

不同增益天线旋转扫描扇形波束散射计的风场反演仿真

林文明^{1,2},董晓龙¹

(1. 中国科学院空间科学与应用研究中心,北京 100190;2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要: 本文介绍了一种星载 Ku 波段旋转扫描扇形波束散射计及其主要系统参数. 该散射计工作在 500km 高度的太阳同步轨道. 通过仿真比较这种散射计在不同增益天线下的风场反演能力,确定刈幅大于 1000km 时天线的双程增益应不小于 51.5dB,距离向 3dB 波束宽度约为 25 度. 最后将反演风场的质量与笔形波束的 SeaWinds 散射计的结果进行对比,得知这种新型的散射计有良好的风场反演能力. 特别地,它能显著改善高风速条件下的风向反演精度.

关键词: 扇形波束; 散射计; 风场反演; 噪声; 品质因素

中图分类号: TP732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 03-0494-06

Wind Retrieval Simulation of a Rotating Range-Gated Fanbeam Scatterometer with Antennas of Different Gain Pattern

LIN Wen-ming^{1,2}, DONG Xiao-long¹

(1. Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A Ku-band rotating, range-gated, fanbeam spaceborne scatterometer and its main parameters are described in this paper. This scatterometer is designed for a polar-orbit satellite with an orbit height of 500km. By simulation, the wind retrieval qualities with different antenna types are compared; and then two important parameters of the antenna, the two-way antenna gain and the half power beam-width in the range direction, are optimized, for an expected swath width of more than 1000km. It is concluded that the two-way antenna gain should be no less than 51.5dB, and -3dB beam width along the range direction (the elevation direction) is about 25degree. The results show that this new kind of scatterometer has better performance in wind retrieval compared with the spaceborne pencil-beam radar scatterometer, such as SeaWinds. Especially, the quality of retrieved wind direction can be improved significantly by this new system, under high wind-speed conditions.

Key words: fanbeam; scatterometer; wind retrieval; noise; Figure-of-Merit (FoM)

1 引言

星载微波散射计可以提供全球、全天候、高精度、高分辨率和短周期的海面风数据. 它的使用始于 1978 年 6 月美国发射的“海洋卫星”(Seasat), 上面装有一台微波散射计(SASS). 通常情况下由 SASS 测量数据反演的风场有四个解, 需要通过另外的模糊解去除算法才能获得可以接受的风场产品. 之后, NASA 在 SASS 的基础上发展了“NASA 散射计”(NSCAT), 并搭载在日本的 ADEOS 系列卫星上. NSCAT 较之 SASS 的不同之处是在左右两侧前后波束方向之间分别加了一个天线, 增加方位方向

上的观测次数, 有助于解决风场反演模糊解的问题. NSCAT 之后 NASA 又研制了 QuikSCAT 测风卫星, 它上面搭载一台名为“海洋风场”(SeaWinds) 的旋转笔形波束微波散射计. 这三种散射计使用的都是 Ku 波段的微波频率. 此外, 欧洲的 ERS-1、ERS-2 卫星以及 METOP 卫星都分别搭载了微波散射计(AMI 和 ASCAT). 所不同的是, 它们使用的是 C 波段(5.3GHz) 的微波频率. 我国海洋二号搭载的散射计与 SeaWinds 类似, 采用旋转笔形波束扫描的方案.

当前星载散射计的发展面临新的挑战^[1]: 首先, 它要能产生高质量的风场数据; 其次, 它要有非常大的刈

幅,能进行短时间内的全球覆盖.结合这些新要求,ESA和KNMI(皇家荷兰气象研究协会)提出并设计了一种新型的微波散射计^[1,2],即旋转扫描扇形波束散射计(RFSCAT:Rotating Fanbeam Scatterometer).RFSCAT的频率为C波段5.3GHz.该频率的电磁信号虽然受大气及雨衰的影响较小,对海浪的敏感度也不如Ku波段的频率,但是采用该频率的系统需要较大的天线,这使得RFSCAT不适合搭载在小卫星平台上.因此,本文设计一种Ku波段(13.4GHz)的旋转扫描扇形波束散射计(Ku-RFSCAT)并仿真其在不同形式天线下的风场反演能力,最终确定合适的天线增益和3dB波束宽度.

