

王 緬, 李 伟, 陈永清, 等. L 波段探空系统高空风平滑计算方法探讨[J]. 气象, 2011, 37(1): 85-91.

L 波段探空系统高空风平滑计算方法探讨^{*}

王 緬¹ 李 伟¹ 陈永清² 赵培涛¹ 郭启云¹
张 宇² 胡 姮¹ 郭月红³ 刘 琳³

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 中国气象局综合观测司, 北京 100081

3 北京市气象台, 北京 100086

提 要: 在分析现行业务 L 波段探空系统测风原理的基础上, 提出改进高空测风数据的平滑计算方法。首先比较了业务分钟风与滑动平均风两种高空测风数据的平滑计算方法, 并与 GPS RS92 测风数据进行了对比分析和批统计处理, 特别是对业务 L 波段雷达在 1~21、22~42 和 43 分钟及以后采取不同的时间间隔计算风的规定给出了分时段以及低仰角、远距离和小风速的统计分析。结果显示, 滑动平均法在选取合适的滑动平均窗口的条件下, 其计算的高空风与 GPS RS92 测风结果一致性更好且动态误差小。建议未来改进业务 L 波段探空系统的高空风平滑计算方法时, 采用窗口为 1 分钟的滑动平均方式或者前 20 分钟采用 30 秒, 以后采用 1 分钟的分段滑动平均方法。

关键词: L 波段, 探空系统, 高空风, 平滑计算方法

Discussion of Smoothing Methods of Upper-Air Wind Measured by L-Band Radar and Radiosonde Sounding System

WANG Mian¹ LI Wei¹ CHEN Yongqing² ZHAO Peitao¹ GUO Qiyun¹
ZHANG Yu² HU Heng¹ GUO Yuehong³ LIU Ling³

1 Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081

2 Department of Integrated Observations, CMA, Beijing 100081

3 Beijing Meteorological Observatory, Beijing 100086

Abstract: Based on the analysis of wind measurement of operational L-band radar and radiosonde sounding system, it is proposed an improved smoothing algorithm of upper-air wind. Firstly, the differences of two smoothing algorithms for upper-air winds, which are the operational minute wind and the moving average wind, are compared. Then they are also compared with GPS RS92 wind. The comparative analysis and the results of statistical processing are given, especially are also given several segmented statistical analysis of low elevation, long-distance, low wind and sub-period wind. The last one is regulated by operational rules that use different time intervals to calculate smoothing wind in three periods of an upper-air sounding process, i. e., the first 21 minutes, in 22—42 minutes and 43 minutes later. The results show that the vector wind using the most appropriate moving average window has a better consistency with GPS RS92 wind and a small dynamic error. It is suggested that the moving average method of 1 min window or 30 sec window at first 20 minutes and then 1 min window should be used for the future algorithm improvement of upper-air wind measured by operational L-band radar and radiosonde sounding system.

Key words: L-band, sounding system, upper-air wind, smoothing algorithm

* 国家自然科学基金(编号 40905016)资助

2010 年 2 月 26 日收稿; 2010 年 7 月 24 日收修定稿

第一作者: 王緬, 主要从事高空气象探测技术、方法研究和资料分析工作. Email: jeaneyw@yahoo.com.cn

引言

在气象服务中,高空风是非常重要的气象观测量。我国自 20 世纪 50 年代起,与国际同步实施了世界天气监测(WWW)计划,建立了包含 120 个探空站的高空探测网,1998 年开始,为了提高探测设备的自动化水平,提高高空探测精度,中国气象局对高空气象装备进行了升级换代,以南京大桥机械厂研制的 L 波段探空系统替代老的 59-701 探空系统,目前已经有 90 套 L 波段探空系统投入业务使用,未来计划全部采用 L 波段探空系统。李伟等对 59-701 探空系统与 L 波段探空系统进行了对比,同时利用国家气象中心数值预报系统 6 小时初估场对 L 波段电子探空仪探测数据进行了评估,结果表明,L 波段电子探空仪与 59-701 探空系统保持了数据的一致性,离散性减小,测量更加准确^[1]。

