

## 2 $\mu\text{m}$ 星载相干测风激光雷达风速 及风向误差建模与分析

步志超<sup>1,2</sup>, 陈思颖<sup>1\*</sup>, 张寅超<sup>1</sup>, 陈和<sup>1</sup>, 郭磐<sup>1</sup>, 葛宪莹<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081;

2. 中国气象局气象探测中心 气象装备保障室, 北京 100081)

**摘要:** 基于全微分和统计理论推导了星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向误差的解析表达式, 利用克拉默-拉奥误差下界代替 Frehlich 经验公式对风场的随机风速误差进行评估, 建立了通用型的星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向误差计算模型. 在 NASA/NOAA 提出的星载测风激光雷达系统设计指标框架下, 对风速及风向误差模型进行可行性分析, 得到了总的径向随机误差随着探测距离的变化关系及水平风速区间的选取对随机误差的影响. 同时, 为了计算合成采样误差, 改变不同的垂直分辨率和方向角取值, 对水平分量的采样误差进行对比分析. 仿真结果表明, 合成的水平风速和风向的误差范围为 0.8 ~ 3.2 m/s 和 2.38° ~ 3.49°, 基本符合星载测风激光雷达的相关指标要求.

**关键词:** 星载相干测风激光雷达; 风速误差; 风向误差; 克拉默-拉奥误差下界

**中图分类号:** TN958.98 **文献标识码:** A

## Error modeling and analysis on wind speed and direction for 2 $\mu\text{m}$ space based coherent Doppler LIDAR

BU Zhi-Chao<sup>1,2</sup>, CHEN SI-Ying<sup>1\*</sup>, ZHANG Yin-Chao<sup>1</sup>, CHEN He<sup>1</sup>, GUO Pan<sup>1</sup>, GE Xian-Ying<sup>1</sup>

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Meteorological Facilities and Logistic Division, Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Based on the total differential and statistical theory, the analytical expressions of the synthesis horizontal wind speed and direction error are derived. Using Cramer - Rao lower bound instead of Frehlich's empirical formula, the random wind errors are evaluated, and then a universal horizontal wind speed and direction error calculation modeling is established. Based on the design framework proposed by NASA / NOAA, a combination of simulation parameters is selected for the feasibility analysis of the error modeling. The Changing relation of the total radial random error and the detect range and the horizontal wind range is drawn. Meanwhile, in order to calculate the sampling error, a combination of vertical resolutions and orientation angles is chosen for comparative analysis. The results show that by using this mode the synthesis horizontal wind speed and direction errors are in the range of 0.8 ~ 3.2 m / s and 2.38 ° ~ 3.49 ° respectively, basically in line with relevant requirement indicators.

**Key words:** space based coherent Doppler lidar, wind speed error, wind direction error, Cramer-Rao lower bound

**PACS:** 42.79.Qx, 06.30.Gv, 06.20.Dk

### 引言

星载测风激光雷达是目前唯一能够精确获得全球风廓线的设备, 能够为气象学、大气科学的研究、

数值天气预报的改进、军事环境的精确性预报提供精确的全球大气风场数据, 具有极大的研究价值和科研前景, 由于仪器自身的精度和测量风速结果的准确性要求, 目前尚未有在轨运行的星载测风激光

收稿日期: 2013 - 08 - 16, 修回日期: 2014 - 10 - 09

基金项目: 国家自然科学基金(61178072)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(61178072)

作者简介 (Biography): 步志超 (1985-), 女, 山东济宁人, 博士, 主要从事相干测风激光雷达和多普勒天气雷达的仿真及数据处理工作. E-mail: buzichao@163.com

\* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: cys@bit.edu.cn

Received date: 2013 - 08 - 16, revised date: 2014 - 10 - 09

雷达设备<sup>[14]</sup>.

