

文章编号: 2095-4980(2020)03-0391-06

风廓线雷达中自适应抗干扰技术

郑秀明^{1,2}, 夏一凡^{1,2}, 王志锐^{1,2}, 张 滢³, 孙世奇³

(1.北京无线电测量研究所, 北京 100854; 2.航天新气象科技有限公司, 北京 100854;
3.西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

摘要: 风廓线雷达可为民航气象局、部队作战部署等军民活动提供高时空分辨率的大气风场信息, 一般采用五波束进行探测, 在探测过程中会受到来自自身和外界等多方面的信号干扰。为了研究抗干扰技术, 介绍风廓线雷达的基本原理, 对干扰的来源和措施进行分类讨论。分别从信号设计、频谱处理和波束控制 3 个典型角度进行抗干扰算法研究, 并着重对本文提出的动态自适应波束选取(ADBS)算法进行介绍。仿真结果表明, 本文算法对风廓线雷达抗干扰有效。

关键词: 风廓线雷达; 抗干扰; 一致性检验; 动态自适应

中图分类号: TN958

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA2018197

Adaptive anti-interference technique in Wind Profiler Radar

ZHENG Xiuming^{1,2}, XIA Yifan^{1,2}, WANG Zhirui^{1,2}, ZHANG Ying³, SUN Shiqi³

(1.Beijing Institute of Radio Measurement, Beijing 100854, China; 2.Aerospace Newsky Technology Company Limited, Beijing 100854, China; 3.Xichang Satellite Launch Center, Xichang Sichuan 615000, China)

Abstract: Wind Profiler Radar(WPR) is widely applied to provide continuous atmosphere detection of wind field with high time-space resolution for airport, meteorological administration and army. Usually five beams are used for detection, and interference signals could exist because of different factors. This paper firstly introduces the fundamental principle of WPR. Then the resources of interference and countermeasures are discussed. Next, anti-interference algorithms in signal-design, data processing, and beam-control are discussed respectively. At last, an Adaptive Dynamic Beam Selection(ADBS) algorithm is proposed in detail. The simulation results show the effectiveness of this algorithm.

Keywords: Wind Profiler Radar; anti-jamming; consistency check; dynamic and adaptive technique

风廓线雷达(WPR)是一种大气遥测设备, 主要以大气湍流为探测对象, 利用其对电磁波的散射作用进行大气风场等信息探测^[1], 被广泛应用于航空航天、民航机场、气象局、部队作战保障等军民领域。其初级数据产品包括各高度层水平风速风向、垂直气流、大气折射率等, 并能形成诸如风切变、降水识别、强对流等二次产品, 可为任意气象系统提供有力的数据支持。

我国的风廓线雷达研制工作始于 20 世纪 80 年代, 第一部风廓线雷达由航天科工二院二十三所研制成功。该所风廓线雷达已形成集低空、边界层、对流层、平流层的系列发展模式, 探测覆盖范围可达 20 m~90 km。此外中电 14 所、38 所也是国内风廓线雷达的主要研制单位。

1 风廓线雷达原理与干扰分类

风廓线雷达常采用五波束轮转的方式进行大气遥感探测, 干扰信号可能来自机内, 也可能来自外界。

1.1 风廓线雷达工作原理与数学模型

风廓线雷达一般采用 5 个特定指向的波束(1 个垂直波束、4 个倾斜波束)进行风场的径向风速探测。雷达通

收稿日期: 2018-09-10; 修回日期: 2019-03-31

作者简介: 郑秀明(1988-), 男, 工程师, 主要研究方向为气象雷达总体技术。email:xiuming_zh@126.com

过发射机将特定频率的激励信号放大,再通过天线将电磁波辐射到空中,电磁波在遇到波长尺度与其对应的大气湍流时,会产生较强的后向散射。雷达接收反射回来的电磁波,经过时域处理和 FFT 变换得到谱信息,再经过谱识别可以得到 5 个波束指向上的径向风速信息。

利用径向风速信息,经过一定的质量控制和廓线反演,可以得到三维风场信息和各种类型的二次气象产品。三维风速的数学模型可通过式(1)~式(3)表示:

$$\begin{cases} u = \frac{V_e - w \cos \phi}{\sin \phi} \\ w = V_z \\ v = \frac{V_n - w \cos \phi}{\sin \phi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u, v, w 分别是三维风速矢量的 2 个水平风速分量和垂直风速分量; V_e, V_n, V_z 分别是 2 个倾斜波束和垂直波束测得的径向风速。进而,运用 u, v 可进一步计算出水平风速、风向:

$$V_{\text{水平}} = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan(u/v) \quad (3)$$