气象观测具有准确性、代表性与可比较性三个特点,世界气象组织认为影响观测数据质量的因素多种多样,包括观测环境、观测仪器、观测方法、业务规程等^[2-3]。对于现行业务 L 波段探空系统,温度、湿度与气压观测精度主要取决于传感器,而风的观测精度影响量除了地面雷达测角误差、测距误差外,还与计算方法有关。现行业务 L 波段探空系统中采用的是 1 分钟间隔的气球坐标计算的风,即取该整分钟及其上下各两秒的仰角或方位角或斜距数据之和的平均值,代表该分钟风值。如果在 1 分钟的时间内风向发生变化,这种计算方法所得结果不能完全代表风的实际情况。与 RS92 探空系统的每秒间隔的 GPS 测风数据相比,业务 L 波段探空系统给出的每分钟间隔数据过于平滑,并且,在业务 L 波段探空系统中利用测风数据计算量得风层的时间间隔又规定为:前 21 分钟以 1 分钟为间隔,22~42 分钟以 2 分钟为间隔,43 分钟及以后以 4 分钟为间隔。这仍是以两点计算的风。实际上每秒钟 L 波段探空系统就测得一组斜距、方位和仰角数据,分钟风的计算方式没有利用所有的探测结果,不能完全发挥新型探测装备的效益。贺宏兵等提出了采用小波变换计算层风的新方法来计算高空风,以适应高时空分辨率的探空设备发展^[4]。邱传涛等对常用的平均风向计算方法进行了比较,结果显示计算方法的不同会引起较大的误差^[5]。张玉存等认为在多种平均方法中,矢量平均方法具有明显的优越性^[6]。

下面在比较业务分钟风与秒数据滑动平均风两种计算方法的基础上,就未来高空风计算方法的改

进提出建议。

1 计算方法分析

L 波段探空系统采用测角测距方式进行测风,利用斜距与仰角得到水平投影,再利用水平投影与方位角进行极坐标与直角坐标转换,进而利用时间位移差计算高空风。

1.1 目前业务上所用计算方法

以 R 代表地面雷达测得的斜距, L 代表斜距的水平投影, t 代表雷达测得的时间, δ 代表雷达测得的仰角, α 代表雷达测得的方位角, i 与 $i+1$ 代表参与计算的两个相邻位置。

$$L_i = R_i \cos \delta_i \quad L_{i+1} = R_{i+1} \cos \delta_{i+1} \quad (1)$$

$$x_i = L_i \cos \alpha_i \quad x_{i+1} = L_{i+1} \cos \alpha_{i+1} \quad (2)$$

$$y_i = L_i \sin \alpha_i \quad y_{i+1} = L_{i+1} \sin \alpha_{i+1} \quad (3)$$

$$\Delta x = x_{i+1} - x_i \quad (4)$$

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i \quad (5)$$

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (6)$$

风速:

$$V = \frac{1}{\Delta t \times 60} \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \quad (7)$$

风向:

$$\theta = \arctan(\Delta y / \Delta x) \quad (8)$$

$$\Delta x > 0, \quad D = 180^\circ + \theta \quad (9)$$

$$\Delta x < 0, \quad \Delta y \geq 0: \quad D = 360^\circ + \theta \quad (10)$$

$$\Delta y < 0, \quad D = \theta \quad (11)$$

$$\Delta x = 0, \quad \Delta y = 0: \quad D = \text{静风}(C) \quad (12)$$

$$\Delta y > 0: \quad D = 270^\circ \quad (13)$$

$$\Delta y < 0: \quad D = 90^\circ \quad (14)$$

根据以上公式,可以计算出每秒钟的风向与风速。但是在业务处理中,由于秒数据风脉动太大,因此实际上计算的是分钟风,取整分钟前后两秒共 5 个斜距、仰角、方位角进行平均计算。这里 5 点平均的假设条件应是 5 次采样的方位、仰角、斜距都呈线性均匀变化,计算的平均值正好等于整分钟的测量值。如果整分钟数据很少错误,取 5 点平均没有必要;如果整分钟的数据错误,其他 4 点数据正确,取平均值可以减小整分钟值的误差;如果整分钟数据正确,其他 4 点数据有错误,取平均值反而会增加整分钟数据的误差。另外,以分钟为时间间隔计算风虽然消除了这段时间内由于探空仪的摆动和雷达的定位误差引起的脉动,但也消除了大气的真实脉动。气象学上为了取得有比较性的数据,要把脉动去除,

包括风本身的脉动^[7]。多长时间和多大的脉动应该被去除是值得研究的问题。目前气象业务采用的方法,其原理还是基于 59-701 雷达设备原理上,59-701 雷达测量的角坐标数据,只能是 1 分钟 1 次,无法平滑,且测量精度也比 L 波段雷达低^[8]。目前业务已经换型为 L 波段雷达,设备变了,计算方法也应该相应改变。

