

# 多普勒天气雷达站址视程的客观分析技术\*

万玉发 杨洪平 肖艳姣 吴翠红 徐向明

(湖北省气象局, 武汉 430074)

## 提 要

开发了多普勒天气雷达候选站址视程的客观分析软件. 该软件根据候选站及其四周一定范围内的地理信息, 十分快速地求算和自动绘制雷达单站的遮蔽角图、系列等射束高度图和多个雷达站 Mercator 或 Lambert 投影方式下的等射束高度拼图, 提供了分析和评价候选站雷达有效视程和相关雷达网共同覆盖效果以及定量应用雷达资料的客观工具.

关键词: 多普勒雷达站 视程 客观分析

## 引 言

根据中国气象局有关部门的要求, 目前全国许多地方都在开展选择多普勒天气雷达站址的工作. 多普勒天气雷达站址的确定需要考虑多种复杂因素, 对站址四周的净空条件进行客观分析是其中一项很重要的基础工作. 早在欧共体 COST-73 项目中, 就强调雷达站选择必须考虑几个要素, 其中最重要的是雷达视程, 而这一点很大程度上依赖于雷达站的位置、地理环境和电磁波在大气中的折射<sup>[1]</sup>. 为了方便地根据候选站及其四周一定范围内的地理信息(高大建筑物、山脉等遮挡物的经度、纬度和拔海高度)求算并比较多个候选站或某一候选站不同天线架设高度的雷达视程(即有效探测边界 UDB<sup>[2]</sup>), 以确定一个较理想和可接受的雷达站址和建设方案, 我们开发了多普勒天气雷达候选站址视程的客观分析软件. 该软件能快速计算和绘制雷达单站不同天线架设高度的遮蔽角图、系列等射束高度图和多个雷达站等射束高度拼图, 该软件已在全国气象部门多普勒天气雷达选址工作中推广使用. 本文简要地介绍其制作原理、实现过程, 并对有关雷达探测中的若干问题进行了初步讨论.

## 1 雷达等射束高度图制作原理

所谓雷达等射束高度图, 就是根据雷达站四周地形、地物, 考虑其阻挡作用, 绘出某一高度的目标能被雷达波束照射到的最大距离随方位的变化. 为了制作等射束高度图, 首先要知道在地球表面上雷达四周各遮挡点相对于雷达站的方位和遮挡仰角.

\* 本工作得到中国气象局监测网络司的资助.  
1999-07-29 收到, 2000-01-20 收到修改稿.

1.1 遮挡点相对于雷达站的方位角

如图 1 所示, 设  $Q$  点为雷达天线所在点,  $K$  为任一遮挡点,  $a$  为某一遮挡点相对雷达站的方位角,  $Z$  为  $Q$  到  $K$  段弧线所对应的弧度,  $(\lambda_0, \varphi_0)$  为雷达站的经纬度,  $(\lambda, \varphi)$  为遮挡点  $K$  的经纬度, 由球面三角公式可以得出<sup>[3]</sup>:

$$\sin a = \cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0) / \sqrt{1 - \cos^2 Z} \quad (1)$$

其中

$$\cos Z = \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos(\lambda - \lambda_0) \quad (2)$$

设  $C = |\cos \varphi \sin(\lambda - \lambda_0) / \sqrt{1 - \cos^2 Z}|$  则有

$$a = \begin{cases} \arcsin C & \text{当 } \lambda \geq \lambda_0, \varphi \geq \varphi_0 \text{ 时} \\ \pi - \arcsin C & \text{当 } \lambda \geq \lambda_0, \varphi < \varphi_0 \text{ 时} \\ \pi + \arcsin C & \text{当 } \lambda < \lambda_0, \varphi < \varphi_0 \text{ 时} \\ 2\pi - \arcsin C & \text{当 } \lambda < \lambda_0, \varphi \geq \varphi_0 \text{ 时} \end{cases} \quad (3)$$