1.2 干扰分类

风廓线雷达工作过程中,干扰根据来源可分为 2 类,分别是自身干扰和外界干扰。自身干扰:即由设备自身引起的干扰,如距离模糊、发射信号泄露、电源互扰等。外界干扰:即干扰源来自外界,如地物反射杂波、飞鸟和未知来源的电磁干扰污染频谱数据。解决地杂波干扰过强的问题,在硬件设施上可以在天线阵面四周安装电磁屏蔽网,在软件算法上文献[2-4]提出了若干方法。此外,谱平滑、多峰提取、半平面对消和时空域一致性检验等算法被广泛应用在风廓线雷达数据处理领域。

2 抗干扰算法与仿真

2.1 波形设计角度

在风廓线雷达设计过程中,为了获取足够大的探测威力,需要适当增加发射信号占空比;为了获取足够高的空间分辨力,需要限制对回波信号的最大采样时间间隔。两者若搭配不得当,将产生距离模糊或者速度模糊,这属于源自设备自身的由于波形设计产生的干扰,脉冲压缩技术(大时宽带宽乘积信号技术)可以有效地解决这一问题,典型的脉冲压缩信号有线性调频连续波信号和相位编码脉冲信号^[5-6]。

2.2 谱处理角度

谱处理是反演三维风场的关键步骤,影响风谱识别的因素包括直流信号、地杂波、电源串扰、风机扰动、降水粒子回波、昆虫飞鸟等短时突发回波干扰,以及未知来源的频率干扰等。谱平滑、多峰提取、半平面对消和一致性检验等算法被广泛应用在风廓线雷达数据处理领域^[7]。

针对不同类型的干扰信号可用不同的抗干扰算法予以解决。如:通过谱平滑过程可以平滑掉毛刺状干扰,通过时频域分析去掉直流信号干扰,通过高斯模型自适应处理(Gaussian Model Adaptive Processing, GMAP)算法^[8]和小波变换^[3]处理地杂波,根据降水和晴空条件下的不同谱矩特征^[9]通过多风识别算法、特征量提取抑制降水粒子干扰,采用一致性检验屏蔽突发干扰、频率不固定的未知来源干扰等等。

在实际应用中经常要结合众多算法,取长补短,协同完成风谱识别过程。设计干扰抑制算法时要综合考虑算法的有效性、普适性和算法复杂度。本文正是根据这一原则,提出了动态自适应波束选取(Adaptive Dynamic Beam Selection, ADBS)算法,将在下节介绍。这里对兼具有效性、普适性和算法复杂度的一致性检验算法进行仿真,结果如图 1 所示。

图 1 中左侧有若干个距离门出现了不同程度的干扰谱线,星点表示识别出来的径向风速,可见通过对空间上临近高度层的风谱进行一致性检验,可有效抑制干扰对风谱识别的影响。

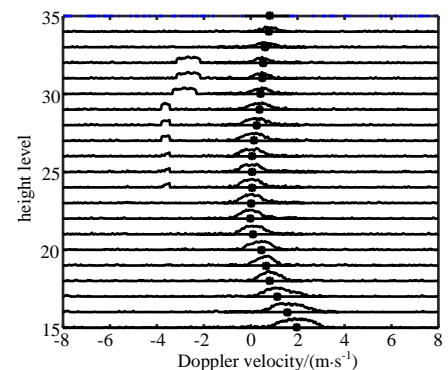


Fig.1 Consistency check result of wind spectrum
图 1 风谱一致性检验结果

2.3 自适应波束控制角度

传统的廓线雷达进行测风的过程中，如何灵活有效地选择波束是面临的一个难题。常采用五波束进行测风，或者指定某 3 个波束进行测风(式(1)~式(3))。文献[10]也从这一角度提出了关于质量控制的相关考虑。本文提出一种基于波束自适应选取的廓线反演方法，力图从波束智能控制的角度进行风廓线雷达数据质量控制，以期达到同时提高数据有效性和利用率的效果。为了表述方便，本文设计的算法将简称 ADBS 算法。本文的创新点集中在风谱识别至廓线反演过程中，如图 2 所示。