1.2 秒数据滑动平均风计算方法

上面提到,每秒钟 L 波段探空系统就能测得一组斜距、方位和仰角数据,进而计算得到每秒的风速风向值,而秒数据风多长时间和多大的脉动应该被去除(即得到平滑)是值得研究的问题。由于风是一个矢量,因此采用矢量的滑动平均法来探讨高空风的平滑计算。

首先利用每秒探测得到的斜距、仰角、方位角,按照公式(4)~(6),计算每秒风的南北分量 u 与东西分量 v :

$$u = \Delta x / \Delta t \quad (15)$$

$$v = \Delta y / \Delta t \quad (16)$$

这里 $\Delta t = 1$ 秒。

滑动平均法是将规定时段(窗口)内的每秒风速分量,先用代数法对相同分量进行平均求出两个平均值 $\bar{u}$ 和 $\bar{v}$:

$$\bar{u} = \sum_{i=1}^n u_i / n \quad (17)$$

$$\bar{v} = \sum_{i=1}^n v_i / n \quad (18)$$

这里 n 是规定时段内秒的个数。合成后的风速:

$$V = \sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2} \quad (19)$$

合成后的风向:

$$D = \arctan(\bar{v} / \bar{u}) \quad (20)$$

根据 u 和 v 的正负,参照公式(8)~(14)判断其所处的象限,计算出实际的风向。

利用上述方法计算得到的风速风向代表窗口中间时刻的风速风向,然后去除窗口第 1 秒的数据,加入窗口结束后下 1 秒的数据进行重复计算,即窗口向下 1 秒移动并求平均,这样就可以得到风速风向 1 秒间隔的连续变化曲线。用这种方法得到的风速风向包含了该时段内的所有样本。由于计算得到的风速风向起始时间为窗口的中间时刻,而在这一时刻之前的数据可与地面风速风向仪的数据进行内插处理获得,最终得到从地面直至球炸的每秒连续数据。

下面通过实例数据分析,将计算结果与 Vaisala

公司 GPS RS92 探空仪的秒数据风、现行业务 L 波段分钟风进行比较,最终选取合适的窗口。

2 计算结果比对

2.1 比对实验和误差计算方法

在锡林浩特和阳江两个探空站分别做过两次比对实验,均采用探空仪同球施放方法,即在一个探空气球上同时悬挂一个 L 波段电子探空仪与两个 RS92 探空仪。首先根据同球双施放原则^[9]计算 RS92 探空仪的动态测量误差,即传感器相同的两探空仪,以批统计方法得到的两者各自的标准差应近似相等。因此利用两个 RS92 探空仪之间相对差值的标准偏差 s 可计算出 RS92 探空仪自身的动态测量误差 s_R :

$$s_R = s / \sqrt{2} \quad (21)$$

然后将 RS92 探空仪作为参考标准,根据 L 波段探空仪与 RS92 探空仪的同球施放数据计算两者之间的标准偏差 s_D 和系统偏差,再利用公式(22)计算出 L 波段电子探空仪的动态测量误差 s_L :

$$s_L = \sqrt{s_D^2 - s_R^2} \quad (22)$$

将现行业务用高空风计算方法和秒数据滑动平均风计算方法分别得出的风速风向值与 GPS 测风进行比较并计算批统计误差,从而找出合适的高空风平滑算法。

锡林浩特站的比对时段为 2008 年 6 月 21—28 日,有 27 次探空数据,阳江站为同年的 7 月 13—16 日,有 13 次探空数据,一共 40 次探空数据作批统计处理,结果应具有代表性。

2.2 比对结果分析

2.2.1 测风数据全过程分析

根据以上公式分别计算 4 分钟、2 分钟、1 分钟、30 秒和 10 秒钟的滑动平均风以及业务分钟风,并与 GPS 测风相比较。其结果如下。

图 1 和图 2 分别是锡林浩特站和阳江站比对结果的典型例子。现行业务 L 波段系统计算所得的风速风向值为分钟数据,因此图中的各组数据是以整分钟进行比较。从图中可以看出,和 GPS 测风数据相比,10 秒滑动平均风的曲线波动明显,而现行业务分钟风和 4 分钟滑动平均风的曲线过于平滑,2 分钟滑动平均风则在 43 分钟后曲线平滑明显,只有 30 秒滑动平均风和 1 分钟滑动平均风的曲线与 GPS 测风曲线吻合得较好。