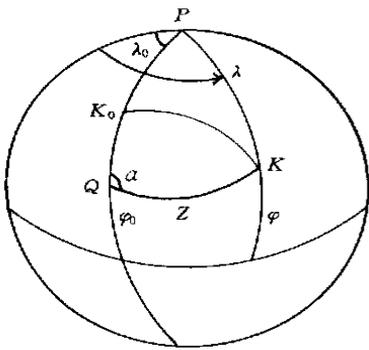


图 1 方位角示意图

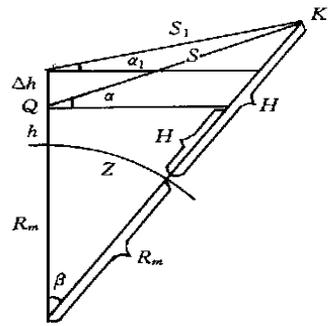


图 2 仰角示意图

1.2 遮挡点相对于雷达站的遮挡仰角

如图 2 所示,  $H$  为遮挡点的拔海高度,  $h$  为雷达天线拔海高度,  $\alpha$  为遮挡点相对于雷达站的遮挡仰角,  $R_m$  为等效地球半径,  $S$  为  $Q$  到  $K$  的直线距离, 则有

$$H_1 = (h + R_m) / \cos Z - R_m \quad (4)$$

由斜三角形余弦定理得

$$S = \sqrt{(h + R_m)^2 + (H + R_m)^2 - 2(h + R_m)(H + R_m)\cos Z} \quad (5)$$

由斜三角形正弦定理有

$$S / \sin Z = (H + R_m) / \sin(\pi/2 + \alpha) \quad (6)$$

令  $C_1 = \frac{(H + R_m) \sin Z}{S}$ , 则有

$$\alpha = \begin{cases} \pi/2 - \arcsin C_1 & \text{当 } H \geq H_1 \text{ 时, } \alpha \geq 0 \\ \arcsin C_1 - \pi/2 & \text{当 } H < H_1 \text{ 时, } \alpha < 0 \end{cases} \quad (7)$$

1.3 探测斜距

如图 3 所示, 已知雷达某一方向的遮挡仰角为  $\alpha$ , 则在这个方向雷达以此仰角在标准

大气折射情况下探测时所看到的高度为  $H_m$  目标物的斜距  $S_1$  为:

$$S_1 = (h + R_m) \sin \beta / \sin \gamma \tag{8}$$

其中  $\beta = \frac{\pi}{2} - (\alpha + \gamma)$ ,  $\gamma = \arcsin[(h + R_m) \sin(\frac{\pi}{2} + \alpha) / (H_m + R_m)]$

如图 4 所示, 作为特例, 考虑雷达能作俯视探测, 对于高度为  $H_m$  的目标物, 当雷达波束与地面相切时所得到的探测距离最大, 设为  $S_0$ , 此时天线仰角为  $\alpha_1$ , 并有

$$S_0 = R_1 + R_2 \tag{9}$$

$$\begin{aligned} \text{其中, } R_1 &= \sqrt{(h + R_m)^2 - R_m^2}, R_2 = \sqrt{(H_m + R_m)^2 - R_m^2} \\ \alpha_1 &= - \arccos[R_m / (h + R_m)] \end{aligned} \tag{10}$$

式中  $R_m$  为标准大气折射下的等效地球半径.