风速和风向精度是评价星载测风激光雷达性能的重要指标.若在卫星轨道高度、百公里范围的采样体积内获得高精度、高准确度的水平风廓线,必须对系统结构进行优化设计,而其评价标准的建立首先需要给出星载水平风速和风向的相关误差表示方法.目前的文献只是对星载测风激光雷达两个水平风速分量的误差进行分析和计算<sup>[5-10]</sup>,尚未有文献针对设备的最终有效输出量,即合成水平风速和风向误差,进行相关研究.此外 Frehlich 的经验公式方法<sup>[10]</sup>计算水平风速误差不具有移植性,仅适用于文献中已给出的激光雷达系统参数,无法满足需要对系统参数进行动态调整的情况.

本文采用全微分和统计理论得到合成水平风速和风向误差的表达式,并利用克拉默-拉奥误差下界(Cramer-Rao lower bound, 简记为 CRLB<sup>[11-15]</sup>)代替 Frehlich 的经验公式对风场的随机风速误差进行评估,建立通用型的星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向的误差表示方法与计算模型,并应用此模型,针对一组系统仿真参数,计算了合成水平风速和风向误差的变化情况,该结果可以为星载相干测风激光雷达系统的结构优化评估及研制提供重要的科学参考.

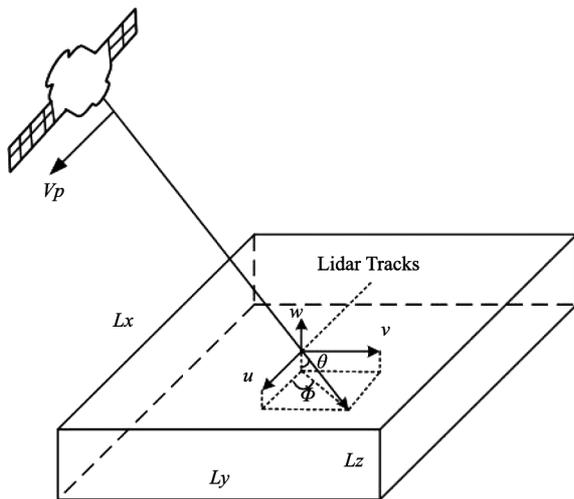


图1 星载相干测风激光雷达的径向风速探测示意图

Fig.1 Diagram of the radial wind detection of space based coherent LIDAR

## 1 星载相干测风激光雷达水平风速误差理论

星载相干测风激光雷达最具鲁棒性的工作方式是前后轨道几何重合的方式探测水平风廓线(假定

垂直风速为0),通过探测不同时刻两个相互独立的径向风速( $V_{for}$ 、 $V_{aft}$ )就可以反演得到A处的两个独立的水平风速分量( $u, v$ )<sup>[9]</sup>.图1给出了星载相干测风激光雷达的径向风速探测示意图,图中以 $Lx$ 、 $Ly$ 、 $Lz$ 为边的立方体构成了风速的采样体积, $u$ 是沿轨道前进的方向的水平风速分量, $v$ 是垂直于轨道前进方向的水平风速分量, $w$ 为垂直风速分量, $\theta$ 为天底角、 $\phi$ 为方向角.

根据星载相干测风激光雷达水平风速误差的定义,可以将水平风速分量的方差表示为<sup>[9]</sup>

$$\sum_u^2 = \delta_u^2 + \sigma_u^2 \quad (1)$$

$$\sum_v^2 = \delta_v^2 + \sigma_v^2 \quad (2)$$

式中 $\delta_u$ 、 $\delta_v$ 是沿轨道方向、垂直轨道的采样误差,是由星载探测体积内风速的随机变化造成的; $\sigma_u^2$ 、 $\sigma_v^2$ 分别是沿轨道方向、垂直轨道的随机误差 $e_u$ 、 $e_v$ 的方差.

对于星载相干测风激光雷达,一般情况下,满足前后向的天底角相等、方向角互补<sup>[9]</sup>,那么

$$\sigma_u^2 = \frac{\sigma_e^2}{2\cos^2\phi\sin^2\theta} \quad (3)$$

$$\sigma_v^2 = \frac{\sigma_e^2}{2\sin^2\phi\sin^2\theta} \quad (4)$$

式中 $\sigma_e^2$ 是径向风速的随机误差的方差.