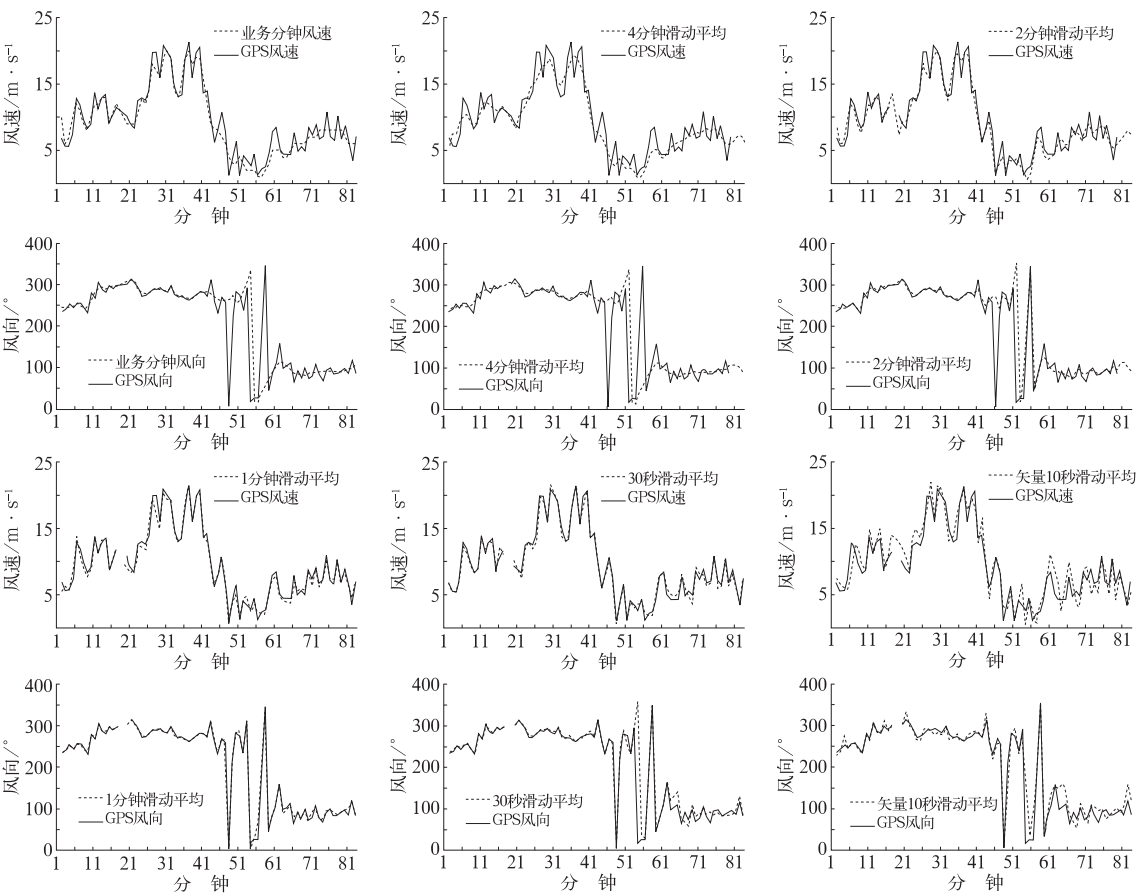


图 1 2008 年 6 月 21 日锡林浩特滑动平均风、业务分钟风与 GPS 测风比较
Fig.1 Comparison of the moving average wind and the operational minute wind with GPS measuring wind at Xilinhot Upper-Air Station on 21 June 2008

此外,还分别对各种平滑算法进行了误差统计分析,滑动平均法以秒数据统计。从表 1 的系统偏差统计结果看,业务分钟风、滑动平均风和 RS92 风速风向值的系统偏差均较小,具有可比较性。而从标准差的统计结果得知,4 分钟、10 秒滑动平均风和

业务分钟风风速风向值的标准差较大;2 分钟滑动平均风风速风向值的标准差也较大;30 秒滑动平均风和 1 分钟滑动平均风风速风向值的标准差较接近,1 分钟滑动平均风的风向标准差还略小于 30 秒滑动平均风的风向标准差。

表 1 全过程风速风向统计结果比较
Table 1 Statistical results of the whole process of wind speed and direction

