

风廓线雷达水平风数据不一致问题的研究

范大伟

(民航新疆空管局气象中心, 乌鲁木齐 830016)

摘要: 文章对新疆乌鲁木齐地窝堡国际机场风廓线雷达存在的关于降雨过程中高模式、低模式探测到的水平风向、风速明显不一致问题进行研究, 利用现有的风廓线雷达产品, 从信号处理的角度出发, 运用一致性算法和水平风合成算法对径向速度值进行计算, 通过对计算结果的分析 and 验证, 找到了问题的所在。

关键词: 高模式; 低模式; 一致性; 水平风计算; LAP3000

中图分类号: P412.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-009X(2014)03-0041-06

Study on data Inconsistency of wind profiler radar

Fan Dawei

(Meteorological Center of CAAC Xinjiang Air Traffic Administration, Urumqi 830016)

Abstract: This paper studies on the obvious inconsistency of horizontal wind direction and wind speed of wind profiler radar in Xinjiang Urumqi international airport. From the perspective of signal processing, utilizing the existing products of the wind profile radar, the consistency algorithm and horizontal wind synthesis algorithm are used to calculate the radial velocity value. Through the analysis and validation to the calculated results, the problems are found out.

Key words: high mode; low mode; consistency; horizontal wind calculation; LAP3000

0 引言

风廓线雷达是以晴空大气作为探测对象, 利用大气湍流对电磁波的后向散射进行大气风场探测的遥感设备。乌鲁木齐地窝堡国际机场的风廓线雷达于2009年1月投入使用, 在使用过程中一直存在着降雨过程中风廓线雷达的高、低模式探测到的风速有很大的不同, 风向也有明显的区别, 本文将从信号处理的角度来解决此问题。

1 风廓线雷达探测原理

风廓线雷达是一种利用雷达回波多普勒频移测量高空风向、风速分布的设备。风廓线雷达发射的电磁波在大气传播过程中, 因为大气湍流造

成的折射率分布不均匀而产生布拉格散射, 其中后向散射能量被风廓线雷达所接收。根据多普勒效应确定气流沿雷达波束方向的径向速度, 通过往返时间确定回波位置, 这样就可以得到风场信息随高度变化的廓线。

2 信号处理

风廓线雷达的信号处理系统主要完成时域相干累积、快速傅里叶变换、谱平均、谱参数计算^[1-3]。回波信号中频经过模数转换后得到相互正交的序列, 首先对序列进行多次的相干累积以提高信噪比, 将多个相干累积后的数据进行快速傅里叶变换, 得到功率谱密度函数, 再对功率谱密度函数进行非相干累积去除频域抖动, 得到相对

平稳的功率谱密度函数,最后通过对功率谱密度函数进行矩计算就可以得到回波信号功率、径向速度、谱宽和信噪比。

各阶矩的计算公式如下:

(1) 信号功率 P_r (信号功率谱的 0 阶矩),即信号带宽内全部信号功率谱线之和:

$$P_r = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

求和范围为信号普带宽; P_i 为第 i 点的功率值;

(2) 径向速度 V (信号功率谱的一阶矩):

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n v_i P_i}{P_r} \quad (2)$$

v_i 为第 i 点速度值。

(3) 速度谱宽 W_f (信号功率谱的二阶矩):

$$W_f = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v)^2 P_i}{P_r}} \quad (3)$$

(4) 信噪比 SNR(信号功率与噪声功率之比):

$$SNR = 10 \lg \frac{P_r}{P_N} \quad (4)$$

P_N 为噪声电平。

3 两个重要的算法

3.1 一致性算法

该算法主要对径向速度进行一致性判断,该算法主要分两个模块:一致性百分比模块和一致性窗口模块^[4,5]。

一致性百分比模块确定了通过一致性算法的径向速度量的最小值;一致性窗口模块确定进行径向速度平均所用的径向速度值,一致性窗口的单位是 m/s。算法的伪码如下:

```

For each beam
For each receiver
For each range gate
Consensus percent:
{
if(total_record_count <=2)
mincnt = total_record_count
else mincnt = percent_threshold * total_record_count
}
Consensus window:
{
Maxcnt = 0
    
```

```

for each Radial velocity value V(i)
compute number of all Doppler values
between V(i)-window and V(i)+window
if(number(i) > maxcnt)
maxcnt = number(i)
maxwindow = i
}
    
```

