

C-波段测风一次雷达的跟踪特性 及其应用前景*

黄炳勋

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

提 要

利用我国研制的第一部 C-波段测风一次雷达样机在成都和郑州试验现场取得的大量测试和施放记录, 对该雷达跟踪固定目标的静态特性和活动目标的动态特性作了进一步统计分析. 结果表明, 在跟踪固定目标时, 该雷达有很高的跟踪精度; 在跟踪实际活动反射靶时, 跟踪数据的离散度比跟踪固定目标时大, 并指出, 采用适当的滑动平均措施减小原始数据的离散度, 并选择合适的计算水平风的时间间隔, 就可获得精度高(如 1m/s)而层结精细度合适的高空风廓线.

关键词: C-波段测风一次雷达; 雷达跟踪精度; 高空风观测; 近地层风廓线观测.

1 引 言

1991年第一部 C-波段测风一次雷达样机在成都 784 厂研制成功, 由于是第一部样机, 没有进靶场进行严格测试及与更高精度雷达对比施放, 但国家气象局在成都双流机场跑道上用固定目标法组织了静态跟踪特性测试. 此后该雷达又在郑州站进行现场试验, 取得了大量实际施放记录, 为进一步了解该雷达的动态跟踪特性提供了大量原始数据.

成都测试只是笼统地统计计算了 5 次(每次 4 分钟)雷达跟踪数据(每次每一参数 120 个数据)的平均离散度(均方差). 但高空风往往是用较短时间间隔内的跟踪数据计算的, 因此对于在目标固定的情况下雷达原始跟踪数据在短时间内的特征是否与长时间内的特征一致还须进行考察. 再者, 测风一次雷达跟踪的实际目标是随气球升空的活动反射靶, 我们要了解进入靶场与更高精度雷达进行对比施放以前, 能否设法利用实际施放记录统计计算其动态跟踪特性呢? 最后, 根据雷达-反射靶这一系统的动态跟踪特性, 各种用户如何合理地处理雷达跟踪数据以便得到合乎各自要求的高空风廓线, 更是使用者关心的问题. 本文在这几方面得到了一些初步结果和看法.

* 由“七五”国家气象局重点课题“C-波段雷达电子探空仪”资助.

1993-09-08 收到, 1994-01-10 收到修改稿.

2 对固定目标的静态跟踪特性

2.1 模拟测试

1991年5月在成都双流机场跑道上组织了一次对固定目标的静态跟踪模拟测试,测试是这样安排的:把雷达架设在跑道的一端,在相距1km的另一端立一铁塔,装上雷达的发射喷口;雷达发射的脉冲经电缆及延时电路延迟后由喷口发出,再由雷达天线接收;雷达跟踪数据每2s采集一次,连续采集4min;然后分别计算120个跟踪数据的平均值及偏离平均值的均方差.如此反复5次,由此得出的仰角、方位角和斜距的5次平均均方差比原设计指标(0.06°,0.06°,16m)小了2倍左右.因此就长时间平均而言,该雷达对固定目标有很高的跟踪精度.

2.2 测试结果

图1是一次4min原始数据的分析结果(距离离散度 σ_r 、方位角离散度 σ_a 及仰角离散度 σ_b 分别为5.8m、0.018°和0.012°),其余4次情况接近,图中原始跟踪数据(点线)在短时间内的局部离散度随时间起伏很大,极大值可能比4min平均离散度大1倍左右,但仍然优于原设计指标.为了解滑动平均对减小离散度能起多大作用,又用同样方法进一步计算了经滑动平均后的7点跟踪数据偏离4min平均值的局部离散度及4min平均离散度(滑动后仰角、方位角、距离的平均离散度分别为0.007°、0.01°、2m).图1实线表明,原始