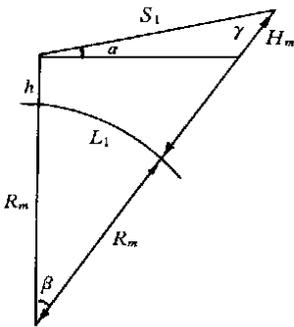


图 3 雷达以仰角  $\alpha$  探测高度为  $H_m$  目标物的探测斜距

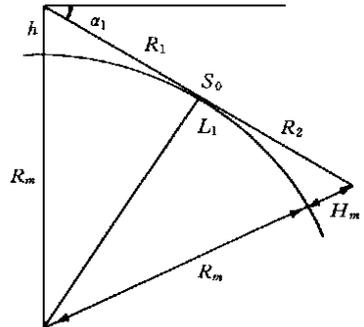


图 4 雷达俯视探测高度为  $H_m$  目标物的探测斜距

如果计算出来的某一方向的遮挡仰角  $\alpha < \alpha_1$ , 那么雷达以此仰角探测时, 雷达波束将会与地表相交, 雷达只能看到  $R_1$  范围内高度低于雷达架高的目标物.

1.4 探测斜距对应的球面距离

以上所求  $S_1$  对应的球面距离  $L_1$  都可按下式求得:

$$L_1 = R_m \cdot \arccos\left[\frac{(h + R_m)^2 + (H_m + R_m)^2 - S_1^2}{2(h + R_m)(H_m + R_m)}\right] \tag{11}$$

1.5 多部雷达等射束高度拼图

确定多普勒天气雷达站址, 不仅要分析雷达单站等射束高度图, 还应制作相关雷达网的等射束高度拼图. 也就是说要以雷达网的综合覆盖效果来确定雷达站址.

文献[2, 4]曾对如何从单部雷达图像形成大范围拼图的坐标转换问题作过详细描述, 所实现的拼图业务也已运行了整整 10 年. 事实上, 从单部雷达等射束高度图到多部雷达等射束高度拼图的变换原理与文献[2, 4]是一致的.

设单站雷达等射束高度图的直角坐标表示为  $(x, y)$ , 对应的地理坐标表示为  $(\varphi, \lambda)$ , 底图坐标表示为  $(X, Y)$ , 其中  $X = \Phi_1(\varphi, \lambda)$ ,  $Y = \Phi_2(\varphi, \lambda)$ ,  $\Phi_1, \Phi_2$  为转换函数, 投影方式一经确定,  $\Phi_1$  和  $\Phi_2$  即可得出. 令  $\varphi = \varphi(x, y)$ ,  $\lambda = \lambda(x, y)$ . 故整个坐标变换过程可简单地表示为:

$$\begin{aligned} X &= \Phi_1[\varphi(x, y), \lambda(x, y)] \\ Y &= \Phi_2[\varphi(x, y), \lambda(x, y)] \end{aligned} \quad (12)$$

$(\varphi, \lambda)$  与  $(x, y)$  的关系为<sup>[4]</sup>:

$$\begin{aligned} \varphi &= \arcsin \left| \cos \left( \frac{x^2 + y^2}{R} \right) \cdot \sin \varphi_r + \sin \left( \frac{x^2 + y^2}{R} \right) \cdot \cos \varphi_r \cdot \frac{y}{x^2 + y^2} \right| \\ \lambda &= \arcsin \left| \frac{x \cdot \sin \left( \frac{x^2 + y^2}{R} \right)}{x^2 + y^2 \cdot \cos \varphi} \right| + \lambda_r \end{aligned} \quad (13)$$

式中  $\varphi_r, \lambda_r$  分别为雷达站的纬度和经度,  $R$  为真实地球半径,  $(x, y)$  可由  $(a, L_1)$  转换而来。根据(13)式及文献[4]有关投影坐标公式, 即可将任一雷达单站等射束高度图转换到 Lambert 或 Mercator 投影方式下新的坐标系中, 实现多部雷达等射束高度拼图。

## 2 实现过程

### 2.1 数据获取

有了上述一系列公式, 从原理上讲可以实现雷达站视程的客观分析。但要使制作出来的遮蔽角图和等射束高度图能真实地反映雷达四周的遮挡情况以及雷达的有效探测范围, 除了制作原理正确可靠外, 首先必须获取各种相关数据。