2 仿真原理和流程

星载微波散射计通过在不同方位角测量海面同一区域的归一化雷达后向散射系数 σ^0 ,并利用 σ^0 和海面附近风的一个几何模型函数来推导出海面风的速度和方向,从而迅速全面地收集海洋表面的矢量风场.它测风的具体物理流程是^[1-3]:

- (1) 风使海洋表面产生波浪;
- (2) 散射计的天线向海面发射脉冲;
- (3) 后向散射的信号又被散射计所接收;
- (4) 接收的信号被检测处理并由通信链路下载到地面站,即得到0级数据;
- (5) 地面站将接收的数据转换物理单位、定标并进行几何定位,输出1级产品,包含后向散射系数和其它辅助数据;

(6) 1级产品经过2级处理器处理,得到反演的风场;通常反演的风场有1~4个模糊解,需要采用圆中数滤波或其它方法进一步消除模糊解.

根据该原理本文采用的仿真流程如图1所示.正演部分,结合地球物理模型方程(GMF:Geophysical Model Function)、观测几何以及海面风况计算真实的后向散射系数 σ^0 ;散射计测得的后向散射系数 σ_m^0 是受地球物理噪声(geo. noise)和仪器噪声影响(通过 K_p 表征)的结果.采用当前最流行最有效的最大似然估计(MLE:Maximum Likelihood Estimator)算法将 σ_m^0 反演得到测量的海面风速 u_m 、 v_m .最后通过对比测量的风速和真实风速验证反演风场的质量.其中,地球物理模型方程采用同样是Ku波段的NSCAT的GMF;海面风矢量通常分解成两个正交的分量 u 和 v .

2.1 地球物理噪声

地球物理噪声是关于风速的方程^[4],对于 r km \times r km分辨率的风单元,它的表达式如(1)所示:

$$\text{geo. noise} = \begin{cases} 0.000644 \left(\frac{r}{50}\right)^{1/3} (V - 16)^2, & V < 16 \text{ms}^{-1} \\ 0, & V = \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中, V 表示风速.因此,风速越大地球物理噪声越小;对于50km分辨单元, 9ms^{-1} 风速对应的噪声等于3.2%, 16ms^{-1} 以上的风速对应的噪声为0.

2.2 仪器噪声

K_p 是独立采样点和信噪比的函数,也就是后向散射系数 σ^0 、归一化平均信噪比SNR、有效采样点 N^{eff} 以及噪声采样点 N^{noise} 的函数^[1,5]:

$$K_p = \sqrt{\frac{(1 + 1/S_n)^2 + (1/S_n)^2}{N}} \\ = \sqrt{\frac{1}{N^{\text{eff}}} + \left(1 + \frac{1}{\text{SNR}}\right)^2 + \frac{1}{N^{\text{noise}} \left(\frac{1}{\text{SNR}}\right)^2}} \quad (2)$$

其中,噪声采样点是噪声带宽和积分时间的乘积:

$$N^{\text{noise}} = B^{\text{noise}} \cdot \text{rec} \cdot N^{\text{integration}} \quad (3)$$

2.3 最大似然估计(MLE)算法

最大似然估计(MLE)是当前应用最广泛的风场反演算法^[1,6],NSCAT、ERS和SeaWinds都采取这种算法.MLE可用式(4)表示:

$$\text{MLE} = \frac{(\sigma_{\text{measured}}^0 - \sigma_{\text{tried}}^0)^2}{\text{views} \cdot (K_p \cdot \sigma_{\text{measured}}^0)^2} \quad (4)$$

其中, $\sigma_{\text{measured}}^0$ 对应每一个观测视角测量的散射系数; $(K_p \cdot \sigma_{\text{measured}}^0)^2$ 是归一化因子,也就是后向散射系数的方差.算法就是要搜索对应 σ_{tried}^0 的风矢量使得式(4)取最小值.