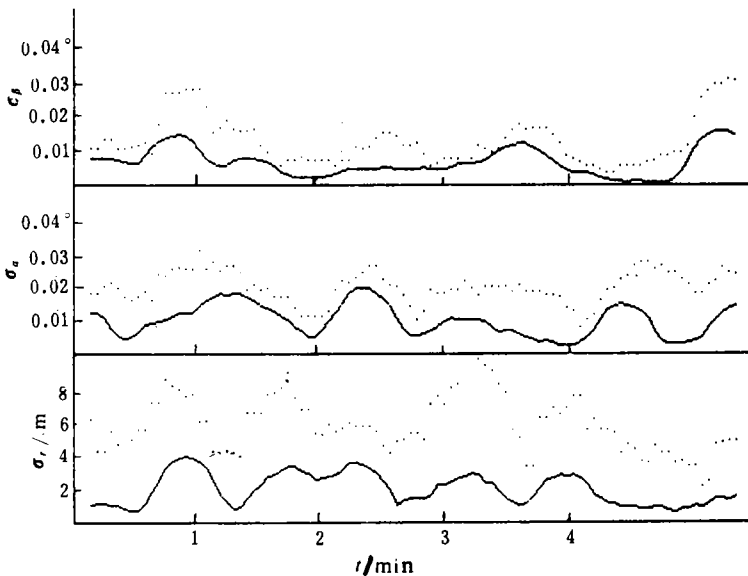


图1 雷达原始跟踪数据的局部离散度实例(点线:光滑前 实线:7点光滑后)

Fig. 1 An example of local discrepancy of raw tracking data of the radar

(dot line; no smoothed, solid line: 7 points smoothed)

数据经 7 点滑动平均后的局部离散度随时间起伏明显减小,局部和 4min 平均角跟踪数据的离散度可减小 1 倍左右,而距离跟踪离散度可减小 2/3,因此对密集原始跟踪数据先进行光滑是减小离散度的可取措施.当然,如果进行 15 点或更多点滑动平均,可进一步减小离散度,但多点滑动平均是以增加计算时间和牺牲风廓线的精细结构为代价的.因此究竟用多少点进行滑动平均比较合适,需从雷达跟踪精度潜力、计算机计算速度、用户对风廓线精度及层结精细度的要求等多方面权衡而定.本文由于是初步探索,权且先用 7 点(14s,约 100m 气层厚度)进行光滑.

3 样机对活动反射靶的动态跟踪特性

3.1 对活动反射靶跟踪的离散度

对于一次雷达测风这一特定情况来说,雷达跟踪的目标是挂在气球下随周围气块运动并在气块内以 400m/min 左右升速上升的反射靶.由于大气运动存在着不同尺度的湍流,球-靶系统也呈现出各种不规则运动.靶的姿态和轨迹变化相当复杂,靶的姿态变化会导致回波幅度的起伏,增大跟踪数据的离散度.此外,随着距离的增加,大气折射率的脉动变化等因素对雷达波传输的影响也有可能随之增大.显然,除大气湍流及大气折射率的脉动属大气本身固有外,其它因素虽然不能完全归因于雷达本身,但也应归因于雷达-气球-反射靶这一测风系统整体.与对固定目标的静态跟踪特性相比,大气和雷达-靶系统这两方面因素综合作用的结果,使雷达对活动反射靶的实际动态跟踪数据的离散度有所增大.