其中一致性百分比、一致性窗口大小可以通过软件进行设置。

在一致性百分比模块中确定了满足一致性算法的最小值。

在一致性窗口模块中通过最大窗口数和一致性窗口大小就可以确定有哪些径向速度值落在了一致性窗口之间,比较一致性窗口模块中最大值与一致性百分比模块中最小值的大小,如果最大值大于等于最小值,对通过一致性算法的径向速度值进行相加后与通过一致性窗口的最大值相除就可以得到平均径向速度,平均径向速度值就可以用于水平风的合成。

3.2 水平风计算

在三波束雷达中,如图 1 所示,设波束 1 的天顶角为 θ 、方位角为 φ_x 、径向速度 V_x ;波束 2 的天顶角为 θ 、方位角为 φ_y ($\varphi_y < \varphi_x$)、径向速度为 V_y ;波束 3 为垂直波束,径向速度为 V_z 。通过风廓线雷达探测到平均径向速度 V_z 、 V_y 、 V_x 计算水平风分量 u, v :

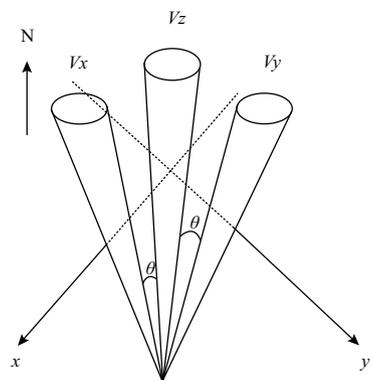


图 1 风廓线雷达三波束指向图

$$\left. \begin{aligned}
 u &= \frac{V_x - V_z \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \\
 v &= \frac{V_y - V_z \cos(\theta)}{\sin(\theta)} \\
 w &= V_z \\
 s &= \sqrt{u^2 + v^2}
 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: s 为水平风速;风向的计算与 u 和 v 的正负值有关,还与倾斜波束的方位角 φ_y 有关,这里取 $90^\circ < \varphi_y < 180^\circ$ 。具体的风向计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} d &= \text{atctan}(u/v) + \varphi_y, (u \geq 0, v > 0) \\ d &= \text{atctan}(u/v) + 180 + \varphi_y, (u \geq 0, v < 0) \\ d &= -\text{atctan}(v/u) + 270 + \varphi_y, (u < 0, v < 0, d \leq 360) \\ d &= -\text{atctan}(v/u) + \varphi_y - 90, (u < 0, v < 0, d > 360) \\ d &= -\text{atctan}(v/u) + \varphi_y - 90, (u < 0, v > 0) \end{aligned} \right\} (6)$$

4 主要技术参数

乌鲁木齐地窝堡国际机场使用的是芬兰维萨拉 LAP3000 边界层风廓线雷达,该雷达于 2009 年 1 月投入使用,工作频率 1 294 MHz;采用三波束方式,一个垂直波束,两个倾斜波束,具体的天顶角和方位角分别为:垂直波束($204^\circ, 90.0^\circ$);倾斜波束 1($204^\circ, 74.8^\circ$);倾斜波束 2($114^\circ, 74.8^\circ$)。采用高、低模式对大气进行探测,高、低模式主要的技术参数见表 1。

表 1 高低模式的主要技术参数

参数	低模式	高模式
最低探测高度	270 m	1128 m
距离门间隔	62 m	72 m
脉冲周期	20 us	33 us
相干累积次数	200	170
距离门个数	17	20
快速傅立叶变换点数	128	128
谱平均次数	60	60
脉冲宽度	1.417 us	2.833 us

由表 1 所示的高、低模式参数可以看出该风廓线雷达的基本性能如下:

- (1) 高模式的探测距离为 1 128~2 502 m, 低模式的探测距离为 270~1 269 m;
- (2) 高、低模式的距离分辨力分别为 425 m

和 212 m;