1) 正确读取雷达站的经度、纬度和拔海高度。

2) 用高分辨率地图读取雷达站四周对雷达站构成遮挡的各遮挡物的经度、纬度和拔海高度。由于在同一地区需对多个候选站址视程进行分析比较, 对于某一遮挡物, 应按不同高度和同一高度的不同方位读取多组数据。

3) 用经纬仪读取雷达站四周地图上读不到的新建高大建筑物相对于雷达站的方位和遮挡仰角。当候选站址改变时, 应在新的站址上用经纬仪重新测量和读取方位和遮挡仰角数据。严格地讲, 当雷达天线架设高度不同于经纬仪架设高度时, 用读取的遮挡仰角数据计算该候选站雷达探测视程是存在误差的。

4) 不同架设高度遮挡仰角的转换。对于从地图上读不到的某一近距离的高大遮挡物, 在雷达站址某一高度  $(h)$  上用经纬仪测量的遮挡仰角  $(\alpha)$ , 在已知该遮挡物的拔海高度  $(H)$  或距离  $(S)$  的情况下, 是可以转换成不同雷达天线架设高度  $(h + \Delta h)$  上的遮挡仰角  $(\alpha_1)$  的(见图 2):

$$\alpha_1 = \arccos \left( \frac{S \cdot \cos \alpha}{\Delta h^2 + S^2 - 2 \cdot \Delta h \cdot S \cdot \sin \alpha} \right) \quad (14)$$

其中

$$S = \sqrt{(R_m + H)^2 - (R_m + h)^2 \cdot \cos^2 \alpha} - (R_m + h) \cdot \sin \alpha$$

事实上, 我们使用一般的经纬仪是读不到遮挡物的高度和距离的, 但可通过实地有关建筑物资料了解到拔海高度。

### 2.2 软件功能

图 5 为该软件的流程框图, 该软件主要具有两大类功能, 即数据处理和产品生成。

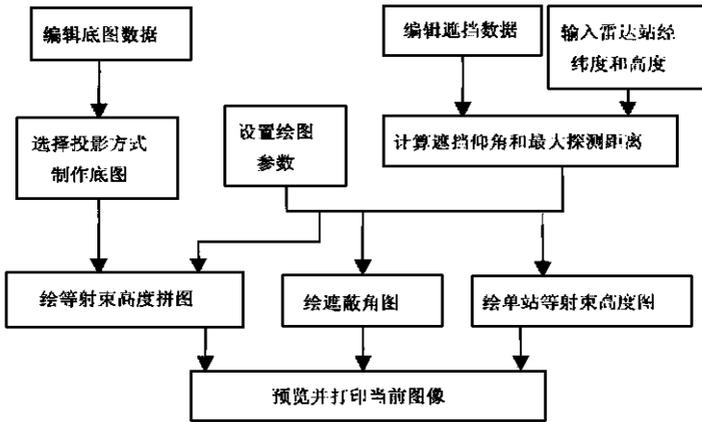


图 5 软件流程图

### 2.2.1 数据处理

数据处理主要包括各地理遮挡数据的编辑, 底图数据的编辑, 候选雷达站相关参数的设置, 各种计算参数的选择, 投影变换与逆变换处理, 以及遮挡方位、遮挡仰角、等射束高度的距离(斜距和水平距离)的计算等功能。在软件中还进行了以下 3 点特殊处理:

1) 在计算探测斜距之前, 确定“是否考虑负仰角”选项。如果不考虑负仰角, 则当遮挡仰角小于零时或在无遮挡区都以零仰角来计算探测斜距。如果考虑负仰角, 在无遮挡区则以雷达波束与地面某一设定高度相切时的仰角来计算探测斜距。

2) 在计算过程中可能会出现这种情况: 即使高大遮挡物离雷达较远, 也会引起较大的遮挡仰角, 如果以此仰角来计算某一设置高度(如 3 km)目标物的最大探测斜距, 该斜距就会小于遮挡点相距雷达的距离, 而事实上雷达能以较低的仰角探测到遮挡点处此高度的目标物, 此时应把遮挡点的海拔高度设为该高度, 然后重新计算遮挡仰角和探测斜距。