2.4 反演风场质量验证

采用一个相对客观的定义即品质因素(FoM)评价风场反演质量.通常使用概率的方法评价风场反演的结果的质量,须同时考虑风场解的唯一性与精确性.不同的系统参数和轨道参数反演的风场也必然是不尽相同的,评价的结果也不同,因此可以用FoM作反馈在现实范围内优化系统参数的设计.本文采用KNMI的学者提出的一种计算FoM的算法^[7],如式(5).

$$\text{FoM} = 0.4 \frac{\text{RMS}(u)}{b} + 0.4 \frac{\text{RMS}(v)}{b} + 0.2 \frac{2r_r}{r_1 + r_r} \quad (5)$$

其中, b 是风场各分量期望的标准差,根据数值天气预报的要求50km分辨率时它的值为 1.5ms^{-1} . $\text{RMS}(u)$ 和 $\text{RMS}(v)$ 可以利用式(6)的求解,只是计算时要将观测风矢量 v 和真实风矢量 v_r 分别分解成 u 、 v 分量. $p_o(v)$ 表示当观测风矢量为 v 时,真实风矢量是 v_r 的概率.

$$\text{RMS}(v) = \sqrt{\iint_{\text{rank}} (v - v_r)^2 p_o(v) \text{d}u \text{d}v} \quad (6)$$

假设风矢量模糊解的最大个数为4,那么 r_1 和 r_r 定义如下:

$$r_1 = \prod_{1 \text{ st rank}} p_o(u_1) \cdot p_o(v_1) \quad (7a)$$

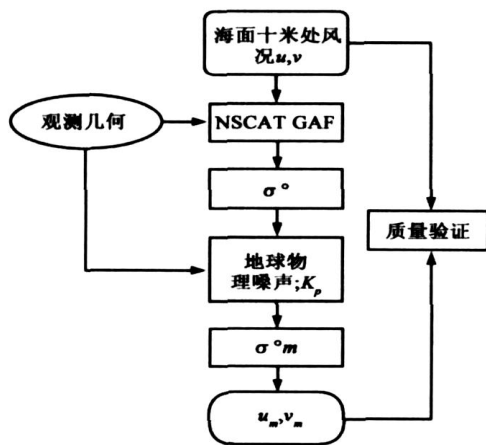


图1 散射计仿真流程

$$r_r = \prod_{j=2}^4 p_o(u_j) \cdot p_o(v_j) \quad (7b)$$

等式右边的概率算子表示已知真实风矢量 v_r , 测量风矢量与真实风矢量的差为 v 的概率.

根据式(5) 风场质量越好 FoM 值越小. 因此, 本文定义 $FoM = 1 - FoM_{(5)}$, 这样 FoM 越大风场质量越好. 此外定义平均 FoM 为刈幅内交轨方向不同分辨单元的 FoM 的平均值.

3 主要系统参数

扇形波束散射计的主要系统参数与数据处理参数如表 1 所示. 系统采用垂直极化和水平极化交替工作的模式.

表 1 旋转扫描扇形波束散射计的主要参数

系统参数	参量	信号处理参数	参量
频率	13.4GHz	大气衰减	0.01dB/km
极化方式	VV, HH	大气厚度	12.5km
刈幅	> 1000km	雨衰减	0.094dB/km
入射角	由刈幅和天线 3dB 波束宽度确定	雨厚度	0km
足迹长度	由天线 3dB 波束宽度确定	脉冲扩展的长度	1.6ms 左右
脉冲带宽	500kHz	接收窗口的时间偏移	3.6ms 左右
脉冲压缩率	1500	两次方位观测的最小时间间隔	0.5 ~ 0.7s
脉冲重复频率	55/ 通道	采样点的空间滤波器	海明窗
天线双程增益	由天线形式确定	空间分辨率	25km/ 50km
- 1.5dB 天线方向宽度	1.3°	地球模型	WGS-84 椭球体
噪声系数	5dB		
仪器内部损耗	1dB		