- (3) 时间分辨力为 12 min。

该雷达可以提供水平风向、风速,径向速度、信噪比、谱宽、功率谱等产品。

5 水平风数据不一致问题

在实际使用中发现,在降雨天气下风廓线雷达高、低模式探测到的水平风数据不一致,具体的表现为高模式的风速明显大于低模式的风速,而且高、低模式的风向也有明显的不一致。

对 2013-06-18T04:24~07:12(北京时间,下同)的降雨进行分析,通过这一时间段的风羽图(图略)可以看出,低模式的风速小,高模式的风速较大,而且高、低模式的风向明显不同。

高、低模式的风向、风速有明显的不一致,首先需要考虑是否是因为风场的切变引起的。由于低模式的最高探测高度 1 269 m,高模式的最低探测高度为 1 128 m,探测高度有重叠,正常情况下重叠部分的风向、风速应该基本一致,但从图中可以看出在 1 000~1 200 m 高度上风向、风速完全不一致;从图中还可以看出高模式和低模式各自的风向、风速一致性很好,从而可以判断出高、低模式风数据的不一致并不是由于风场的切变引起的。

本文试图通过从以下两个方面进行分析、计算,找出问题所在。

5.1 功率谱对比

功率谱是水平风计算的基础数据,因此对功率谱数据进行分析有助于找到造成高、低模式水平风数据不一致的原因^[6]。为了减少计算量,这里只对 06:12 的谱数据进行分析、计算。图 2 和图 3 分别