由式(1)~(4)可知,星载相干测风激光雷达的水平风速误差主要包含水平采样误差和水平随机误差两部分,其中水平随机误差可由径向风速的随机误差计算得到.

## 2 星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向误差建模

### 2.1 合成水平风速和风向误差计算

水平风速分量的误差会导致合成水平风速和风向偏离真实的值,存在一定的误差,如图2所示.选取方向角为通用数值 $45^\circ$ ,水平风速( $u, v$ )的合成水平风速满足 $V_h = \sqrt{u^2 + v^2}$ ,对两边同时取全微分并进行统计平均,可得合成水平风速误差为

$$\begin{aligned} \langle (\Delta V_h)^2 \rangle &= \frac{1}{u^2 + v^2} (u^2 (\langle e_u^2 \rangle + \langle \delta_u^2 \rangle) \\ &\quad + v^2 (\langle e_v^2 \rangle + \langle \delta_v^2 \rangle)) \\ &\geq \frac{\sigma_e^2}{\sin^2\theta} + \min(\langle \delta_u^2 \rangle, \langle \delta_v^2 \rangle) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)可知,合成水平风速中的随机误差是

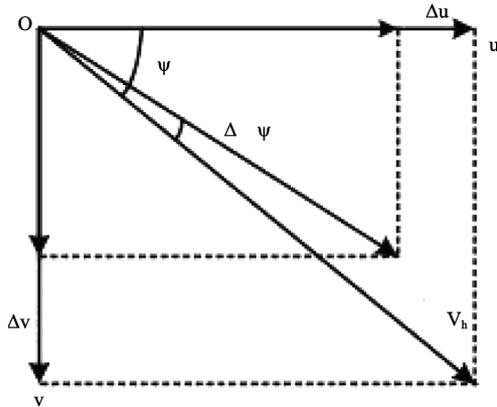


图2 合成水平风速和风向示意图  
Fig. 2 Diagram of synthesis horizontal wind speed and direction

水平风速  $u$  (或  $v$ ) 对应径向风速的随机误差, 而合成水平风速的采样误差是两个水平风速分量采样误差的最小值. 因此, 总的合成水平风速误差与所有水平风速误差项叠加并不相同.

同理可知, 合成风向满足  $\psi = \arctan \frac{u}{v}$ , 对等式两边取全微分并计算统计方差, 可得风向的误差为

$$\begin{aligned} \langle (\Delta\psi)^2 \rangle &= \left\langle \left( \frac{v e_u - u e_v}{v^2 + u^2} \right)^2 \right\rangle + \left\langle \left( \frac{v \delta_u - u \delta_v}{v^2 + u^2} \right)^2 \right\rangle \\ &= \left( \frac{1}{v^2 + u^2} \right)^2 (v^2 \langle e_u^2 \rangle + u^2 \langle e_v^2 \rangle) + \left( \frac{1}{v^2 + u^2} \right)^2 (v^2 \langle \delta_u^2 \rangle + u^2 \langle \delta_v^2 \rangle) \\ &\geq \frac{\langle e_u^2 \rangle}{v^2 + u^2} + \frac{\min(\langle \delta_u^2 \rangle, \langle \delta_v^2 \rangle)}{v^2 + u^2} \end{aligned} \quad (6)$$

对比式(5)、(6)可知, 合成水平风速误差和风向误差遵循相似的误差统计规律. 为了完成合成水平风速误差和风向误差的建模研究, 还需要给出径向风速随机误差和采样误差的计算方法.

## 2.2 径向风速随机误差计算

Frehlich 通过统计的方法给出了随机误差  $g$  的经验表达式<sup>[10]</sup>, 但经验公式方法仅针对已给出的系统参数, 不具有通用性. 对于相干测风激光雷达系统, 任何无偏评估得到的风速误差都不会低于 CRLB 误差下界<sup>[11-14]</sup>, CRLB 误差下界是所有评估方法获得随机误差的下界, 具有很好的可移植性, 本文将采用 CRLB 误差下界对随机误差  $g$  进行评估.