天线距离向 3dB 波束宽度决定了入射角的范围、足迹长度以及信号处理时接收窗口的长度. 由于天线

连续旋转两周重复覆盖的范围是波束足迹的 $2/3$ ^[1,2], 因此波束宽度也影响天线的旋转速率. 另外, 当天线尺寸确定时天线 3dB 波束宽度与双程增益的大小成正比. 因此需要考察不同形式的天线对系统性能的影响. 表 2 列出本文仿真对比的几种天线, 假设每种天线的增益符合高斯分布并且 3dB 波束宽度每增加 5 度天线最大增益减小 1.5dB.

由于系统要求刈幅不小于 1000km, 因此距离向波束远端的俯仰角要不小于 46.1 度.

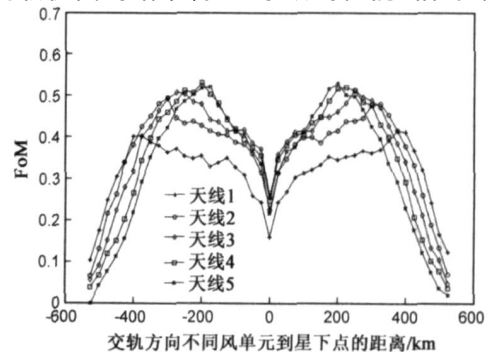
表 2 几种不同形式的天线

天线序号	最大双程增益(dB)	距离向 3dB 波束宽度(度)	波束俯仰角范围(度)	足迹长度(km)	天线旋转速率(rad s ⁻¹)
1	56.0	10	36.1 ~ 46.1	172	0.78
2	54.5	15	31.1 ~ 46.1	238	0.56
3	53.0	20	26.1 ~ 46.1	297	0.45
4	51.5	25	21.1 ~ 46.1	350	0.38
5	50.0	30	16.1 ~ 46.1	376	0.35

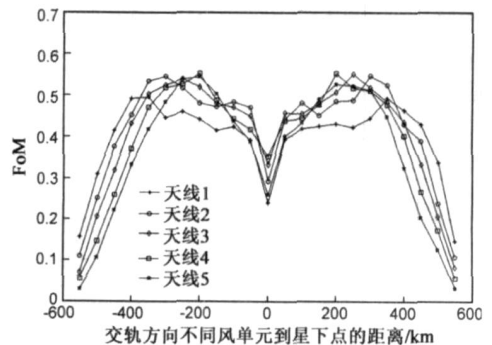
4 仿真结果和验证

雨衰对 Ku 波段电磁波的影响较大也较复杂, 仿真过程暂时不考虑它的影响, 即雨厚度设为 0. 若散射机制不变化, 雨对电磁波的衰减作用等效于接收信号信噪比的降低. 系统配置固定后, 它对雨量和雨厚度的容忍度有待进一步的讨论.

4.1 节和 4.2 节分别采用相对评价和绝对评价的方法分析仿真的结果、验证系统的性能. 相对评价时,



(a) 25 km分辨率, 不同天线不同位置风单元的反演风场对比



(b) 50 km分辨率, 不同天线不同位置风单元的反演风场对比
图2

输入的海面风场为随机分布的风场,随机特征符合全球性的风场统计特性;绝对评价时,输入的海面风场为两种典型的风场,即平行风场和圆形风场^[8].

4.1 反演风场质量的相对比较

仿真输入的海面风场的每一个分量呈高斯随机分布,均值为 0 标准差为 5.5ms^{-1} . 不同条件下反演风场的质量如图 2 所示. 星下点附近的风单元由于观测方位角单一(观测方位与星下点轨迹的夹角为 0 度或 180 度)反演风场的风向模糊严重,风场整体质量较差;刈幅远端的风单元由于观测波束的入射角和方位角信息以及观测次数都比较少,反演风场的质量也很差.