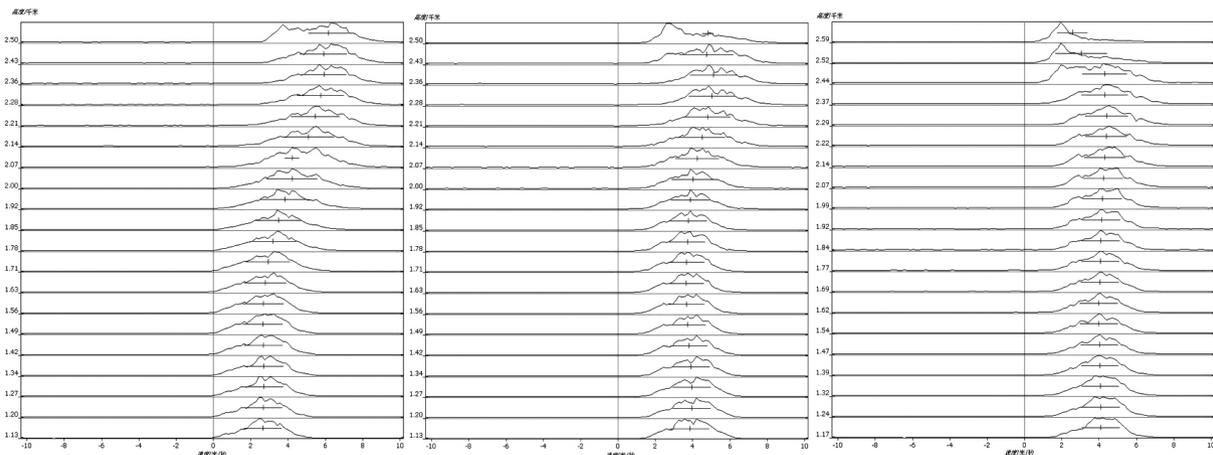


图 2 高模式三波束功率谱

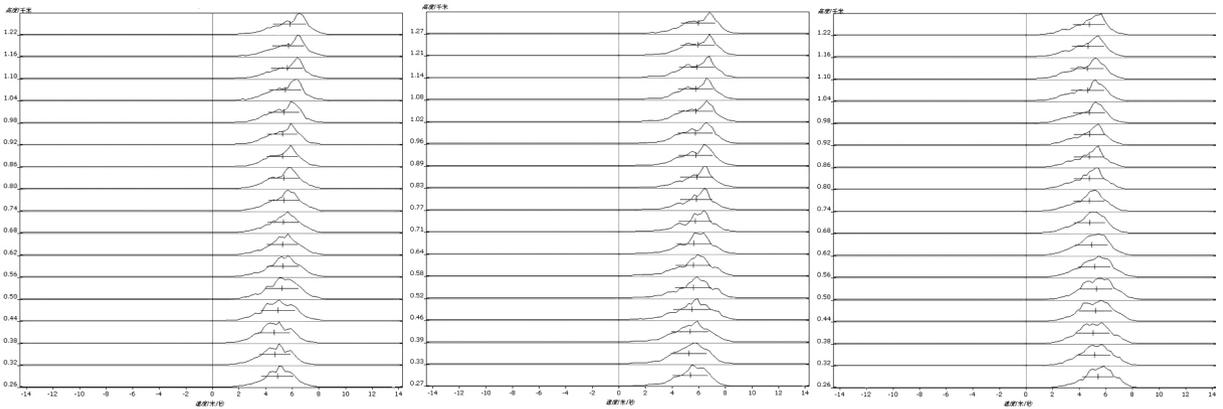


图3 低模式三波束功率谱

为高模式和低模式 06:12 的三波束功率谱,从左到右依次为垂直波束、倾斜波束 1 和倾斜波束 2 的功率谱,横坐标为径向速度,纵坐标为高度。

通过对比可以看出高、低模式的径向速度都为正值,径向速度都比较大,都大于 3 m/s,同时一致性比较好。

下面对高模式 1 269 m 高度上的谱数据和低模式 1 273 m 高度上的谱数据利用一致性算法分别计算在一个产品周期内的平均径向速度。这里一致性百分比为 60%、一致性窗口大小为 3 m/s,通过计算可以得出高模式的三波束平均径向速度为 5.48、4.84、3.50 m/s;低模式的三波束平均径向速度为 5.0、4.69、3.56 m/s,可以得出两组数据相差不大。

通过定性和定量分析可以得出,高、低模式的谱数据相差不大,由此可以推断问题可能出在水平风计算上。

表 2 高模式平均径向速度

高度 (m)	垂直波束 (m/s)	倾斜波束 1 (m/s)	倾斜波束 2 (m/s)
1 128	5.000	4.700	3.900
1 200	5.000	4.800	3.800
1 273	4.900	4.800	3.800
1 345	4.900	4.800	3.700
1 417	4.900	4.800	3.600
1 489	4.900	4.800	3.600
1 562	5.000	4.800	3.700
1 634	5.000	4.800	3.800
1 706	5.000	4.800	4.000
1 779	5.000	4.800	4.300
1 851	5.000	4.700	4.600
1 923	5.000	4.700	5.000
1 996	4.900	4.800	5.400
2 068	4.900	5.000	5.700
2 140	4.900	5.400	6.100
2 213	4.800	5.400	6.300
2 285	4.700	5.500	6.400
2 357	4.400	5.500	6.600
2 429	4.400	5.300	6.500
2 502	3.200	5.400	6.500

5.2 水平风计算结果对比

06:12 高、低模式的平均径向速度如表 2 和表 3 所示。

表 3 低模式平均径向速度

高度 (m)	垂直波束 (m/s)	倾斜波束 1 (m/s)	倾斜波束 2 (m/s)
270	4.400	3.500	4.300
332	4.500	3.500	4.200
395	4.500	3.600	4.200
457	4.500	3.700	3.900
519	4.400	3.900	3.200
582	4.400	4.100	3.700
644	4.400	4.100	3.600
707	4.500	4.200	3.900
769	4.600	4.200	3.800
832	4.600	4.200	3.600
894	4.600	4.200	3.600
957	4.600	4.200	3.300
1 019	4.700	4.300	3.700
1 081	4.700	4.400	3.800
1 144	4.800	4.500	3.800
1 206	4.800	4.500	3.800
1 269	4.800	4.600	3.800

将表 2 和表 3 中的径向速度值带入到公式 5 和公式 6 计算水平风向、风速,具体的计算结果如表 4 和表 5。

通过计算值与产品值的对比可以看出低模式计算出的风向、风速值与产品值的一致,而高模式的计算结果与产品值的完全不一致。

通过上文对谱数据的分析可以发现垂直径向速度比较大都在 3 以上,朝向雷达。根据统计^[7-9]晴空回波情况下垂直径向速度主要分布在 -1~1 m/s 之间,此时的径向速度明显都大于 1 m/s,考虑此时的垂直径向速度为雨滴的下落速度。这时将低模式下的径向速度再次带入公式 5 和公式 6,同时将垂直径向速度设置为 0,再次计算风向、风速,结果见表 6 中的低模式。