CRLB 误差下界对应的随机误差  $g$  可表示为<sup>[11]</sup>

$$g^2 \geq \left( \frac{\lambda}{2} \right)^2 \frac{2\delta v^2}{M} \left( \frac{1}{\text{SNR}_n} + \frac{1}{\text{SNR}_n^2} \right) + \left( \frac{\lambda}{2} \right)^2 \frac{w_{\text{eff}}^2}{2M} \quad (7)$$

式中  $\lambda$  是激光器的波长;  $\delta v$  是由发射激光束的线宽造成的频率不确定度;  $\text{SNR}_n$  是窄带信噪比<sup>[11]</sup>;  $w_{\text{eff}}$  是探测体积内风速变化造成的频谱展宽;  $M$  为独立脉冲累加个数.

通过设置随机误差的阈值  $b$ , 可进一步得到总的径向随机误差<sup>[9]</sup>

$$\sigma_e^2 = b v_{\text{search}}^2 / 12 + (1 - b) g^2 \quad (8)$$

式中  $v_{\text{search}}$  是径向风速探测范围.

由式(7)、(8)可知, 影响风速随机误差的系统参数很多, 如激光器的波长、脉宽、脉冲累加个数、信噪比等等. 因此, 可以通过对系统参数的优化选取, 达到减少风速随机误差的目的.

## 2.3 采样误差计算

采样误差主要是由于探测体积内风速的随机变化引起的. 假定探测体积内的随机湍流风速符合 kolmogorov 谱分布<sup>[16]</sup>, 如图 1 所示, 对于探测体积  $L_x = L_y = L$  的情况下, 采样误差可以写为<sup>[9]</sup>

$$\delta_u = 0.350945 (\varepsilon L)^{1/3} \quad (9)$$

$$\delta_v^2 = \delta_{v0}^2 + \delta_w^2 \quad (10)$$

$$\delta_{v0} = 0.21104 (\varepsilon L)^{1/3} \quad (11)$$

$$\delta_w = 0.884195 \frac{\cos\theta}{\sin\phi \sin\theta} (\varepsilon L)^{1/3} \left( \frac{L_{0w}}{L} \right)^{5/6} \quad (12)$$

式中  $\delta_{v0}$  是  $v$  方向的采样误差,  $\delta_w$  是竖直  $w$  方向的采样误差,  $\varepsilon$  为湍流能量耗散率.

至此如式(5)~(12)所示, 我们建立了通用型的星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向的误差表示方法与计算模型. 应用此模型, 我们既可以通过对系统参数进行优化, 得到满足合成水平风速和风向误差指标要求的星载相干激光雷达系统; 也可以由给定的系统参数指标, 对其合成水平风速和风向的误差分布情况进行计算.

## 3 星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向误差模型的应用分析

为了对合成水平风速和风向的建模进行可行性验证, 参考 2008 年 NASA/NOAA 提出的系统设计指标并结合 HDWL 多普勒激光雷达的系统参数, 针对 2 $\mu\text{m}$  的激光波长, 选取了一组星载相干测风激光雷达系统仿真参数(见表 1)进行应用计算分析.

### 3.1 径向随机误差的计算

利用表 1 中的系统参数结合式(7)可以得到系统的信噪比和随机风速误差  $g$  随距离的变化曲线, 如图 3 所示.

