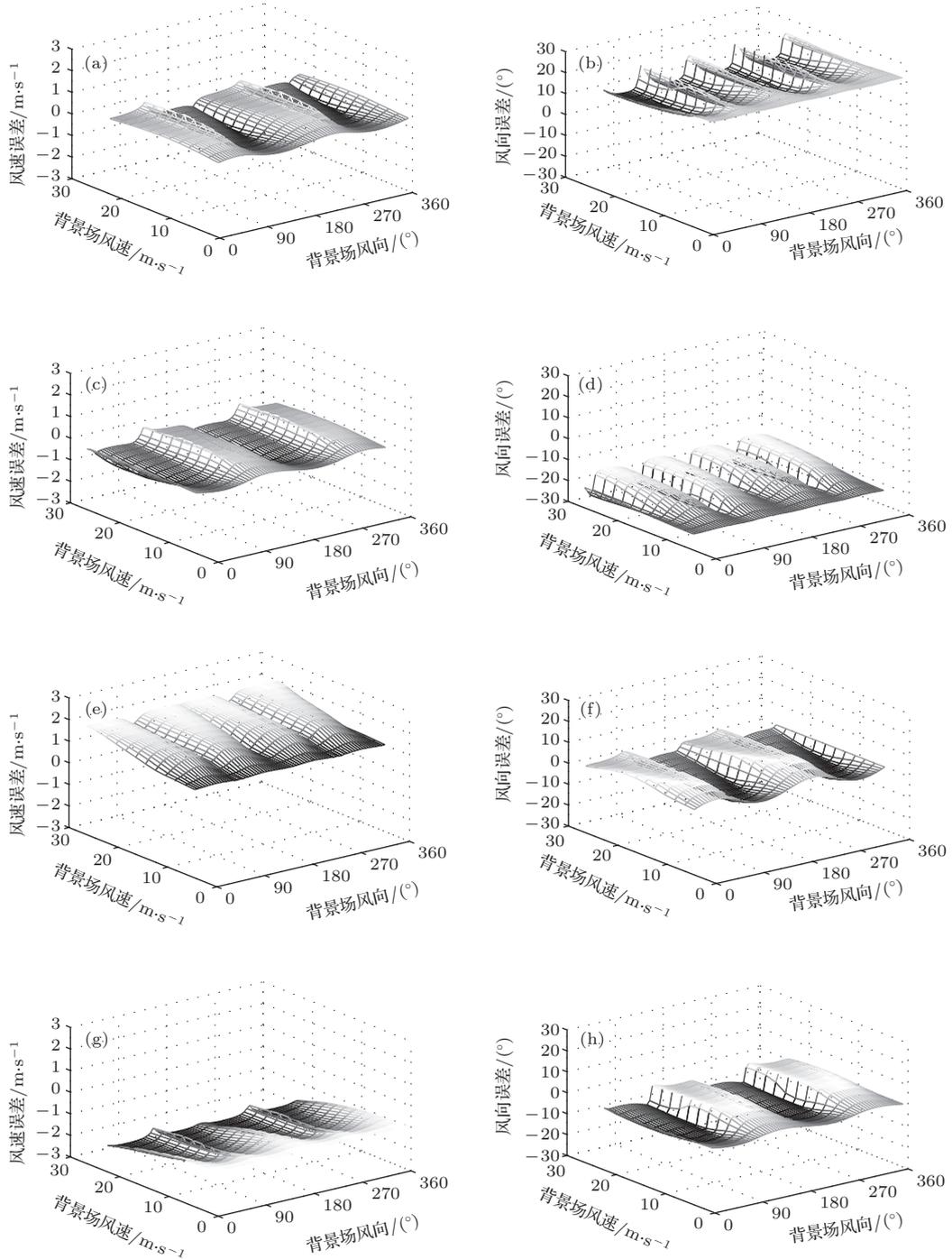


图 4 背景场误差为极大值条件下分析场误差分布 (a), (b) 背景场风速风向误差分别为 0 m/s 和 20°; (c), (d) 背景场风速风向误差分别为 0 m/s 和 -20°; (e), (f) 背景场风速风向误差分别为 2 m/s 和 0°; (g), (h) 背景场风速风向误差分别为 -2 m/s 和 0°