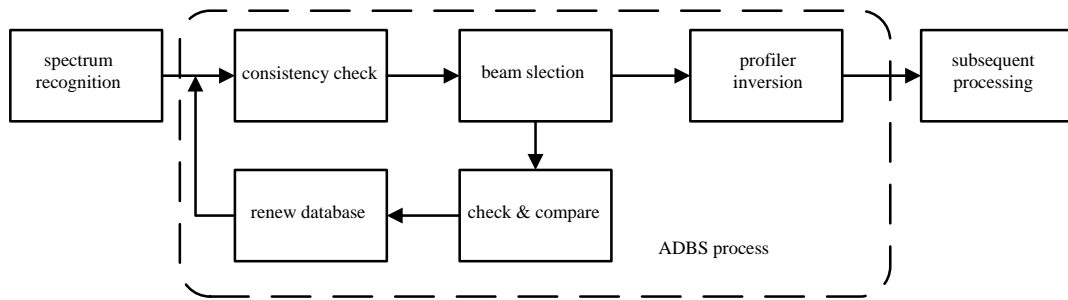


Fig.2 Data processing based on ADBS
图 2 基于 ADBS 算法的数据处理流程图

2.3.1 波束状态转换

ADBS 算法对风廓线雷达的 5 个波束进行评价，依次把每个波束归为可信状态、不可信状态、等待状态中的一类。只有处于可信状态的波束对应的数据才被用来进行风廓线反演。处于不可信状态下的波束在通过对称性检验的条件下可转化为等待状态，如果该波束的连续样本均通过对称性检验，则将该波束置为可信状态。各波束状态之间的转换关系如图 3 所示。

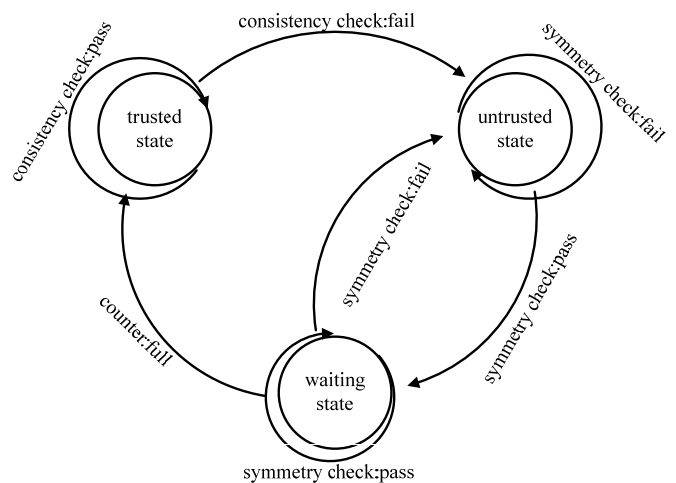


Fig.3 Diagram of beam state transition
图 3 波束状态转换图

2.3.2 ADBS 算法描述

在 ADBS 算法中，当有新的原始探测数据产生时，首先根据当前各波束所处状态决定对各波束进行一致性检验或者对称性检验，然后根据检验结果对历史数据库和波束状态进行更新，同时根据处于可信状态的波束个数决定用四波束或五波束进行风廓线反演。其过程如图 4 所示。