表 1 星载相干测风激光雷达系统仿真参数  
Table 1 Simulation parameters of space based coherent LIDAR

参数类型	数值
轨道高度	400 km
探测距离	从地面起 0 ~ 6 km
天底角	45°
发射激光波长	2 μm
发射激光能量	300 mJ
重复频率	10 Hz
脉宽	400 ns
本征激光功率	1 mW
望远镜孔径	500 mm
累加脉冲个数	60
系统效率	0.058
水平风速范围	-75 ~ 75 m/s
水平分辨率	100 km
垂直分辨率	0.5 ~ 2.5 km

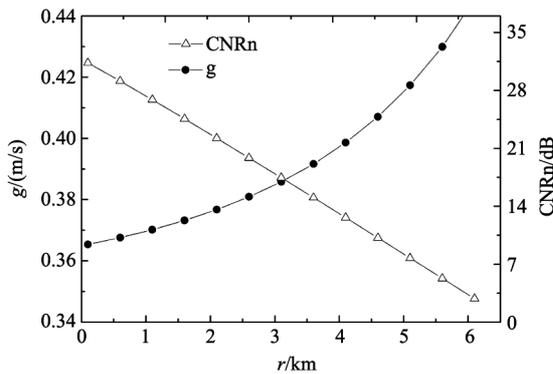


图 3 信噪比和随机风速误差 g 随距离的变化曲线  
Fig. 3 Curves of the signal to noise and random error with range

从图 3 可以看出,信噪比随着距离的增加而逐渐减少,而随机风速误差 g 随着距离的增加而增大,在探测距离范围内,随机风速误差 g 的数值分布在 0.3 ~ 0.5 m/s 之间.

选取随机廓线 b 的阈值为 0.05,水平风速范围为 15 ~ 75 m/s,每 10 m/s 作为一个风速区间,将计算得到的随机误差 g 代入式(8),可以得到总的径向随机误差随着探测距离和水平风速区间的变化曲线.

由图 4 可知,总的径向随机风速误差随着水平风速取值的增大而增大,且增速较快,误差数值分布在 0.5 ~ 2.3 m/s. 对于每个水平风速区间,由于随机误差 g 的存在,总的径向随机风速误差也会随距离线性增加,但增速较慢.

### 3.2 采样误差的计算

由式(5)、(6)可知,合成水平风速和风向误差

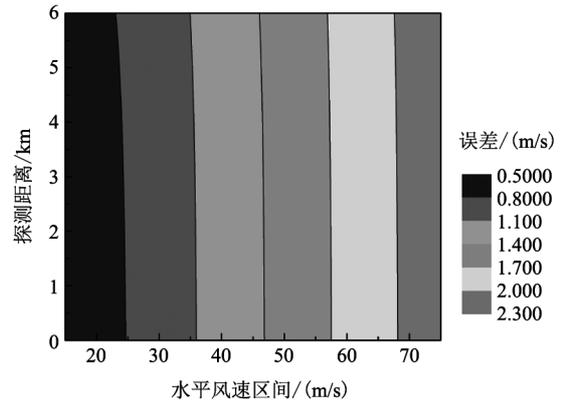


图 4 总的径向随机误差随着探测距离和水平风速区间的变化曲线  
Fig. 4 Curves of the total radial random error with detect range and the horizontal wind range

中的采样误差是取两个水平分量采样误差的最小值,那么首先需要对两个水平采样误差的数值大小进行比较.垂直风速采样误差同时与湍流能量耗散率、垂直分辨率、方向角有关,本文选取湍流参数为  $(\epsilon L)^{1/3} = 1 \sim 3 \text{ m/s}^{[9]}$ ,垂直分辨率范围为 0.5 ~ 2.5 km,方向角为  $10^\circ \sim 90^\circ$ ,分别做出采样误差随着垂直分辨率和方向角的变化曲线,如图 5、图 6 所示.

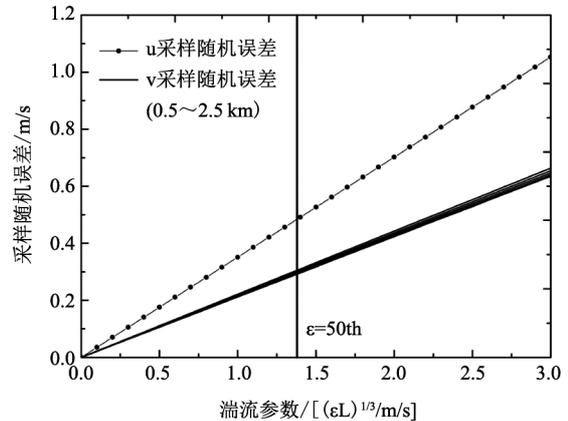


图 5 采样误差随着湍流参数和垂直分辨率的变化曲线  
Fig. 5 Curves of sampling error with turbulence parameter and vertical resolutions