参考标准 GPS RS92	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				风向/ $^{\circ}$			
	标准差		系统偏差		标准差		系统偏差	
	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江
4 分钟滑动平均	1.57	1.66	-0.33	-0.26	14.30	10.32	0.36	-0.11
2 分钟滑动平均	1.16	1.24	-0.23	-0.15	10.73	7.76	0.48	0.32
1 分钟滑动平均	0.74	0.81	-0.11	-0.05	7.97	5.59	0.45	0.46
30 秒滑动平均	0.73	0.85	-0.01	0.06	8.11	6.32	0.71	0.37
10 秒滑动平均	1.62	1.84	0.29	0.43	14.88	11.74	0.27	-0.16
业务分钟风	1.50	1.62	-0.26	-0.10	14.20	8.95	0.49	0.49

2.2.2 测风数据分时段分析

现行业务中 22~42 分钟和 43 分钟之后,分别采用 2 分钟、4 分钟间隔计算平均风,表 2 至表 4 依据上述时段给出了统计结果。经统计,如图 1、2 所示,与业务分钟风的标准差相比较,锡林浩特站高

空风在 43 分钟后有一段风速小且风向急剧变化的区间,导致滑动平均风 43 分钟后的风向标准差略有增加;而阳江站高空风自 22 分钟以后风向基本小于 100° 且变化趋于平缓,使得滑动平均风的风向标准差明显减小;43 分钟后两站的 30 秒和 1 分钟滑动

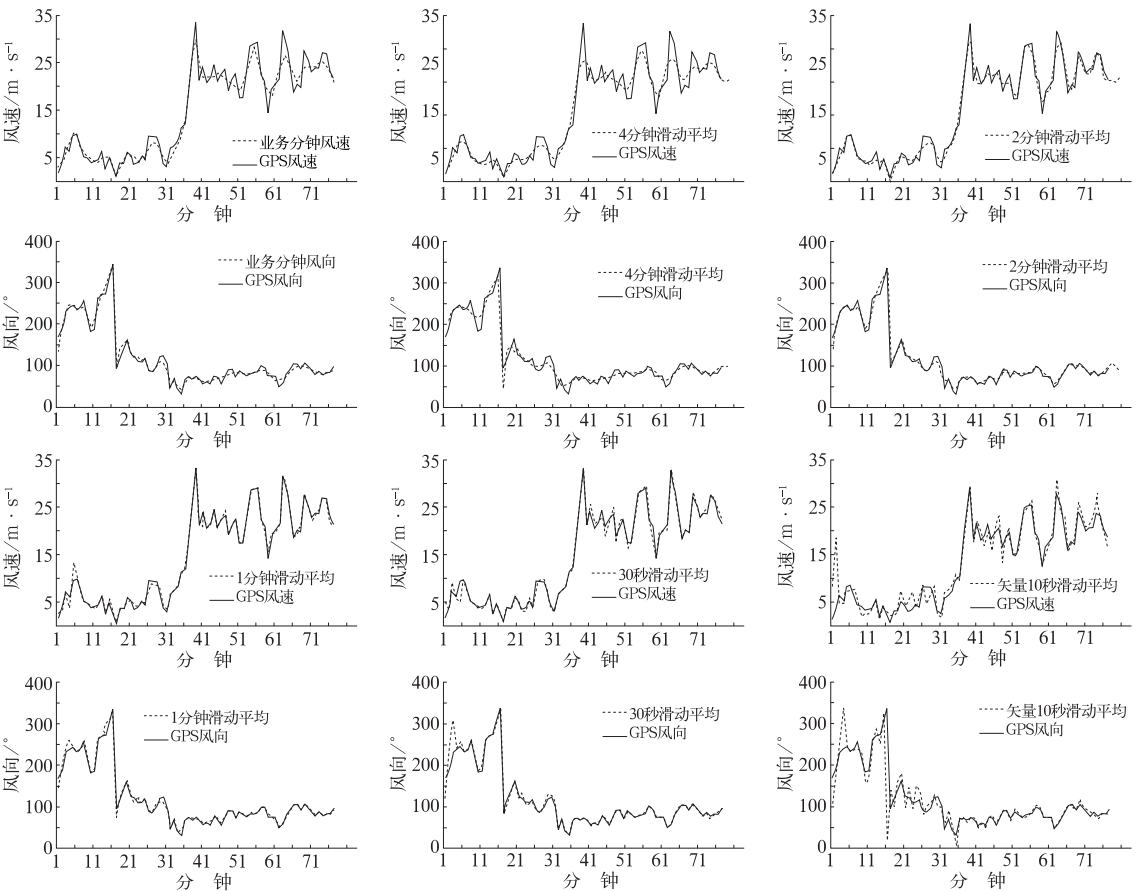


图 2 2008 年 7 月 15 日阳江滑动平均风、业务分钟风与 GPS 测风比较
Fig. 2 Comparison of the moving average wind and the operational minute wind with GPS measuring wind at Yangjiang Upper-Air Station on 15 July 2008