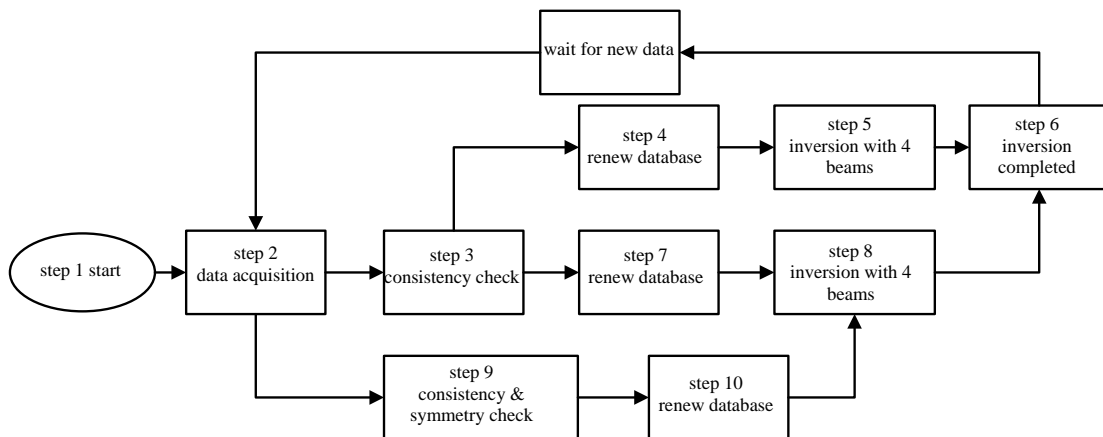


Fig.4 Block diagram of ADBS in details
图 4 ADBS 算法具体实现框图

ADBS 算法开始时刻, 将各波束置为可信状态, 之后在每次进行质量评价后更新各波束状态。根据各波束状态或选择四波束、或选择五波束反演各高度层的水平风速、风向。式(4)给出了当垂直波束处于不可信状态时, 垂直气流的间接计算式:

$$\omega = \frac{1}{4 \cos \theta} (V_e + V_s + V_w + V_n) \quad (4)$$

ADBS 算法至多淘汰掉一个波束, 即判定结果中至少有 4 个波束处于可信状态。

2.3.3 波束质量评价

在 ADBS 算法中, 质量评价分为一致性检验和对称性检验。对于处于可信状态的波束进行一致性检验, 从而确定其是维持可信状态还是被淘汰掉转入不可信状态。对于处于不可信状态或等待状态的波束进行对称性检验, 从而确定其是维持原有状态还是转入等待状态/可信状态。

1) 一致性检验及波束质量评价

一致性检验对处于可信状态的波束有效。任一波束的一致性检验过程如下: 选取该波束历史数据库与当前数据构成 1 组样本, 取样本的径向速度识别结果进行检验。选定参与评价的距离门数记为 N , 针对不同样本的相同高度的速度 $v_{i,j}$ 进行中值检验, 中值检验输出检验后的速度 $a_{i,j}$ 和是否通过中值检验。定义如下计算法则:

$$x \Theta y \Big|_{\eta} = \begin{cases} x, & |x - y| \leq \eta \\ y, & |x - y| > \eta \end{cases} \quad (5)$$

类似的, 对第 i 时刻、第 j 高度层的速度 $v_{i,j}$ 进行时间维 m 度、空间维 n 度的一致性检验可表示为:

$$Y^{(m,n)}(v_{i,j}) = v_{i,j} \Theta \text{mid} \left\{ \begin{array}{ccc} v_{i-\frac{m-1}{2}, j+\frac{n-1}{2}} & \cdots & v_{i, j+\frac{n-1}{2}} & \cdots & v_{i+\frac{m-1}{2}, j+\frac{n-1}{2}} \\ \cdots & & \cdots & & \cdots \\ v_{i-\frac{m-1}{2}, j} & \cdots & v_{i, j} & \cdots & v_{i+\frac{m-1}{2}, j} \\ \cdots & & \cdots & & \cdots \\ v_{i-\frac{m-1}{2}, j-\frac{n-1}{2}} & \cdots & v_{i, j-\frac{n-1}{2}} & \cdots & v_{i+\frac{m-1}{2}, j-\frac{n-1}{2}} \end{array} \right\}_n \quad (6)$$

式中 $\text{mid}\{A\}$ 为集合 A 中元素的中值。在风廓线合成过程中, 一般取:

$$a_{i,j} = Y^{(3,3)}(v_{i,j}) \quad (7)$$

在此处, 规定中值检验后的速度:

$$a_{i,j} = Y^{(1,1)}(v_{i,j}) \quad (8)$$

记第 i 组样本中, 中值检验前后速度不变的高度层个数为:

$$g_i = \text{num} \left\{ v_{i,j} \Big| v_{i,j} = a_{i,j} \right\} \quad (9)$$

则第 i 个样本的评价分数为:

$$e_i = g_i / N \times 100\% \quad (10)$$

取评价分数最高的样本的评价分数作为该波束当前的评价价值, 即:

$$e_{\max} = \max \{ e_i \} = \max \{ g_i / N \times 100\% \} \quad (11)$$

分别对所有可信波束进行评价统计。若只有 4 个处于可信状态的波束, 则各波束全部通过一次性检验。否则, 即 5 个波束都处于可信状态, 则评价价值不小于某一阈值(比如 70%)的波束直接通过一次性检验。在计算水平风速时, 将一致性检验过程中产生的中值检验结果作为输入数据, 相当于将一致性检验过程引入水平风速计算环节。