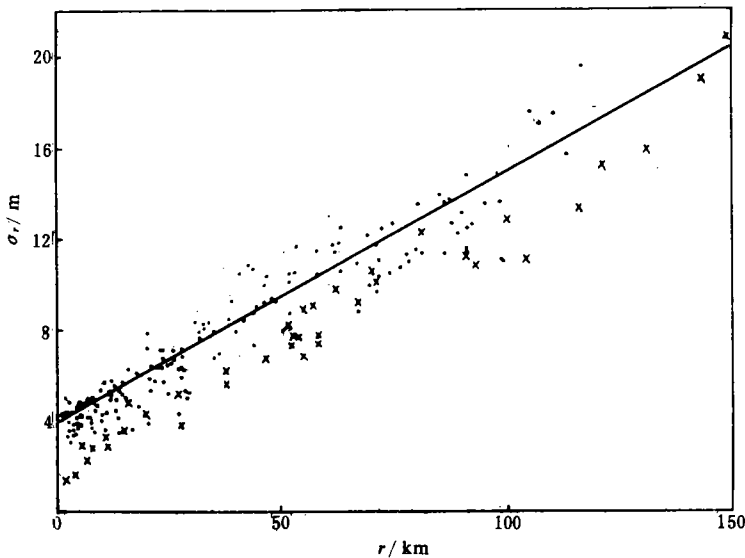


图 2 距离均方差(σ_r)随距离变化情况(“·”:35cm 靶,“×”:50cm 靶)

Fig. 2 Mean square deviation of range (σ_r) as a function of range (dot:35cm target, cross:50cm target)

下面是对大量 35cm 靶(3min 的平均离散度)实际施放记录的统计结果:

- (1)从施放点到 100km,距离的平均离散度从 4m 近乎线性地增加到 15m 左右(图 2).
- (2)从施放地点到 20km,仰角的平均离散度从 0.15°以上逐渐减小到 0.025°左右,然后逐渐增加,到 100km 达 0.045°左右(图 3).

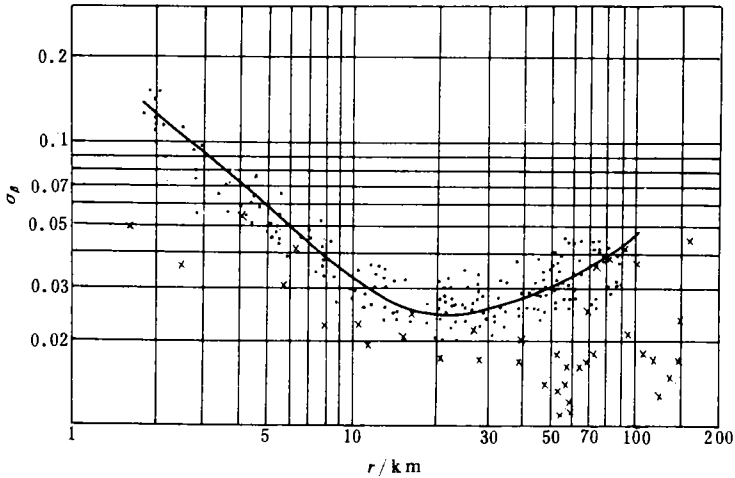


图 3 仰角均方差(σ_θ)随距离变化情况(图注同图 2)

Fig. 3 As in Fig. 2, but for elevation (σ_θ)

- (3)从施放地点到 20km,方位角的平均离散度从 0.3°以上逐渐减小到 0.04°左右,然后逐渐增加,到 100km 达 0.05°左右(图 4)

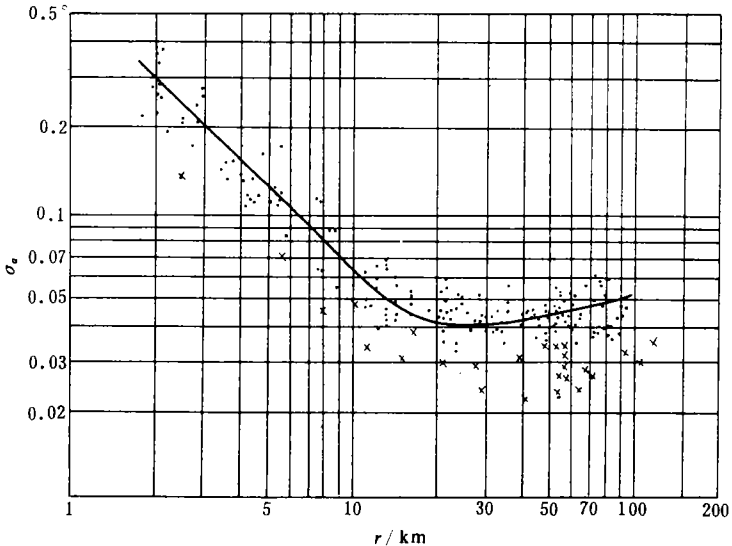


图 4 方位角均方差(σ_α)随距离变化情况(图注同图 2)