表 2 前 21 分钟风速风向统计结果比较
Table 2 Statistical results of wind speed and direction in the first 21 minutes

前 21 分钟	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				风向/ $^{\circ}$			
	标准差		系统偏差		标准差		系统偏差	
	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江
1 分钟滑动平均	0.62	0.68	−0.13	−0.07	7.24	7.79	−0.09	0.92
30 秒滑动平均	0.61	0.70	−0.06	0.07	7.10	9.56	0.38	0.48
10 秒滑动平均	1.44	1.48	0.09	0.36	13.53	14.46	0.19	−1.55
业务分钟风	0.97	1.04	0.07	0.12	11.13	11.33	0.47	1.36

表 3 22~42 分钟风速风向统计结果比较
Table 3 Statistical results of wind speed and direction from the 22nd to 42nd minute

22~42 分钟	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				风向/ $^{\circ}$			
	标准差		系统偏差		标准差		系统偏差	
	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江
2 分钟滑动平均	1.38	1.23	−0.26	−0.21	10.93	8.57	0.50	−0.29
1 分钟滑动平均	0.97	0.91	−0.14	−0.15	8.44	6.26	0.51	−0.10
30 秒滑动平均	0.76	0.94	−0.02	0.02	7.73	5.72	1.00	−0.49
10 秒滑动平均	1.76	1.90	0.33	0.39	13.56	11.62	−0.33	0.73
业务分钟风	1.60	1.34	0.72	−0.20	12.91	9.06	0.24	0.00

平均风的风速风向标准差均只有 4 分钟滑动平均风和业务分钟风风速风向标准差的 1/2 倍;2 分钟滑动平均风风速风向标准差从两站统计结果来看,仍略大于 1 分钟滑动平均风风速风向标准差。

2.2.3 远距离、低仰角和小风数据分析

锡林浩特站的小风(风速 $\leq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)整分钟数据样本有 570 个,而阳江站的小风整分钟数据样本只有 138 个。从表 5 的统计结果看,小风的风向标

表 4 43 分钟至球炸风速风向统计结果比较
Table 4 Statistical results of wind speed and direction after the 43rd minute

43 分钟至球炸	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				风向/ $^{\circ}$			
	标准差		系统偏差		标准差		系统偏差	
	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江
4 分钟滑动平均	1.55	1.90	-0.36	-0.16	15.20	6.13	0.40	0.10
2 分钟滑动平均	1.12	1.35	-0.23	-0.08	11.23	3.68	0.74	0.25
1 分钟滑动平均	0.74	0.88	-0.08	0.02	8.58	2.59	0.55	0.34
30 秒滑动平均	0.79	0.95	0.00	0.14	9.69	3.31	0.66	0.80
10 秒滑动平均	1.63	1.88	0.32	0.35	16.84	8.20	0.32	0.41
业务分钟风	1.56	1.89	-0.38	-0.17	18.19	6.14	-0.05	0.07

表 5 小风统计结果比较
Table 5 Statistical results of low winds

风速 $\leq 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$				风向/ $^{\circ}$			
	标准差		系统偏差		标准差		系统偏差	
	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江	锡林浩特	阳江
2 分钟滑动平均	1.12	0.77	0.15	0.11	20.90	13.99	-0.27	0.86
1 分钟滑动平均	0.71	0.59	0.03	0.05	13.24	11.00	-0.23	1.46
30 秒滑动平均	0.67	0.57	0.06	0.06	13.16	11.12	0.84	-0.26
10 秒滑动平均	1.47	1.43	0.53	0.47	23.25	22.90	0.15	-1.81
业务分钟风	1.38	0.83	0.28	0.38	22.97	16.18	0.84	1.79