3) 在显示图像时, 如果在方位显示分辨率里有多组数据, 那么显示的是遮挡仰角最大的那一组。

### 2.2.2 产品生成

一旦地理信息(即雷达站和各遮挡物的经纬度及海拔高度)和其他有关参数(如雷达天线架高、投影方式、拼图范围等)输入计算机后, 该软件能十分快速地绘制如下产品:

1) 雷达单站的遮蔽角图。该图反映了雷达站四周的遮挡物对雷达站造成的遮挡仰角随方位的分布, 如图 6。

2) 雷达单站的系列等射束高度图, 1~6 km 任选或多个高度组合均可。图 7 为武汉多普勒天气雷达站 1 km、3 km 和 6 km 等射束高度图, 这里的 1 km 是指相对于雷达天线的高度。

3) 分布于不同地区的多个雷达候选站的等射束高度拼图。图 8 为武汉、宜昌、十堰和恩施 4 部雷达在 Lambert 投影下的 3 km 等射束高度拼图, (由于十堰和恩施读取的遮挡点的数据太少, 图中十堰和恩施的等射束高度图不能完全反映实际遮挡情况)。

4) 同一地区多个雷达候选站等射束高度综合图(图略), 这为寻求最佳候选站址带来

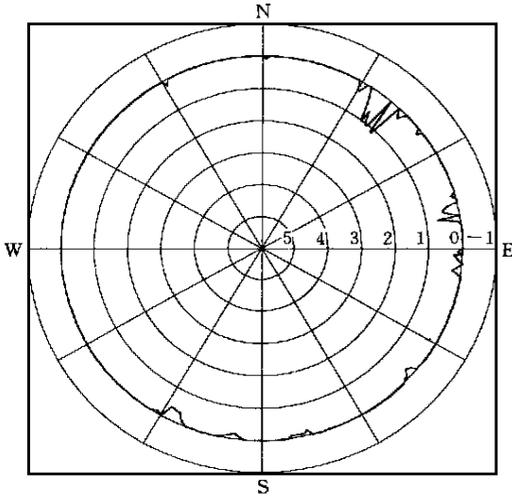


图 6 武汉雷达站的遮蔽角图  
(图中数字为仰角(单位:度))

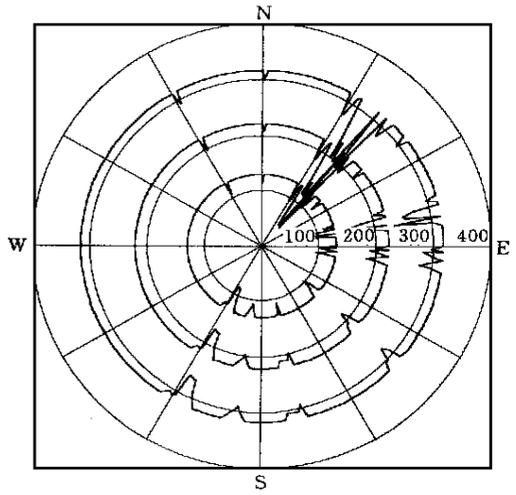


图 7 武汉雷达站 1 km、3 km 和 6 km 等  
射束高度图(图中数字为斜距(单位:km))