表 2 列出的 5 种天线,反演风场质量最好的风单元离星下点的距离分别是 350km、300km、250km、200km、200km. 天线增益越大,刈幅远端风单元的反演风场越好;天线距离向 3dB 波束宽度越大,刈幅中部及近星下点的风单元反演的风场越好. 但总的来说,刈幅远端风单元的反演风场的质量总是不高.

表 3 考察不同区域的反演风场的平均 FoM,可以看出当天线双程增益受到表 2 第二列限制时,距离向 3dB 波束宽度应该介于 20~25 度之间.

表 3 不同形式的天线反演风场的质量对比

天线序号	刈幅 100km 以内		刈幅 100km 以外 600km 以内		刈幅 600km 以外 800km 以内		刈幅 800km 以外	
	25km 分辨率	50km 分辨率	25km 分辨率	50km 分辨率	25km 分辨率	50km 分辨率	25km 分辨率	50km 分辨率
1	0.2702	0.3734	0.3499	0.4354	0.3950	0.4854	0.2398	0.2398
2	0.3460	0.4340	0.4299	0.4981	0.4328	0.4854	0.2006	0.2006
3	0.3802	0.4332	0.4696	0.5146	0.4044	0.4631	0.1576	0.1576
4	0.3700	0.4191	0.4877	0.5175	0.3653	0.4300	0.1159	0.1159
5	0.3558	0.3834	0.4814	0.5147	0.3145	0.3811	0.0822	0.0822

4.2 反演风场质量的绝对比较

测试风场为平行风场和圆形风场,风力 $4\sim 24\text{ms}^{-1}$ 、风向 $0\sim 360$ 度扫描;并利用圆中数滤波消除反演风场的模糊解. 根据 4.1 节论述,系统天线采用第四种形式,即距离向 3dB 波束宽度 25 度、双程增益 51.5dB. 与 SeaWinds 对比时,两者的空间分辨率均取为 $25\text{km}\times 25\text{km}$. 比较的风场参数包括输出输入风速差绝对值的平均值、均方差以及输出输入风向差绝对值的平均值、均方差. 仿真的海面为赤道附近各自刈幅大小的方形区域.

表 4、表 5 分别给出测试风场为平行风场和圆形风场时的不同风速下的参数对比. 表中的各参数是对风向平均的结果. 由于计算量的限制, Kir-RFSCAT 风向扫描的步长取 10 度, SeaWinds 风向的扫描步长取 15 度. 由 4.1 节可知,刈幅远端(如刈幅 800km 以外)的风单元的反演风场质量总是很差,因此也分区域作比较. 每组上一行表示 Kir-RFSCAT 刈幅 600km 内(风速小于 10ms^{-1})或 800km 内(风速大于等于 10ms^{-1})以及 SeaWinds

刈幅 1500km 内的参数,下一行表示两者刈幅远端的参数.