Fig. 4 As in Fig. 2, but for azimuth (σ_α)

图 2~图 4 表明,50cm 靶比 35cm 靶的均方差小一些,此外,根据上节对固定目标统

计分析的结果推测,在跟踪活动反射靶情况下短时间(如 14s)内的局部离散度也有可能比上述 3min 平均离散度大一些.但如果预先对原始跟踪数据进行诸如 7 点滑动平均,局部离散度也有可能减小一些.因此图 2~图 4 统计结果可以近似看作反射靶原始跟踪数据经 7 点滑动平均后短时间内可能出现的最大均方差.

反射靶距离近时角跟踪离散度大的原因与目标角度变化大、闪烁大有关.但据 M. I. 斯科尔尼克分析^[1],这些影响应随距离增加迅速减小,并且被大气折射率脉动变化等引起的传播起伏等因素的影响所湮没.从图 3 和图 4 对这部雷达跟踪数据的统计结果看,过渡距离大概在 20km 左右.

3.2 最小跟踪距离限制及探测近地层风廓线的潜力

从郑州实际施放情况看,气球在离雷达 180m 以外地点升空,仰角上升到 6°以上即反射靶离雷达所在水平面 20 多米高时,雷达即可自动跟踪上目标,实测到近地层风的精细廓线(见图 5),因而可以成为近地层风廓线观测的得力工具.

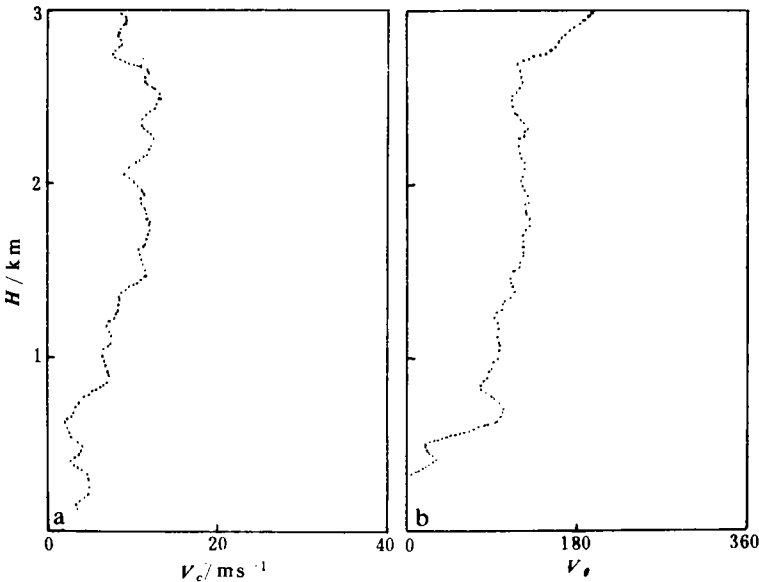


图 5 用 16s 间隔计算的 3km 以下近地层精细风廓线(a)风速 V_c .(b)风向 V_d

Fig. 5 Fine wind profile in the near surface layer below 3km calculated using 16s interval (a) wind velocity V_c (b) wind direction V_d

3.3 最低保精度工作仰角

目标仰角下降到一定程度,由反射靶反射回来的部分回波有可能经地面反射后从天线旁瓣进入,与从天线主瓣进入的回波产生叠加,引起角度的虚假起伏.图 6 点线是在机场跑道上测得的下降记录,可以看到,目标仰角下降到 4°以下后开始出现起伏(设计指标为 5°);随着目标的继续下降,起伏的幅度越来越大,可达 1°以上.图 6 实线是天线架设在郑州站四楼顶上(天线离地 18m)后取得的记录.可以看出,目标仰角下降到 1°以下才出

现起伏.因此单从最低工作仰角考虑,雷达架设在四楼顶似乎是有利的.但由于楼顶太高,刚放球时,反射靶离地近,仰角太低,背景地物回波影响太大,因此不利于施放瞬间抓球.根据成都和郑州试验的经验,天线架设在一、二层楼顶上可能比较合适.