表 4 高模式水平风计算值

高度 (m)	产品值		计算值	
	风速 (m/s)	风向 (°)	风速 (m/s)	风向 (°)
1 128	23.300	165	3.560	302
1 200	23.400	165	3.911	295
1 273	23.300	166	3.552	290
1 345	23.100	167	3.933	290
1 417	23.000	167	4.313	290
1 489	22.900	167	4.313	290
1 562	23.100	167	4.292	295
1 634	23.400	166	3.911	295
1 706	23.900	164	3.148	296
1 779	24.400	162	2.005	297
1 851	25.100	160	0.982	323
1 923	26.100	158	0.820	78
1 996	27.400	156	2.575	120
2 068	29.000	155	3.847	130
2 140	31.100	155	5.824	140
2 213	31.600	154	7.003	139
2 285	32.200	154	8.006	141
2 357	32.700	154	10.172	142
2 429	32.000	153	9.490	139
2 502	32.200	154	15.719	148

表 5 低模式水平风计算值

高度 (m)	产品值		计算值	
	风速 (m/s)	风向 (°)	风速 (m/s)	风向 (°)
270	2.800	26	2.853	28
332	3.000	18	3.259	14
395	2.800	14	2.884	13
457	2.900	347	2.976	349
519	2.600	315	2.611	312
582	2.200	308	2.156	309
644	2.700	307	2.526	307
707	2.000	316	1.773	312
769	2.500	310	2.602	315
832	3.000	308	3.328	310
894	3.300	308	3.328	310
957	4.800	305	4.439	306
1 019	3.300	310	3.311	310
1 081	3.300	308	2.853	304
1 144	3.300	305	3.213	303
1 206	3.200	304	3.213	303
1 269	3.200	301	3.176	296

从结果中可以发现风速和风向与表 4 高模式产品值的趋势基本一致。

再次将高模式的径向速度值带入到公式 5 和公式 6 中,同样将垂直径向速度设置为 0,再次计算风向、风速值,结果如表 6 高模式所示。从结果中可以看出风速和风向与表 4 产品中的风向、风速值一致。

表 6 高、低模式水平风计算结果(垂直径向速度为 0)

高度 (m)	低模式			高模式		
	风速 (m/s)	风向 (°)	风速 (m/s)	风向 (°)	高度 (m)	
270	21.146	153	1 128	23.294	164	
332	20.852	154	1 200	23.350	166	
395	21.098	155	1 273	23.350	166	
457	20.504	157	1 345	23.115	166	
519	19.241	165	1 417	22.884	167	
582	21.064	162	1 489	22.884	167	
644	20.810	163	1 562	23.115	166	
707	21.860	161	1 634	23.350	166	
769	21.602	162	1 706	23.831	164	
832	21.098	163	1 779	24.579	162	
894	21.098	163	1 851	25.083	160	
957	20.372	166	1 923	26.173	157	
1 019	21.636	163	1 996	27.556	156	
1 081	22.174	163	2 068	28.919	155	
1 144	22.464	164	2 140	31.072	156	
1 206	22.464	164	2 213	31.647	155	
1 269	22.757	164	2 285	32.185	155	
			2 357	32.768	154	
			2 429	31.988	153	
			2 502	32.230	154	

从以上分析可以得出高模式计算水平风只用了两个倾斜波束,在低模式用了三波束。这种情况的出现应该和配置文件有关系,通过对配置文件的分析发现在高模式一致性模块中参数垂直订正为 0,其意思是在水平风计算时不需要用垂直径向速度对倾斜波束的径向速度进行订正,低模式一致性模块中参数垂直订正为 1,也就是说在水平风计算时需要用垂直径向速度对倾斜波束的径向速度进行订正,参数垂直订正就是导致高、低模式计算出的水平风向、风速不一致的原因。

6 径向速度对水平风测量的影响

在通常的晴空大气环境下,计算水平风只需要两个倾斜波束的径向速度,这是由于垂直径向速度比较小,垂直波束在经过一致性算法后进行平均,垂直径向速度对水平风的计算可以忽略,即不需要垂直校正;但是当大气环境中有层状云降雨存在的时候,径向速度会受到降雨的影响,但是风廓线雷达能够利用垂直波束来测量降雨的垂直下落速度,并利用它来修正倾斜波束的测量值,此时垂直径向速度不能被忽略,即需要垂直校正^[10]。