准差均有所增加,但 30 秒和 1 分钟滑动平均风的风向风速标准差还是明显小于业务分钟风的风向风速标准差,同时比 2 分钟滑动平均风的结果要好。

L 波段雷达测角数据受多路传播影响发生起伏,仰角越低、距离越远,计算出的风向、风速来回摆动越大^[10],这里对低仰角、远距离的情况也做了统计分析。图 3 为 2008 年 6 月 22 日 01:00 锡林浩特站的低仰角、远距离、小风速时的放球记录,这段记录的最大仰角为 22.05°,最低仰角为 12.7°,斜距为 70 km。由于阳江站低仰角、远距离、小风速的分钟样本很少,无法做统计分析,锡林浩特站的样本只有 192 个,且两站均没有仰角在 6°左右的数据,因此无法对 6°附近的低仰角进行统计分析。从表 6 的统计结果看,仍然是 1 分钟和 30 秒的滑动平均风风速风向标准差较小。

3 结论与建议

根据上述分析可以得到以下初步结论:

- (1) 和现行业务 L 波段探空系统只利用 5 点坐标数据获得的分钟风相比较,滑动平均风计算方法能在充分利用全部探空坐标数据,在适当选取移动平均窗口的基础上,获得与 GPS 测风系统较一致的风速风向测量结果;
- (2) 现行业务 L 波段探空系统对风的脉动平滑

较大,一些反映风速风向快速变化的真实结果也被平滑了,而滑动平均法能在探空系统现有测量精度的前提下,通过计算方法较好地消除脉动影响;

(3) 通过滑动平均法的秒数据统计结果可以看出,滑动平均窗口的选取在 30 秒以上为宜,若采用 1 分钟滑动平均窗口计算每秒钟高空风,在整体趋势上与 GPS 测风一致性最好。

建议未来业务 L 波段探空系统中风的计算方法改进时,采用滑动平均计算每秒钟高空风,替代现行 5 点坐标平均计算整分钟高空风的方法。此外,根据现行《常规高空探测规范》规定的测风数据 20 分钟以上采用 2 分钟和 4 分钟间隔计算平均风,是由于原 59-701 探空雷达对远距离、低仰角目标以及高空风小时测量和计算误差较大,为得到较为准确的数值而采取的措施,这种方法掩盖了 800 m 以致 1600 m 厚度的风速风向变化。在采用 L 波段探空雷达的情况下,由于测角和测距都要比 701 雷达准确得多,缩小时间间隔以反映风的实际变化,是必要和可行的。而且通过高空小风数据和低仰角、远距离风的统计分析得知,滑动平均法对于减小高空风数据动态误差具有明显优势,因此,可以在空中风探测的整个过程都采用 1 分钟滑动平均法,也可以前 20 分钟采用 30 秒滑动平均,以后采用 1 分钟滑动的分段平均方法。