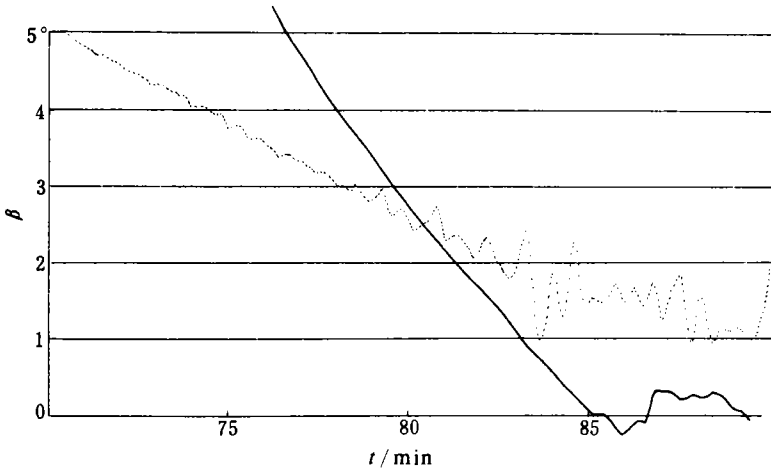


图6 目标仰角太低时仰角数据起伏实例(点线:天线在地面上;实线:天线在四楼顶上)
 Fig.6 An example of elevation fluctuation with the elevation down to below 5°
 (dot line: the antenna on the ground, solid line: the antenna on the top of 4th upstairs)

4 C-波段一次雷达的测风性能及不同的测风计算处理方法

高空风水平分量 V 的气球测量法是根据气球或靶在相邻时间间隔 τ 内的水平投影的位移量 δL 计算的,即 $V = \delta L / \tau$. 分析表明,一次雷达测风误差 δV 可用下式表达:

$$\delta V = \sqrt{2(\cos^2\alpha(\delta R)^2 + R^2\sin^2\alpha(\delta\alpha)^2 + R^2\cos^2\alpha(\delta\beta)^2)} / \tau$$

其中括号内的第一项误差较小,第三项较大.上述误差公式表明,可从两方面来提高平均水平风的计算精度:一是加大计算风的时间间隔 τ ,一是对原始数据进行适当的滑动平均.根据上节对原始跟踪数据离散情况的分析,如先对原始跟踪数据进行诸如 7 点滑动平均,则斜距在 10km 以内, $\delta V \approx 16/\tau$. 如希望测风精度达 1m/s,则时间间隔 τ 需取 16s 以上.斜距达 100km 时, $\delta V \approx 120/\tau$. 若测风精度达 1m/s,则时间间隔应取 120s 以上.图 5、图 7、图 8 是在低、中、高三个高度 (H) 上分别用 16、60、120s 间隔计算的风廓线实况,可以看到,廓线是相当光滑的.

图 9 是用与图 5 同一份记录处理计算而得的近地层风廓线,不过图 9 是用 60s 时间间隔计算的.显然,增加时间间隔的结果是部分光滑掉了层结的精细结构.众所周知,有的用户可能对近地层风的精细结构感兴趣.但精细结构往往是局地性的,随时间变化较快.图 10 是相隔仅一小时的两条近地层精细风廓线.可以看到,大趋势一致,但精细结构已有较多变化.显然这样的精细结构对大尺度天气没有代表意义.而且保留过多的精细结构必然会增加不必要的特性层,从而增加报务费用.因此比较实际的办法是:在近地层可用较短的时间间隔以取得较精细的风结构;但随着高度的增加应相应地增加间隔以便过滤掉