不使用垂直校正情况下,径向速度计算公式如下:

$$\left. \begin{aligned} V_x &= u\sin(\theta) \\ V_y &= v\sin(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

晴空大气环境下,公式可以很好的反映大气风场信息。当有降雨存在的时候,倾斜波束的径向速度不仅由水平风决定,而且还由雨滴下落的速度决定,所以实际测量值 V_x 和 V_y 会比较大,而且都是正值,这样就会导致水平风速计算结果偏大,风向只能在 $[\varphi_y, \varphi_y + 90^\circ]$ 之间变化,所以当有降雨发生的时候利用两个倾斜波束测量得到水平风不能反映真实的风场信息。

使用垂直校正情况下,径向速度计算公式为:

$$\left. \begin{aligned} V_x &= u \sin(\theta) + V_z \cos(\theta) \\ V_y &= v \sin(\theta) + V_z \cos(\theta) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

公式表明,倾斜波束径向速度由水平风速和垂直径向速度共同决定,这与实际情况相吻合,所以在降雨发生时利用垂直修正,即利用三波束计算水平风可以真实的反映大气风场信息。

利用垂直径向速度去修正倾斜波束径向速度只有在层状云降雨的条件下才能使用,因为层状云降雨能够满足水平风场局地均匀各向同性的假设;在对流云降雨条件下,可能伴随这强烈的上升气流和下沉气流,降雨过程中的一些特征的水平尺度可以和每个天线波束的采样体间隔相当或者较小些,在这种条件下,所有波束在同一高度和时间上探测到的垂直径向速度就可能不一致,从而违反了局地均匀各向同性的假设,在这种条件下探测到的水平风不能真实反映大气的风场信息。

根据以上分析将配置文件中高模式一致性模块中参数垂直订正设置为 1,即利用垂直径向速度来修正两个倾斜波束的径向速度,在这种情况下,无论是晴空条件还是在层状云降雨情况下,都能准确地测出大气的风场信息。自修改配置文件后,在层状云降雨过程中再无出现高、低模式大范围风速风向不一致。

7 结束语

通过对风廓线雷达的功率谱、径向速度利用

一致性算法和水平风合成算法的分析、计算,得出造成高、低模式风向、风速不一致的原因在于低模式采用的垂直校正,而高模式没有采用垂直校正。

对不采用垂直校正和采用垂直校正对水平风向、风速的影响进行计算分析,得出在层状云降雨条件下,只有采用垂直校正才能使探测到的水平风能够真实的反映大气风场信息,根据这一结论,将配置文件中高模式的垂直校正设置为 1,通过修改配置文件,解决了风廓线雷达在层状云降雨过程中高、低模式方向风速、不一致的问题。

参考文献:

- [1] Vaisala. Wind Profiler LAP3000 User's Guide[M]. Finland: Vaisala, 2005.
- [2] 邓洪,杨万麟,何建新. 风廓线雷达信号信息提取实现[J]. 成都信息工程学院学报, 2005, 20(6): 717-720.
- [3] 陈华础. 风廓线雷达信号处理机设计与实现[J]. 现代雷达, 2006, 28(5): 53-62.
- [4] Vaisala. Software Manual LAP-XM Technical Reference[M]. Finland: Vaisala, 2005.
- [5] 滕志遥,贺宏兵. 风廓线雷达数据质量控制方法[J]. 雷达与对抗, 2008(1): 10-15.
- [6] 朱斌,高仲辉. 风廓线雷达探测系统中的谱数据处理[J]. 现代雷达, 2003, 25(11): 21-27.
- [7] 杨馨蕊,马舒庆,吴蕾. UHF 风廓线雷达降雨数据判别方法的比较与评估[J]. 大气科学学报, 2010, 33(5): 576-681.
- [8] 王晓蕾,阮征,葛润生,等. 风廓线雷达探测降雨云中雨滴谱的实验研究[J]. 高原气象, 2010, 29(2): 498-505.
- [9] 何平,朱小燕,阮征,等. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究[J]. 应用气象学报, 2009, 20(4): 465-470.
- [10] R. G. STRAUCH, D. A. MERRITT, K. P. MORAN, K. B. EARNSHAW, D. VAN DE KAMP. The Colorado wind-profiling network[J]. Atmos & Oceanic Tech, 1984 (1): 37-49.