从图 5、6 可以看出,相比垂直分辨率,方向角对 v 方向采样误差的影响会相对大一些,当选取  $L_{0w} = 0.5 \sim 2 \text{ km}, \varphi = 10^\circ \sim 90^\circ$ ,u 方向的采样误差始终大于 v 方向的风速误差,因此,v 方向的采样误差即为合成水平风速的采样误差.

### 3.3 合成水平风速和风向的分析与计算

将径向随机误差和 v 方向的采样误差代入合成

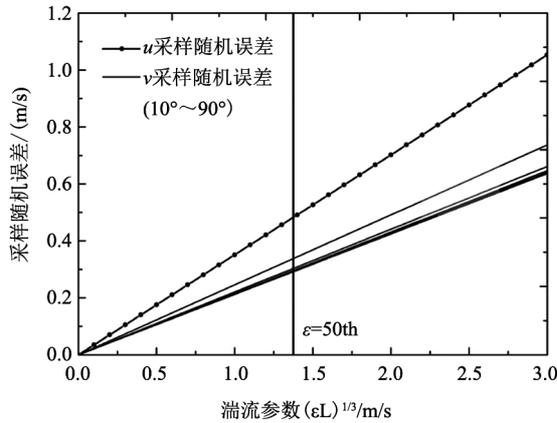


图 6 采样误差随着湍流参数和方向角的变化曲线  
Fig. 6 Curves of sampling error with turbulence parameter and vertical resolutions

水平风速误差公式(5)及风向误差公式(6),可得到合成水平风速误差和风向误差随着距离和水平风速区间的变化曲线,见图 7、图 8。

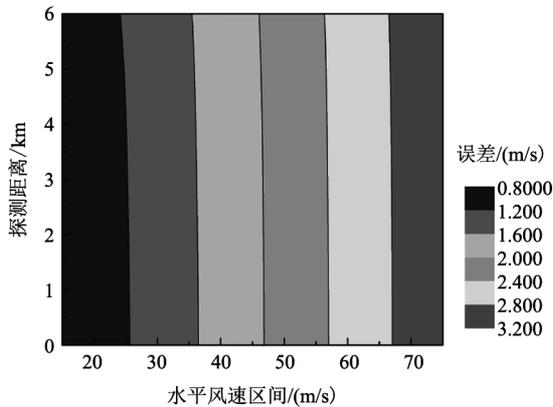


图 7 合成风速误差随着距离和水平风速区间的变化曲线  
Fig. 7 Curves of synthesis wind speed error with range and horizontal wind speed interval

从图 5、图 7 可以看出,合成水平风速误差与径向随机风速误差有着相似的分布规律,随着水平区间的增大而增大,合成水平风速的误差取值在 0.8 ~ 3.2 m/s 之间,同时可知随机风速误差是合成水平误差的主要来源,占约 60 ~ 80%。从图 8 中可以看出,水平区间选取 15 ~ 75m/s 对应的风向误差内范围为 2.38° ~ 3.49°,风向误差在低风速区间数值比较大,随着水平风速的增加而迅速降低。根据世界气象组织(World Meteorological Organization; 简记为 WMO),NASA/NOAA 对星载多普勒激光雷达的水平风速精度要求<sup>[17-19]</sup>,该仿真结果基本符合星载测