2) 对称性检验

对称性检验是对未处于可信状态的波束进行的检验过程, 并以此判断该波束是否转变成可信状态。

利用式(1)和式(4)进行单步判断, 即垂直方向的径向风速既可以由中波束直接测得, 也可以由斜波束间接计算得到; 水平风速分量 u 也可以选择不同波束求得, 如式(12)~式(13), 水平分量 v 具有同样特征。

$$u_1 = \frac{V_e - \omega \cos \theta}{\sin \theta} \quad (12)$$

$$u_2 = -\frac{V_w - \omega \cos \theta}{\sin \theta} \quad (13)$$

当产生新数据时，若待检验波束是中波束，则用中波束直接观测到的垂直风速与式(4)计算得到的垂直风速逐个距离门进行对比，若风速差小于阈值(比如 1m/s)的距离门数量占全部距离门数量的 70%以上，则视为通过对称性检验。若待检验的波束是斜波束，则用式(12)和式(13)分别计算 u 或 v 分量，同上述中波束检验方法判断是否通过单次对称性检验。处于不可信状态的波束若通过对称性检验，则转化为等待状态。处于等待状态的波束在满足一定条件的情况下转化为可信状态，否则转化为不可信状态。

2.3.4 算法仿真与讨论

为了验证 ADBS 算法对风廓线质量的改善，用北京无线电测量研究所在某机场临近位置部署的 CFL-03 和 CFL-08 2 部风廓线雷达数据进行仿真。仿真样本为 2 部雷达同一时段的 100 组风廓线数据。以 CFL-08 型风廓线雷达的 2 800 m 处测风结果作为参考值/对照组，对 CFL-03 的原始数据的某一个波束进行干扰并进行风速反演，使用和不使用 ADBS 算法的风速、风向反演结果如图 5 所示。

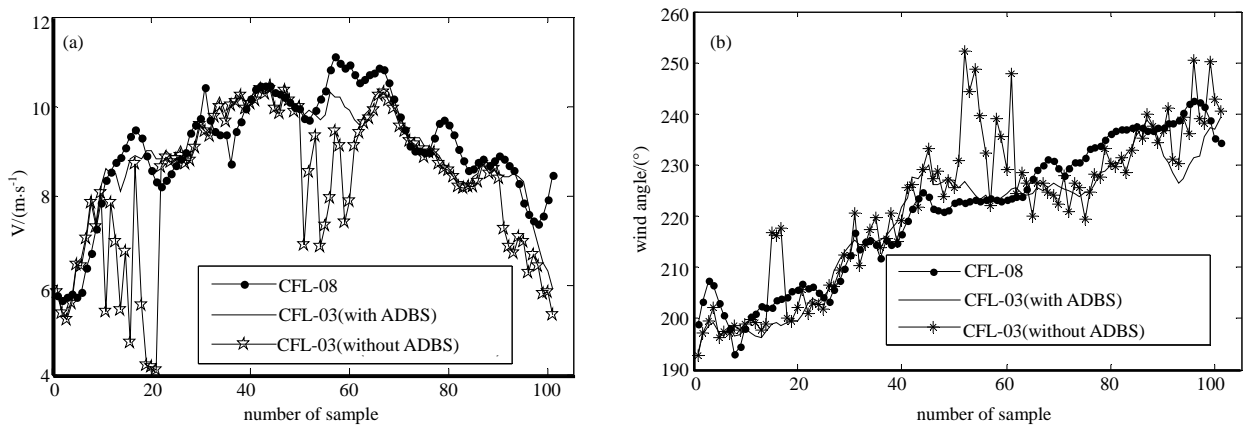


Fig.5 Comparison of ADBS and no-ADBS in wind velocity and wind direction

图 5 ADBS 算法前后的风速风向对比仿真结果

上述仿真表明 CFL-03 型风廓线雷达分别在 3 个时间段发生了某个波束质量较差的现象，使用 ADBS 算法能够明显淘汰掉这个质量差的波束，并在其质量良好时予以恢复。ADBS 算法提高了风廓线雷达数据产品的有效性。