表 4 平行风场下 Kir-RFSCAT 和 SeaWinds 反演风场比较

测试风速 (ms^{-1})	风速差均值 (ms^{-1})		风速差均方差 (ms^{-1})		风向差均值 (度)		风向差均方差 (度)	
	Kir-RFSCAT	SeaWinds	Kir-RFSCAT	SeaWinds	Kir-RFSCAT	SeaWinds	Kir-RFSCAT	SeaWinds
4	0.155	0.166	0.397	0.440	23.3	22.0	21.9	26.5
4	1.521	0.096	1.390	0.410	57.0	36.1	43.8	31.1
6	0.142	0.140	0.507	0.532	12.9	11.0	15.2	15.6
6	1.318	0.139	1.674	0.491	34.2	29.5	34.1	29.6
8	0.145	0.180	0.573	0.676	7.8	8.3	10.8	12.9
8	1.122	0.218	1.695	0.632	19.8	28.0	25.1	30.2
10	0.216	0.223	0.733	0.841	6.5	8.2	9.3	12.3
10	1.529	0.265	1.912	0.853	21.2	19.8	23.0	20.3
12	0.220	0.269	0.773	1.011	5.7	8.7	7.8	13.1
12	1.419	0.665	1.992	1.290	18.2	33.5	19.6	32.9
14	0.226	0.354	0.815	1.213	5.2	11.0	6.7	16.6
14	1.190	1.131	2.011	1.724	15.9	37.0	17.5	35.3
16	0.240	0.506	0.873	1.471	5.1	18.2	6.1	26.0
16	0.926	1.590	2.021	2.090	14.2	45.6	16.0	43.0
18	0.270	0.597	0.952	1.720	5.0	21.3	5.6	30.0
18	0.740	1.998	1.992	2.491	13.4	52.1	15.1	48.3
20	0.306	0.825	1.056	1.990	5.3	33.3	5.8	39.8
20	0.615	2.198	1.955	2.760	13.2	56.5	14.6	52.3
22	0.355	0.930	1.196	2.201	5.6	43.1	6.1	47.4
22	0.549	2.183	1.992	2.853	13.3	52.7	14.2	46.5
24	0.396	1.041	1.328	2.430	5.8	45.9	6.3	49.7
24	0.501	1.855	2.024	2.970	13.3	51.8	13.9	45.5

表 5 圆形风场下 Kir-RFSCAT 和 SeaWinds 反演风场比较

测试风速 (ms^{-1})	风速差均值 (ms^{-1})		风速差均方差 (ms^{-1})		风向差均值 (度)		风向差均方差 (度)	
	Kir-RFSCAT	SeaWinds	Kir-RFSCAT	SeaWinds	Kir-RFSCAT	SeaWinds	Kir-RFSCAT	SeaWinds
4	0.157	0.167	0.393	0.441	24.8	23.0	25.3	28.1
4	1.523	0.098	1.404	0.420	58.8	28.8	46.9	28.2
6	0.139	0.138	0.491	0.532	12.9	11.0	15.4	15.4
6	1.323	0.085	1.731	0.470	33.0	9.1	34.2	10.9
8	0.149	0.177	0.586	0.680	8.0	8.4	11.1	13.0
8	1.107	0.111	1.801	0.613	19.8	6.7	26.0	8.7
10	0.220	0.222	0.729	0.841	6.7	8.2	9.6	12.0
10	1.546	0.194	2.114	0.880	21.1	8.5	24.1	10.6
12	0.229	0.2717	0.803	1.020	5.9	8.5	8.3	12.0
12	1.409	0.3746	2.164	1.212	18.1	12.1	20.5	14.5
14	0.236	0.342	0.838	1.201	5.4	10.4	7.0	15.7
14	1.189	0.659	2.164	1.580	15.7	17.5	18.1	21.7
16	0.252	0.484	0.904	1.502	5.3	15.2	6.4	23.7
16	0.938	1.455	2.121	2.240	14.1	36.0	16.2	40.4
18	0.287	0.597	0.977	1.761	5.2	18.2	6.1	26.3
18	0.757	1.664	2.080	2.450	13.4	34.5	15.1	35.7
20	0.321	0.806	1.089	2.062	5.5	28.2	6.3	37.0
20	0.621	2.232	2.007	2.773	13.1	46.9	14.3	40.9
22	0.363	0.975	1.217	2.310	5.7	35.5	6.5	42.2
22	0.549	2.337	2.031	3.080	13.2	49.7	14.1	43.8
24	0.412	1.055	1.372	2.521	6.0	38.6	6.9	45.2
24	0.503	2.079	2.073	3.140	13.1	43.9	13.5	39.3

平行风场条件下更直观的比较如图 3 所示. 图中黑色柱状条表示 Kir-RFSCAT 的性能指标,浅色柱状条表示 SeaWinds 的性能指标,柱状条越短表示系统的性能越好. 图 3(a) 对应表 4 中刈幅中部和近星下点的对比,

图3(b)对应表4中刈幅远端的对比. 每张图片的横坐标表示仿真输入的风速, 纵坐标分别是反演后的风速误差均值、风速误差均方差、风向误差均值和风向误差均方差.