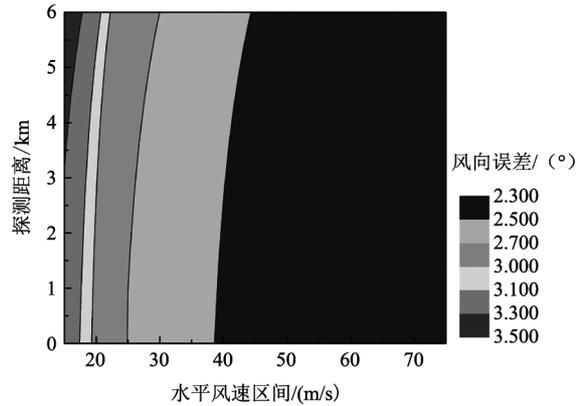


图 8 合成风向误差随着距离和水平风速区间的变化曲线  
Fig. 8 Curves of synthesis wind direction error with range and horizontal wind speed interval

风激光雷达的相关指标要求。

### 3.4 相对误差分析

对全微分统计方法得到的合成水平风速和风向的结果与直接误差项累加方法的计算结果进行对比,引入相对误差函数

$$Err = [ \langle (\Delta V'_h / \Delta V_h - 1)^2 \rangle ]^{1/2} \times 100\% \tag{13}$$

$$\langle (\Delta V'_h)^2 \rangle = 2\sigma_e^2 + \langle \delta_u^2 \rangle + \langle \delta_v^2 \rangle \tag{14}$$

由式(5)、(6)、(13)、(14)知,风向相对误差函数与风速相对误差函数的计算结果相同,根据表 1 的参数,可以计算得到相对误差函数随距离和水平风速区间的三维变化曲线。如图 9 所示。

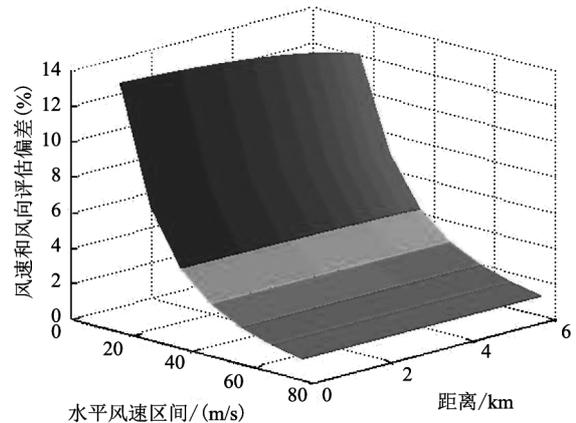


图 9 相对误差函数随距离和水平风速区间的三维变化曲线  
Fig. 9 Curves of relative error function with range and horizontal wind speed interval

从图 9 中可以看出,使用直接累加算法得到的

合成水平风速和风向的相对误差在 0.1% ~ 13.8% 之间,是对真实误差的过估计,且探测风速区间越小,相对误差越大。

#### 4 结论

开展星载相干测风激光雷达合成水平风速和风向误差方面的研究,首次基于全微分和统计理论推导了合成水平风速和风向误差的表达式,并指出合成水平风速中的随机误差是水平风速  $u$  (或  $v$ ) 对应径向风速的随机误差,合成水平风速的采样误差取两个水平风速分量采样误差的最小值,同时风向误差也有相似的结论,这奠定了合成风廓线计算的理论基础。其后,采用 CRLB 误差下界代替 Frehlich 经验公式对随机风速误差进行评估,基于经典湍流 Kolmogorov 谱分布模型计算采样误差,建立了通用型的星载相干测风激光雷达水平风速和风向误差的计算模型。

为了对星载相干测风激光雷达风速及风向误差模型进行可行性分析,在 NASA/NOAA 及 HDWL 系统指标框架下,针对 2  $\mu\text{m}$  的激光波长,选取了一组系统仿真参数。仿真结果表明,探测距离为 0 ~ 6 km,水平风速区间为 15 ~ 75 m 的范围内,合成水平风速的误差取值在 0.8 ~ 3.2 m/s 之间,风向误差分布在 2.38° ~ 3.49°,基本符合星载测风激光雷达的相关指标要求;同时,针对系统结构优化,得到了指导性的结论,随机风速误差是合成水平误差的主要来源,垂直轨道方向的采样误差即为合成风场采样误差。