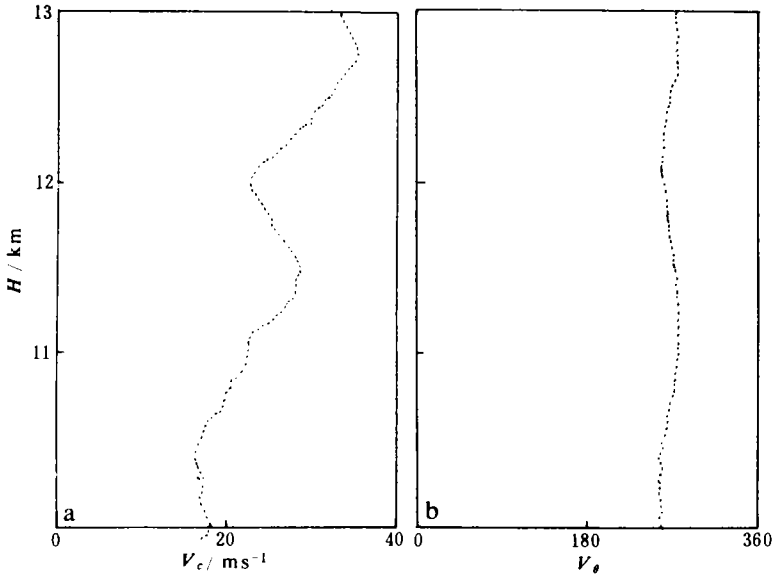


图 7 用 60s 间隔计算的 10~13km 高空风廓线 (a)风速 V_c . (b)风向 V_θ

Fig. 7 As in Fig. 5, but for in 10~13km, 60s interval

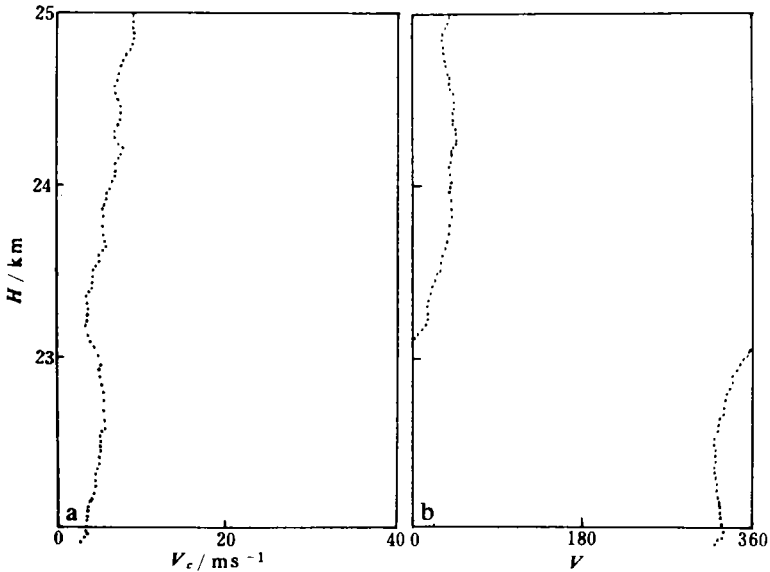


图 8 用 120s 间隔计算的 22~25km 高空风廓线 (a)风速 V_c . (b)风向 V_θ

Fig. 8 As in Fig. 5, but for in 22~25km, 120s interval

没有代表性的局地影响. 至于用多大时间间隔合适, 则须根据用户的具体需要及雷达-反射靶系统的跟踪精度潜力来定. 对于主要满足大、中尺度天气分析需要的国家站网的常规观测业务来说, 我们拟采用这样的处理计算方法: 先对反射靶水平投影位置的东、西、南北分量, 而不是雷达跟踪参数本身作 7 点滑动平均, 然后把时间间隔从地面的 30s 一直增加