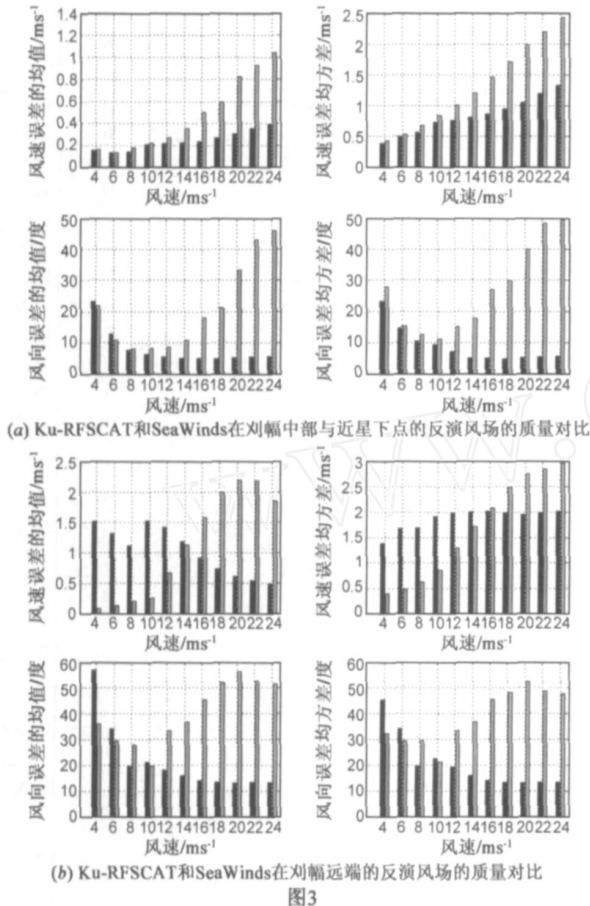


图3

表5的直观图示与表4相似, 不再累述.

对比表4、表5可以得出如下结论:

(1) Ku-RFSCAT对平行风场和圆形风场的反演能力大致相同;

(2) 当风速小于 10ms^{-1} 时, Ku-RFSCAT 刈幅 600km 内风单元的反演风场质量与 SeaWinds 刈幅 1500km 内风单元的反演风场质量相当;

(3) 当风速大于等于 10ms^{-1} 时, Ku-RFSCAT 刈幅 800km 内风单元的反演风场质量比 SeaWinds 刈幅 1500km 内风单元的反演风场质量要好, 尤其是风向的反演质量;

(4) 当风速大于 12ms^{-1} (平行风场) 或 14ms^{-1} (圆形风场) 时, Ku-RFSCAT 刈幅远端风单元的风向反演比 SeaWinds 刈幅远端的风单元的风向反演要好; 当风速大于 16ms^{-1} 时, Ku-RFSCAT 刈幅远端风单元的风场反演质量比 SeaWinds 刈幅远端的风单元的风场反演质量要好.

5 总结

本文对星载 Ku 波段旋转扫描扇形波束散射计进

行了系统参数设计和仿真, 比较了不同天线形式下的系统性能. 最后确定一种距离向 3dB 波束宽度为 25 度、最大双程增益为 51.5dB 的天线作为与 SeaWinds 对比的 Ku-RFSCAT 系统的天线. 通过与 SeaWinds 进行反演风场质量的绝对比较, 得知在一定刈幅内本文仿真的 Ku-RFSCAT 系统在低风速下的反演风场质量与 SeaWinds 相当; 高风速下的反演风场质量比 SeaWinds 要好. 总的来说, Ku-RFSCAT 在风向反演精度上比 SeaWinds 有显著的优势.