此外,为了对比将所有水平误差项累加取代计算风速误差带来的影响,引入相对误差函数,结果表明,在给定的探测距离和水平风速区间,两种算法对应的相对误差函数取值在 0.1 ~ 13.8% 范围内,其中直接水平误差项累加法是对全微分统计方法误差的过估计。

#### References

- [1] Kavaya M J, Emmitt G D. Space readiness coherent Lidar experiment (SPARCLE) space shuttle mission [C]. In *Laser Radar Technology and Applications III*. Orlando, FL, USA: SPIE. 1998. p. 2-11.
- [2] Emmitt G D. Hybrid technology Doppler wind lidar: assessment of simulated data products for a space-based system concept [C]. In *Second International Asia-Pacific Symposium on Remote Sensing of the Atmosphere, Environment, and Space*. International Society for Optics and Photonics; 2001. p. 366-75.
- [3] Durand Y, Meynart R, Culoma AJ, et al. Results of the pre-development of ALADIN, the direct detection Doppler wind Lidar for ADM/AEOLUS [C]. In *Remote Sensing; 2004*; International Society for Optics and Photonics; 2004. p. 93-104.
- [4] Itabe T, Mizutani K, Ishizu M, et al. ISS/JEM-borne coherent Doppler lidar program to measure the wind from space [J]. *Proceedings of SPIE, Lidar Remote Sensing for Industry and Environment Monitoring*, 2001. 4153: 412-9.
- [5] Frehlich R, Yadlowsky M. Performance of mean-frequency estimators for Doppler radar and lidar [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1994; **11**(5):1217-30.
- [6] Frehlich R, Hannon S M, Henderson S W. Coherent Doppler lidar measurements of winds in the weak signal regime [J]. *Applied Optics*. 1997; **36**(15):3491-9.
- [7] Frehlich R. Simulation of coherent Doppler lidar performance in the weak-signal regime [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1996; **13**(3):646-58.
- [8] Frehlich R. Simulation of coherent Doppler lidar performance for space-based platforms [J]. *Journal of Applied Meteorology*. 2000; **39**(2):245-62.
- [9] Frehlich R. Errors for space-based Doppler lidar wind measurements: Definition, performance, and verification [J]. *Journal of Applied Meteorology*. 2001 **18**:1749-1771.
- [10] Frehlich R. Velocity error for coherent Doppler Lidar with pulse accumulation [J]. *Journal of Applied Meteorology*. 2004. **21**:905-920.
- [11] Fujii T, Fukuchi T. *Laser remote sensing* [M]. Boca Raton, Florida: CRC Press. 2005.
- [12] Frehlich R. Cramer-Rao bound for Gaussian random processes and applications to radar processing of atmospheric signals [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. 1993; **31**(6):1123-31.
- [13] Zrnic D S. Estimation of spectral moments for weather echoes [J]. *Geoscience Electronics, IEEE Transactions on*. 1979; **17**(4):113-28.
- [14] Zrnic D S. Simulation of weatherlike Doppler spectra and signals [J]. *Journal of Applied Meteorology*. 1975. **14**: 619-620.
- [15] Rye B J, Hardesty R. Discrete spectral peak estimation in incoherent backscatter heterodyne lidar. I. Spectral accumulation and the Cramer-Rao lower bound [J]. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*. 1993; **31**(1): 16-27.
- [16] Sasiela R J. *Electromagnetic wave propagation in turbulence* [M]. (Second ed.) . Bellingham, WA: SPIE Press 2007: 96.
- [17] Oke T R <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf> [2013-7-30].
- [18] Kavaya M J, Emmitt G D, Frehlich R G, et al. A space-based point design for global coherent Doppler wind Lidar profiling matched to the recent NASA/NOAA draft science requirements [C]. In *Proceedings of International Laser Radar Conference*, Quebec, Que., Canada, 2002. P. 817.
- [19] Kavaya M J. Expected characteristics of global wind profile measurements with a scanning, hybrid, Doppler Lidar system [C]. *Ninth International Winds Workshop (9IWW)*, Annapolis, Maryland, USA, 14-18 April 2008.