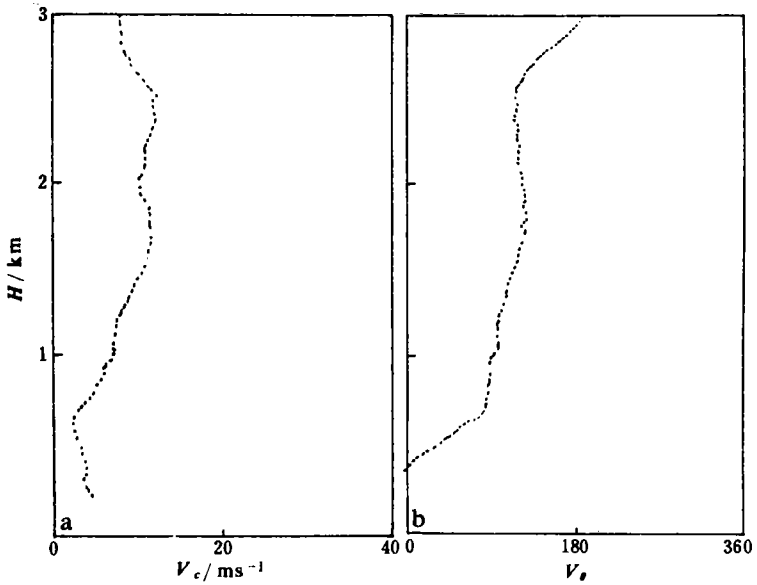


图9 用60秒间隔计算的3km以下近地层平滑风廓线 (a)风速 V_c (b)风向 V_d
 Fig.9 As in Fig.5, but for 60s interval

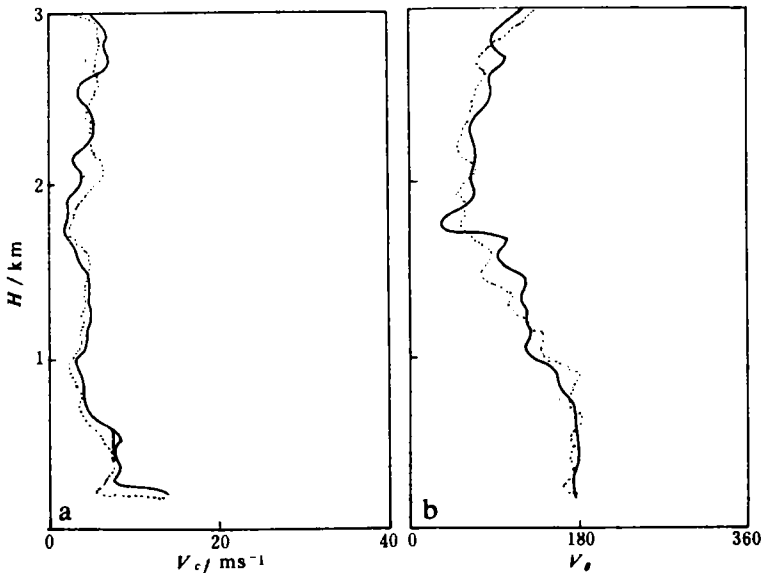


图10 3km以下近地层间隔仅1小时的两条精细风廓线 (a)风速 V_c (b)风向 V_d
 Fig.10 Two fine wind profiles within one hour in the near surface layer below 3km
 (a)wind velocity V_c (b)wind direction V_d

到高空20km以上的120s,每隔2s计算出风的东、西、南、北分量及风速、风向廓线,然后以这些廓线为基础,选择特性层,内插规定层的风向风速.图11是用上述方法计算出来的一

条高空风廓线实例.