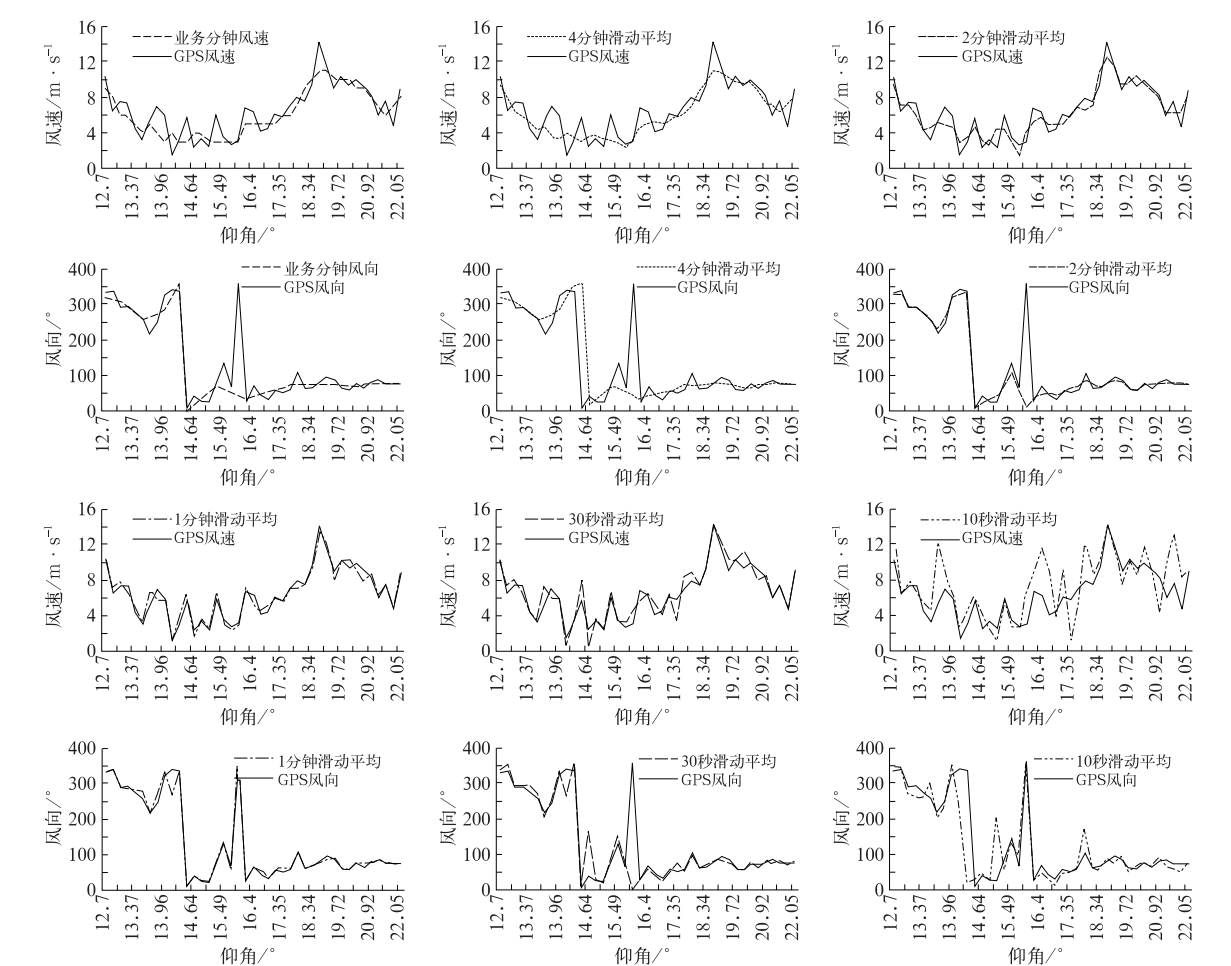


图 3 2008 年 6 月 22 日 01 时锡林浩特低仰角、远距离、小风速时的测风比较
Fig. 3 Comparison of the measuring winds under the circumstance of low elevation, long-distance and low winds at 01:00 BT 22 June 2008 at Xilinhot Upper-Air Station

表 6 低仰角、远距离、小风速统计结果比较

Table 6 Statistical results of long-distance, low elevation and low winds

仰角≤30°,斜距>40 km, 锡林浩特风速/m·s ⁻¹ 锡林浩特风向/°				
风速<10 m·s ⁻¹	标准差	系统偏差	标准差	系统偏差
4 分钟滑动平均	1.70	−0.46	21.77	−0.43
2 分钟滑动平均	1.23	−0.23	16.89	−0.57
1 分钟滑动平均	0.70	−0.05	11.11	0.77
30 秒滑动平均	0.85	0.01	15.30	0.98
10 秒滑动平均	2.00	0.75	21.85	0.19
业务分钟风	1.73	−0.32	21.93	−0.69

目前,中国气象局正在组织国产 GPS 探空仪的考核,建议可以采用滑动平均法来继续探讨 GPS 测风系统的滑动平均窗口选取,且验证 RS92 测风数据的计算方法是否也采用的是滑动平均法。

另外,这项工作也给出一个启迪,在误差分析方面,不仅要注重硬件分析,软件算法引起的误差也不可忽视。

参考文献

[1] 李伟,李书严,陶士伟,等. L 波段高空气象探测系统性能评估[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4):732-735.

[2] WMO. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation (V7.0), Geneva, 2006.

[3] 张文建. 世界气象组织综合观测系统(WIGOS)[J]. 气象, 2010, 36(3):1-8.

[4] 贺宏兵,章建军. 基于小波变换的高空风估计[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2002, 3(2):81-84.

[5] 邱传涛,李丁华. 平均风向的计算方法及其比较[J]. 高原气象, 1997, 16(1):94-98.

[6] 张玉存,宋呈文. 采用矢量法计算风速风向平均值[J]. 气象仪器装备, 2004, (2):1-4.

[7] 黄炳勋. 国内外常规高空观测技术发展近况综述[J]. 气象, 1994, 20(5), P3-9.

[8] 张玉存,赵炜. 用矢量平均法计算空中风连续变量的方法[J]. 军事气象水文, 2006, (5):7-11.

[9] 中华人民共和国国家军用标准 GJB 570.3A-2008, 2008:13-14.

[10] 宋连春,李伟. 综合气象观测系统的发展[J]. 气象, 2008, 34(3):3-9.