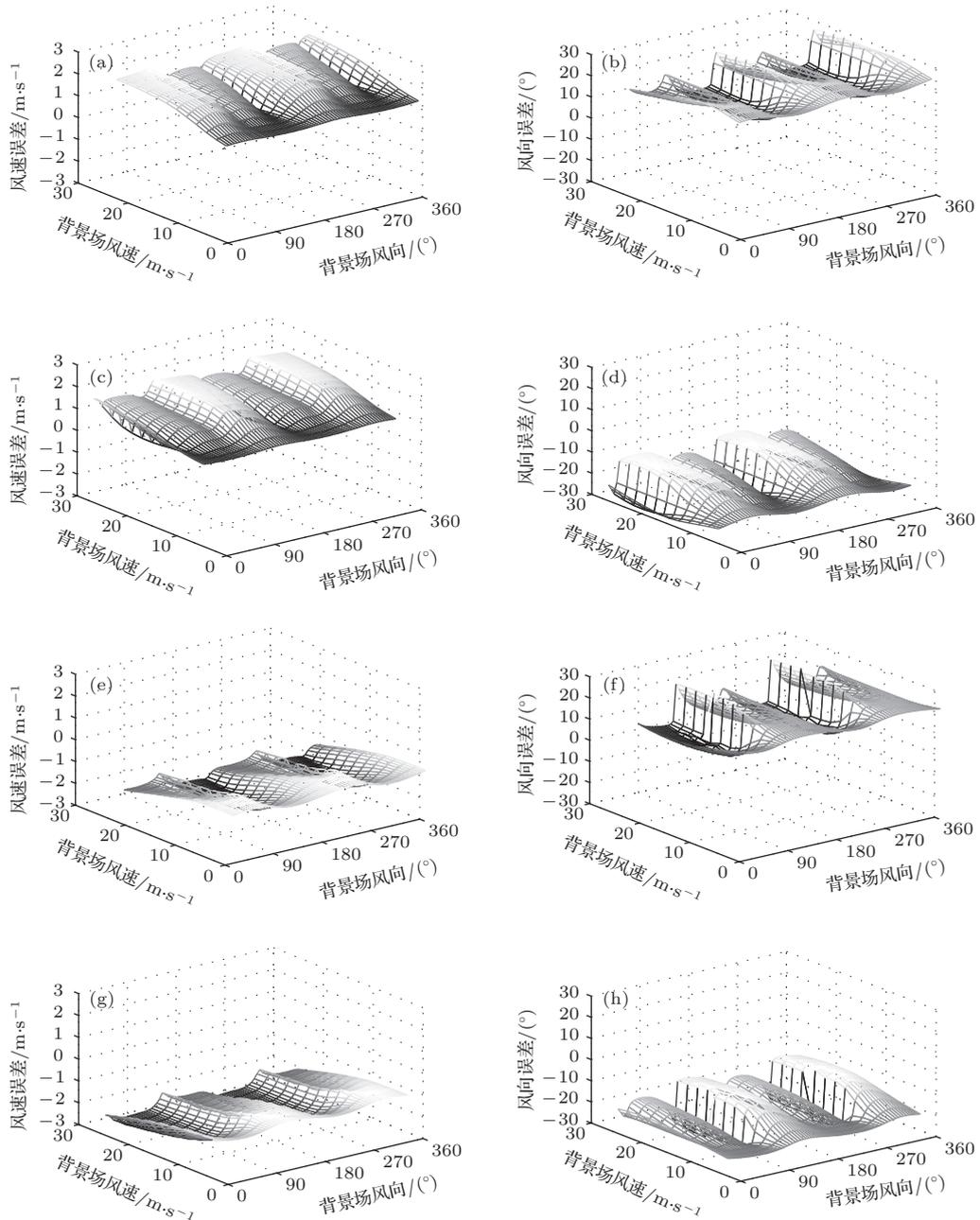


图5 背景场误差为极大值条件下分析场误差分布 (a), (b) 背景场风速风向误差分别为 2 m/s 和 20°; (c), (d) 背景场风速风向误差分别为 2 m/s 和 -20°; (e), (f) 背景场风速风向误差分别为 -2 m/s 和 20°; (g), (h) 背景场风速风向误差分别为 -2 m/s 和 -20°