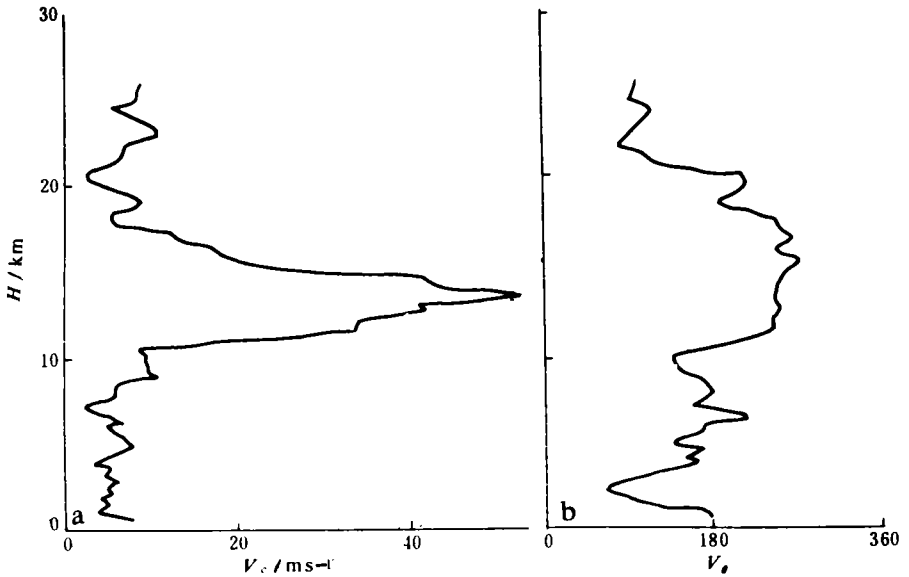


图 11 常规高空风廓线实例 (a) 风速 V_e (b) 风向 V_e

Fig. 11 Conventional upper-air wind profile (a) wind velocity V_e (b) wind direction V_e

5 结 语

用我国研制的第一部 C-波段测风一次雷达样机,对在成都和郑州试验现场取得的大量测试和施放记录作了统计分析,得出的初步结果表明,在跟踪固定目标时,对于几分钟跟踪数据的离散度而言,该雷达有很高的跟踪精度;但在较短的十几秒钟内的局部离散度可能大 1 倍左右.在跟踪实际活动反射靶时,可能由于受大气湍流及大气折射率脉动变化等因素的影响,跟踪数据的离散度比跟踪固定目标时大.但由于 C-波段雷达系统的数据采样率高,如果系统终端采用高速计算机,充分利用系统采集的全部原始数据,采用适当的滑动平均措施减小原始数据的离散度,并选择合适的计算水平风的时间间隔,就可获得精度高(如 1m/s)而层结精细度合适的高空风廓线.在开阔的平地上,该雷达的保精度最低工作仰角达 4° 以下.如把天线架设在一、二层楼顶上,最低工作仰角更低,完全满足我国强西风带高空风观测业务的要求.我国高空站网部署 C-波段雷达系统后,高空风观测记录的质量将有很大的提高.此外,如能在 180m 以外地点放球, C-波段雷达也可成为近地层精细风廓线观测的得力工具.

参 考 文 献

- 1 斯科尔尼克 M I. 雷达手册(第八分册).北京:国防工业出版社,1974. 51~65.

TRACKING FEATURES OF THE C-BAND WIND-FINDING PRIMARY RADAR AND ITS PROSPECT OF UTILIZATION

Huang Bingxun

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract

Utilizing a vast amount of raw data obtained from the field test and flighting experiments in Chengdu and Zhengzhou for the first C-band wind-finding prototype radar in China, the static features of tracking a fixed target and the dynamic features of tracking a moving target have been analysed in detail. The results indicate that in the case of a fixed target to be tracked, this radar has a very high tracking accuracy. In the case of a moving target to be tracked, the discrepancy of the tracking data will increase still further. Fortunately, the rate of data collection of the radar is very high. Using suitable smoothed method and selecting suitable temporal interval for the calculation of wind aloft, the wind profile with high accuracy (e. g. 1 m/s) and moderate fineness of its stratification can be obtained.

Key words: C-band wind-finding primary radar; Tracking accuracy of radar; Upper-wind observation; Wind profile observation of surface layer.