2.3.5 算法复杂度分析

对于风廓线雷达，时域处理和谱识别 2 个过程运算量很大，风廓线反演过程的运算量很小，ADBS 算法独立于时域处理和谱识别，是在风廓线反演过程进行操作，因此引入算法增加的运算量很有限。以 100 个高度层、时域积累数 4、谱平均数 50 为例，采用传统算法输出一组风廓线数据需要进行约 10^8 次加法运算和 2×10^6 次乘法运算；引入 ADBS 算法，仅增加约 5×10^3 次加法运算，即增加了约万分之零点五的计算量，ADBS 算法对数据处理器器的额外运算要求可忽略不计，易于工程应用。

3 结论

本文对影响风廓线雷达探测性能的干扰及抑制干扰方法进行归类讨论，并从波形设计、谱处理和波束质量控制 3 个角度进行抗干扰算法分析。本文着重介绍了 ADBS 算法，仿真结果表明该算法能及时淘汰掉质量差的波束，并在其质量良好时予以恢复。ADBS 算法的创新点在于：

- 1) 首次从波束选取的角度进行动态质量控制；
- 2) 引入波束可信度评价及具体评价方法；
- 3) 引入波束状态转换图，提出波束淘汰和恢复的自适应控制算法。

参考文献：

- [1] 何平. 相控阵风廓线雷达[M]. 北京:气象出版社, 2006. (HE Ping. Phase array profiler radar[M]. Beijing:China Meteorological Press, 2006.)
- [2] 董德保,翁宁泉,孙刚,等. 风廓线雷达地物杂波抑制研究[J]. 大气与环境光学学报, 2009,4(1):69-74. (DONG Debao, WENG Ningquan, SUN Gang, et al. Ground clutter suppression for wind profiler radar[J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2009,4(1):69-74.)

- [3] 丁敏,黄登才,宋金雷. 小波变换去风廓线雷达地杂波技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007,38(1):948-953. (DING Min,HUANG Dengcai,SONG Jinlei. Removing ground clutter from wind profiler data using wavelet[J]. Journal of Central South University of Technology(Natural Science Edition), 2007,38(1):948-953.)
- [4] 张雯雯,刘黎平,阮征,等. 风廓线雷达去地杂波方法研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011,47(1):79-84. (ZHANG Wenwen,LIU Liping,RUAN Zheng,et al. Ground clutter suppression of wind profiler radar[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011,47(1):79-84.)
- [5] 杜仕雄,田殷,杨杰. 线性调频雷达全相参技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5):821-824. (DU Shixiong, TIAN Yin,YANG Jie. Full coherent technology of linear frequency modulation radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):821-824.)
- [6] 李健,孙光才,景国彬,等. 一种距离相位编码距离模糊抑制技术[J]. 现代电子技术, 2018,41(13):1-4. (LI Jian,SUN Guangcai,JING Guobin,et al. A range ambiguity suppression technology based on range phase coding[J]. Modern Electronics Technique, 2018,41(13):1-4.)
- [7] 杜言霞,陈州川,吴勇凯,等. 风廓线雷达数据处理过程及产品质量控制介绍[J]. 气象水文海洋仪器, 2018,9(3):4-8. (DU Yanxia,CHEN Zhouchuan,WU Yongkai,et al. Introduction for wind profiler radar data processing and product quality control[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2018,9(3):4-8.)
- [8] 何建新,王旭,刘艳. 自适应高斯频域滤波器在天气雷达中的应用[J]. 气象, 2010,36(6):117-121. (HE Jianxin, WANG XU,LIU Yan. Application of adaptive Gaussian frequency filter to weather radar[J]. Meteorological Monthly, 2010,36(6): 117-121.)
- [9] 廖菲,邓华,侯灵. 降水条件下风廓线雷达数据质量分析及处理[J]. 热带气象学报, 2016(5):588-596. (LIAO Fei, DENG Hua,HOU Ling. Quality analysis and process of wind profiler data on rain condition[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2016(5):588-596.)
- [10] 胡明宝,贺宏兵,李妙英,等. 风廓线雷达 5 波束校验计算风的方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013,14(3): 293-296. (HU Mingbao,HE Hongbing,LI Miaoying,et al. Method using five beams to checkout calculate wind in profiler[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013,14(3):293-296.)