3.2 背景场误差逐渐变大条件下的分析场误差

上面仅给出了背景场误差为极大值条件下分析场的误差, 下面将讨论背景场误差由小逐渐增大条件下, 分析场的误差情况. 本节背景场风速风向划分方式与上节相同, 每组试验样本量均为 864 对.

分别在背景场风速误差为 0 m/s、背景场风向误差逐渐增大(表 3 中试验 1—3)、背景场风向误差为 0°、背景场风速误差逐渐增大(表 3 中试验

4—6)、背景场风速误差向正方向逐渐增大、背景场风向误差亦向正方向逐渐增大(表 3 中试验 7—9)、背景场风速误差向正方向逐渐增大、背景场风向误差向负方向逐渐增大(表 3 中试验 10—12) 四个条件下, 给出了分析场风速风向的均方根误差、最大误差和最小误差. 在每个条件下的三组试验中, 分析场风速风向的均方根误差均在 1.60 m/s 和 17.15° 以内, 分析场的均方根误差、最大误差和最小误差均随着背景场误差的逐渐增大而增大. 3.1 节中已经给出了背景场误差为极大值条件下分析场

表1 背景场误差为极大值条件下分析场误差分布 (与图4, 图5 相对应)

假定条件 (背景场)		输出结果 (分析场)					
背景场误差		均方根误差		最大误差		最小误差	
风速/m·s ⁻¹	风向/(°)						
0	20	0.26	16.88	0.63	22.88	-0.51	10.84
0	-20	0.26	16.88	0.63	-22.88	-0.51	-10.84
2	0	1.56	3.71	1.97	5.95	0.99	-5.95
-2	0	1.56	3.39	-1.96	5.09	-1.02	-5.09
2	20	1.60	17.14	2.22	26.90	0.83	8.03
2	-20	1.60	17.14	2.22	-26.90	0.83	-8.03
-2	20	1.60	17.15	-2.21	30.66	-0.85	7.03
-2	-20	1.60	17.15	-2.21	-30.66	-0.85	-7.03

表2 分析场误差大于背景场误差占比

假定条件 (背景场)		输出结果 (分析场)	
背景场误差		风速误差大于 2 m/s 的	风向误差大于 20° 的
风速/m·s ⁻¹	风向/(°)	情况占比	情况占比
0	20	0%	8.33%
2	20	21.88%	27.31%

表3 背景场误差逐渐变大时分析场误差分布

假定条件 (背景场)		输出结果 (分析场)					
误差		均方根误差		最大误差		最小误差	
风速/m·s ⁻¹	风向/(°)						
0	5	0.06	4.15	0.10	5.04	-0.10	2.80
0	10	0.13	8.32	0.23	10.25	-0.22	5.58
0	20	0.26	16.88	0.63	22.88	-0.51	10.84
0.5	0	0.38	0.88	0.49	1.40	0.25	-1.40
1	0	0.77	1.81	0.98	2.86	0.50	-2.86
2	0	1.56	3.71	1.97	5.95	0.99	-5.95
0.5	5	0.38	4.26	0.54	5.74	0.22	2.01
1	10	0.78	8.47	1.09	11.85	0.45	4.04
2	20	1.60	17.14	2.22	26.90	0.83	8.03
0.5	-5	0.38	4.26	0.54	-5.74	0.22	-2.01
1	-10	0.78	8.47	1.09	-11.85	0.45	-4.04
2	-20	1.60	17.14	2.22	-26.90	0.83	-8.03

风向均方根误差能够控制 1.60 m/s 和 17.15° 以内, 考虑到分析场误差随背景场误差的增大而增大, 可以说明本文提出的变分模型风速风向均方根误差小于 1.60 m/s 和 17.15°.