实际上, 由于本课题小卫星平台的尺寸限制, Ku-RFSCAT 的天线长度不能超过 1 米. 上述仿真过程中, 作者考虑到天线的形式, 最大限度地利用双程增益所能达到的值. 另一方面, 如果小卫星只有 Ku-RFSCAT 一台有效载荷, 那么发射功率可以再提高约 3dB. 倘若能够突破卫星平台的限制, 那么可以预见, 进一步增大天线尺寸、提高天线的增益或提高发射脉冲功率都将改善系统的性能.

致谢 感谢 J de Kloe 博士、Chung-Chi Lin 教授和审稿专家给本文提出宝贵意见.

参考文献:

- [1] C C Lin, A Stoffelen, J de Kloe, et al. Wind retrieval capability of rotating, range-gated, fanbeam spaceborne scatterometer [A]. B L Joan. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites VI[C]. Washington: SPIE, 2003. 268 - 279.
- [2] C C Lin, B Rommen, J J W Wilson, et al. An analysis of a rotating, range-gated, fanbeam spaceborne scatterometer concept [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(05): 2114 - 2121.
- [3] 王新中, 姜景山. 旋转扫描散射计海面风场检测仿真研究 [J]. 遥感学报, 1997, 1(3): 185 - 191.
WANG Xin-zhong, JIANG Jing-shan. Study of ocean surface wind field detection of scan-scatterometer [J]. Journal of Remote Sensing, 1997, 1(3): 185 - 191. (in Chinese)
- [4] J de Kloe. Optimisation of rotating, range-gated, fanbeam scatterometer for wind retrieval: task 2a report, GMF and wind field definition, and wind retrieval [Z/OL]. <http://www.knmi.nl/scatterometer/rfscat/>, 2007 - 09 - 19/ 2008 - 05 - 01.
- [5] [美] 乌拉比 F T, 穆尔 R K. 微波遥感第二卷, 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1988. 5 - 26.
- [6] 解学通, 方域, 陈晓翔, 等. 基于最大似然估计的海面风场反演算法研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 30 - 33.
XIE Xue-tong, Fang Yu, CHEN Xiaoxiang, et al. Research on numerical wind vector retrieval algorithm based on maximum likelihood estimation [J]. Geography and Geoinformation Sci-

ence, 2005, 21(1): 30 - 33.

- [7] J de Kloe, A Stoffelen. Optimisation of rotating, range-gated, fanbeam scatterometer for wind retrieval: task 3a report, FoM definition and validation[Z/OL]. <http://www.knmi.nl/scatterometer/rfscat/>, 2007 - 09 - 19/2008 - 05 - 01.
- [8] 李燕初, 孙瀛, 林明森, 等. 用圆中数滤波器排除卫星散射计风场反演中的风向模糊[J]. 台湾海峡, 1999, 18(1): 42 - 48.
LI Yan-chu, SUN Ying, LIN Ming-sen, et al. Resolving directional ambiguities for scatterometer derived winds by a circular median filter algorithm[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 1999, 18(1): 42 - 48. (in Chinese)
- [9] 刘良明. 卫星海洋遥感导论[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005. 163 - 168.
- [10] G L David, et al. Current progress in K_u band model functions [R]. Washington: NASA, 1996. 14 - 20.

作者简介:



林文明 男, 1984年4月出生于福建省仙游县. 现为中国科学院空间科学与应用研究中心、中国科学院研究生院博士研究生, 主要研究方向为星载雷达散射计信号处理及微波遥感技术.

E-mail: linwenzi1984@163.com

董晓龙 男, 1969年9月生. 工学博士, 中国科学院空间科学与应用研究中心研究员、博士生导师. 主要研究方向: 微波遥感理论, 微波传感器系统研究、设计与研制, 微波传感器定标理论、技术与方法, 电磁理论及其应用, 信号分析与处理等.

E-mail: dxl@nmrs.ac.cn

www.cnki.net