3.3 特定背景场条件下两个模型误差的对比

为深入考查变分模型的有效性, 将背景场风速为 3, 8 和 25 m/s 三个条件下, 背景场存在误差导致的分析场误差分布进行计算, 并针对直接反演模型的误差和变分模型的误差进行对比分析, 背景场风向在 0°—360° 范围内等分选取 36 个值 (即每组试验样本量为 36 对).

图 6 给出了背景场风速风向误差分别为 2 m/s 和 0° 条件下分析场误差和直接反演误差随背景场风向的变化. 从图中可见, 由于背景场风向误差

为 0°, 所以直接反演风速误差为 0 m/s, 变分模型综合考虑了背景场风速风向的影响, 分析场风速误差随着背景场风速的增大而增大, 极小值点为 90° 和 180°, 分析场风向误差先变大后减小, 当背景场风向为 90°, 180°, 270° 和 360° 时, 分析场风向误差为 0°.

当背景场风速风向误差分别为 0 m/s 和 20° 条件下分析场误差和直接反演误差随背景场风向的变化如图 7 所示. 由于直接反演模型直接取背景场风向的值, 所以直接反演风向误差为 0°. 直接反演模型和变分模型误差均随着背景场风速误差的增大而逐渐增大, 直接反演模型风速误差明显偏大, 当背景场风速为 25 m/s 时, 直接反演风速误差最大可达 2 m/s, 而变分模型分析场风速误差很小, 分析场风向误差随着背景场风速的增大波动幅度增大.

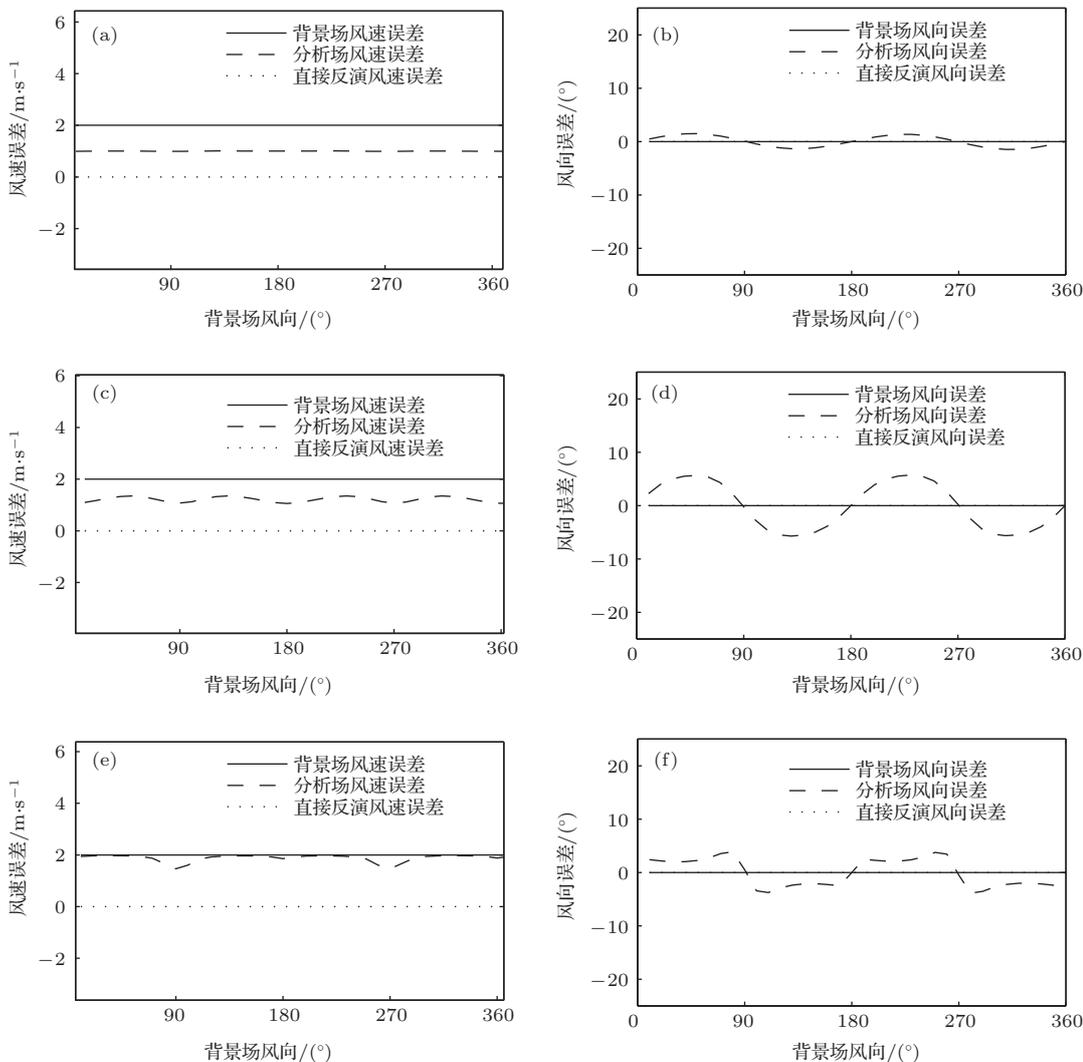


图 6 背景场风速风向误差分别为 2 m/s 和 0° 条件下分析场误差和直接反演误差随背景场风向的变化 (a), (b) 背景场风速为 3 m/s; (c), (d) 背景场风速为 8 m/s; (e), (f) 背景场风速为 25 m/s

当背景场风速风向误差分别为2 m/s和20°条件下,分析场误差和直接反演误差随背景场风向的变化如图8所示.分析场风速误差均在2 m/s以内,背景场风速为25 m/s时,直接反演风速误差最大值达12 m/s,但在背景场风速为3 m/s和8 m/s时,直接反演风速误差小于分析场风速误差,直接反演风向误差均为20°,而分析场风向误差随着背景场风速的增大误差整体变小.

为进一步分析不同背景场条件下分析场误差和直接反演误差情况,给出了表4.从表4可见,每组条件下,分析场和直接反演均方根误差整体上随着背景场风速的增大而增大.当背景场风速风向均没有误差时,分析场和直接反演结果都没有误差.当背景场风速误差为2 m/s时,直接反演结果不受背景场风速误差影响,而分析场均方根误差受背景场风速误差影响,风速误差由1.00 m/s增大到

1.88 m/s,风向误差先增大后减小,但风向误差很小.当背景场风速风向误差分别为0 m/s和20°时,分析场均方根误差均比直接反演均方根误差小,证明变分模型在该条件下更有效.当背景场风速风向误差分别为2 m/s和20°时,直接反演风速均方根误差逐渐增大,风向均方根误差为20°,分析场风速均方根误差逐渐增大,风向误差逐渐减小.从第10—12组试验可见,背景场风速在3—6 m/s之间时,分析场风向误差略大于20°,背景场风速在6—25 m/s之间时,分析场风向均方根误差均低于直接反演风向均方根误差.背景场风速较小时,直接反演风速误差相对较小,分析场风速误差虽然偏大,但误差均在1 m/s左右,当背景场风速较大时,分析场风速误差依旧低于2 m/s,而直接反演均方根误差远远超过2 m/s,即当背景场风速较大时,直接反演模型的风速不可信.

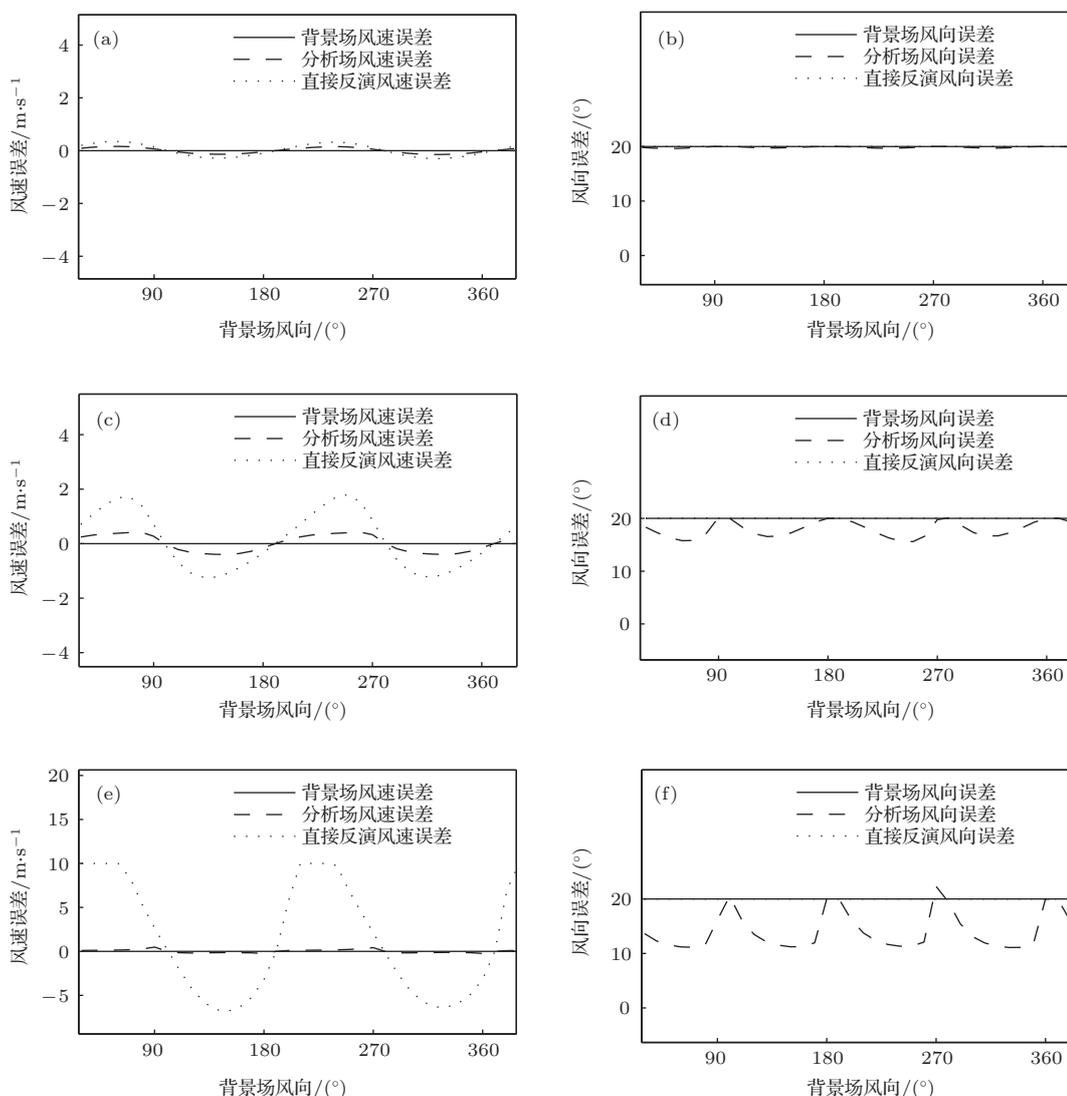


图7 背景场风速风向误差分别为0 m/s和20°条件下分析场误差和直接反演误差随背景场风向的变化 (a), (b) 背景场风速为3 m/s; (c), (d) 背景场风速为8 m/s; (e), (f) 背景场风速为25 m/s

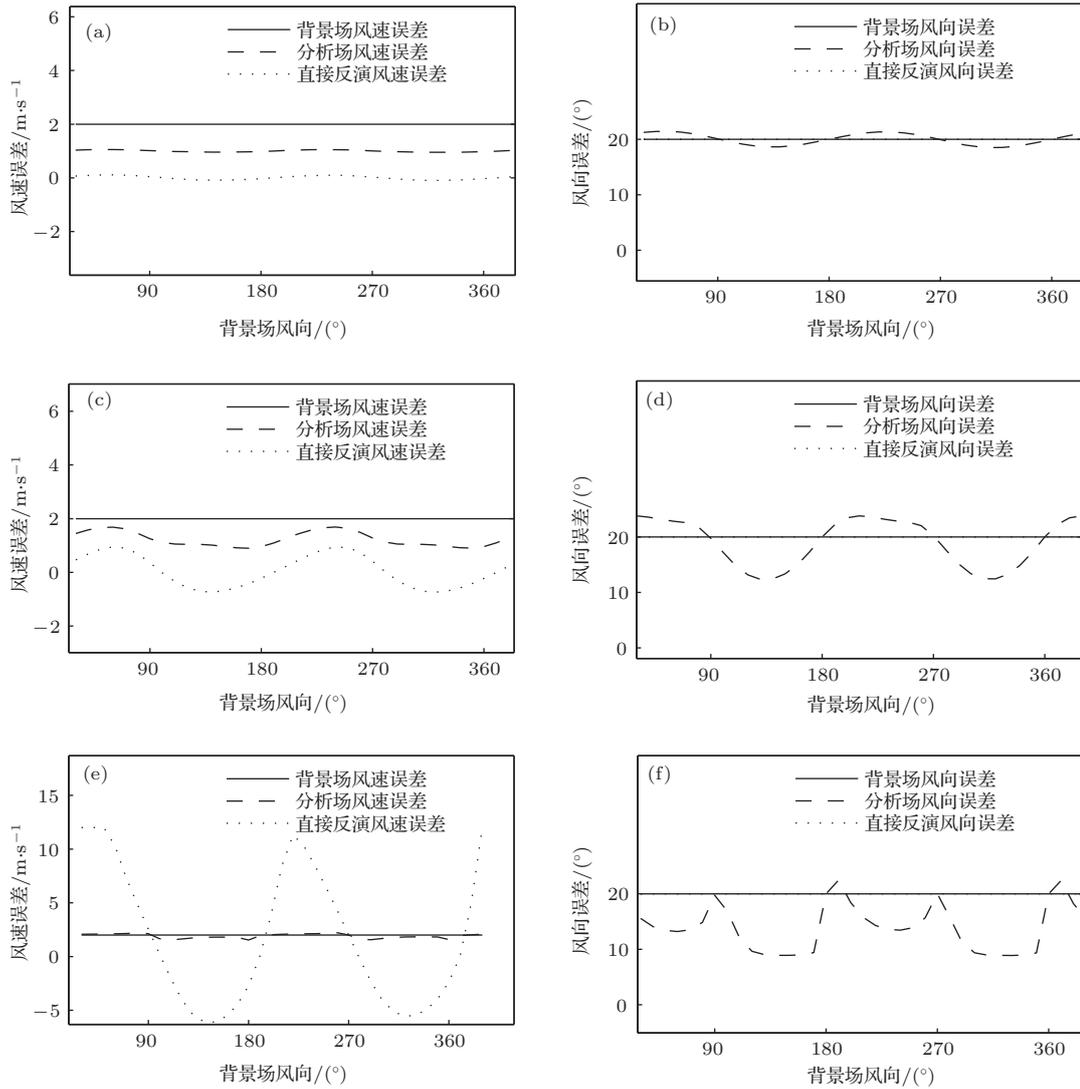


图8 背景场风速风向误差分别为2 m/s和20°条件下分析场误差和直接反演误差随背景场风向的变化 (a), (b) 背景场风速为3 m/s; (c), (d) 背景场风速为8 m/s; (e), (f) 背景场风速为25 m/s

表4 不同背景场条件下分析场误差和直接反演误差

背景场 风速/m·s ⁻¹	假定条件		输出结果			
	背景场误差		分析场均方根误差		直接反演均方根误差	
	风速/m·s ⁻¹	风向/(°)	风速/m·s ⁻¹	风向/(°)	风速/m·s ⁻¹	风向/(°)
3	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0
3	2	0	1.00	1.00	0	0
8	2	0	1.22	4.23	0	0
25	2	0	1.88	2.57	0	0
3	0	20	0.04	19.98	0.07	20.00
8	0	20	0.23	19.11	0.59	20.00
25	0	20	0.21	14.50	6.53	20.00
3	2	20	1.00	20.04	0.07	20.00
5	2	20	1.05	20.02	0.22	20.00
6	2	20	1.10	19.95	0.32	20.00
8	2	20	1.26	19.48	0.59	20.00
13	2	20	1.66	17.05	1.85	20.00
14	2	20	1.70	16.67	2.12	20.00
25	2	20	1.91	14.48	6.53	20.00

4 结 论

合成孔径雷达刈幅窄和海上现场观测资料匮乏两个因素,导致用真实数据检验模型精度存在样本数量不足的问题. 本文利用模拟仿真方法以达到对风速风向进行较为全面的误差分析的目的. 首先讨论了合成孔径雷达反演海面风场变分模型基本原理,然后分析了变分模型的误差,最后对比了变分模型和直接反演模型的异同和误差趋势. 结果表明,直接反演模型反演精度严重依赖背景场风向的精度,随着背景场风速增大,风速反演结果误差大大增加,背景场风速大于 14 m/s 时,直接反演模型的风速均方根误差大于 2 m/s,误差很大;变分模型误差随着背景场误差的增大而增大,当背景场误差为极大值条件下,分析场风速风向误差小于背景场误差,并能控制在 1.60 m/s 和 17.15° 以内. 综上所述,变分模型性能优于直接反演模型,尤其在风速较高的情况下优势更为明显.

参考文献

- [1] Shimada T, Sawada M, Sha W, Kawamura H 2010 *Mon. Wea. Rev.* **138** 3806
- [2] Sheng Z, Fang H 2013 *Chin. Phys. B* **22** 029301
- [3] Sheng Z 2013 *Chin. Phys. B* **22** 029302
- [4] Weissman D E, King D, Thompson T W 1979 *J. Appl. Meteorol.* **18** 1023
- [5] Vachon P W, Dobson F W 1996 *Global Atmos. Ocean Syst.* **5** 177
- [6] Koch W 2004 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **42** 702
- [7] 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]
- [8] Zecchetto S, de Biasio F 2008 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **46** 2983
- [9] He Y J, Perrie W, Zou Q P, Vachon P W 2005 *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **43** 1453
- [10] Portabella M, Stoffelen A, Johannessen J A 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 3086
- [11] Choisnard J, Laroche S 2008 *J. Geophys. Res.* **113** C05006
- [12] Jiang Z H, Huang S X, He R, Zhou C T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 068401 (in Chinese) [姜祝辉, 黄思训, 何然, 周晨腾 2011 物理学报 **60** 068401]
- [13] Hersbach H, Stoffelen A, de Haan S 2007 *J. Geophys. Res.* **112** C03006
- [14] 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]
- [15] Li J, Huang S X 2001 *Sci. China D* **31** 70 (in Chinese) [李俊, 黄思训 2001 中国科学 D 辑 **31** 70]

Analysis on the variational model of synthetic aperture radar sea surface wind retrieval*

Jiang Zhu-Hui[†] Zhou Xiao-Zhong You Xiao-Bao Yi Xin Huang Wei-Quan

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

(Received 2 March 2014; revised manuscript received 31 March 2014)

Abstract

Error analysis is carried out to test the variational model of synthetic aperture radar sea surface wind retrieval. On condition that the background error is maximum, the analysis error is lower than the background error, and with the increase of the background wind direction, the analysis error changes periodically; on condition that the background error gradually increase, the analysis error increases gradually and its deviation direction coincides with the background error deviation direction; under the condition of specific background field, the variational model is compared with the direct inversion model: when the background wind speed is low, the variational model error is slightly high, when the background wind speed is high, the variational model error is significantly low. Generally, the variational model wind speed error is less than 1.60 m/s, and the wind direction error is less than 17.15°, which are better than those of the direct inversion model.

Keywords: synthetic aperture radar, sea surface wind, variational model

PACS: 84.40.Xb, 92.60.Gn

DOI: [10.7498/aps.63.148401](https://doi.org/10.7498/aps.63.148401)

* Project supported by the High Resolution Earth Observation System Major Special Project Youth Innovation Foundation of China (Grant No. GFZX04060103-3-12) and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2010CB951901).

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