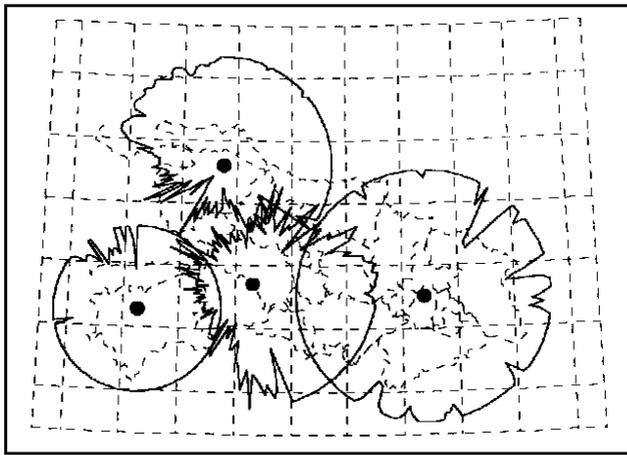


图 8 湖北省 4 部天气雷达 Lambert 投影下的 3 km 等射束高度拼图

方便.

5) 同一候选站不同雷达架设高度的等射束高度综合图(图略), 这对于科学确定建设投资方案非常有用.

### 3 讨论

(1) 利用第 1 节所述算法, 计算了天线架高和天线仰角与雷达有效探测距离之间的关系.

表 1 列出了天线架高为 100 m 时雷达看到 3 km 高目标物的最大探测距离与天线仰角的关系, 从表中可看出随着仰角的增大, 最大探测距离越来越小.

表 1 最大探测距离与天线仰角的关系

仰角/度	- 0.28	0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
探测距离/km	267	222	160	119	92	74	61	52	46	40

图 9、图 10 分别显示了在无遮挡时雷达作俯视图探测和水平扫描时看到 3 km 高目标的最大探测距离随天线架高的变化。从图 9a 中可看出当雷达作俯视图探测时看到某一高度目标物的最大探测距离随着天线架高的增加而增大；而从图 9b 中可看出当雷达作水平扫描时所看到的某一高度目标物的最大探测距离却随着天线架高的增加而减小。比较图 9a 和图 9b 还可看出天线高度一定时雷达俯视图探测时看到某一高度目标物的最大探测距离比雷达水平扫描时要远。但是，雷达俯视图探测方案在实际中是否合适，还需进一步探讨。据作者在实际工作中的体会，恰当的俯视图探测从理论上讲探测距离比水平扫描时要远，而实际中效果不一定很好，这是由于俯视图探测会引起更多的地物杂波。

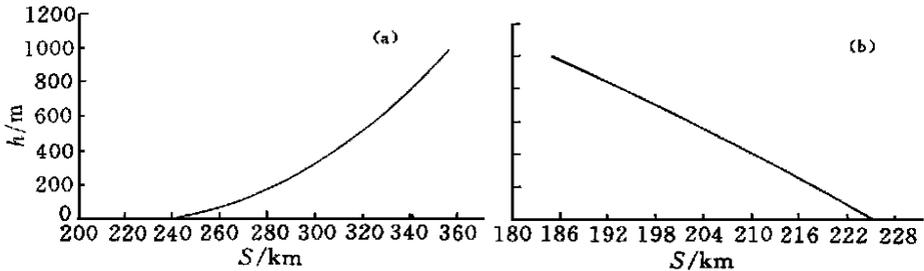


图 9 雷达俯视图(a)和水平(b)探测 3 km 高的目标物的最大探测距离随天线架高的变化

(2) 一旦具有环境遮挡物的有关信息，即可利用本软件生成便于进行雷达视程客观分析的一系列产品，这可为某地以及全国雷达站点布局决策提供参考依据。等射束高度拼图的处理功能实质上也可用于数字化天气雷达拼图的制作。对等射束高度拼图稍加改进即可得到不同探测高度的可用边界雷达资料，简称 UDB<sup>[2]</sup>，是雷达资料定量应用开发的必要基础工作。

### 参 考 文 献

- 1 Bandalo S. An analytic method for radar horizon computation. In: Collier C G, ed. International Weather Radar Networking. Kluwer Academic Publishers, 1992. 75~ 79.
- 2 万玉发, 陈少林, 罗建国. 数字化天气雷达联网拼图与卫星云图综合实时处理系统. 气象, 1994, 20(8): 26~ 31.
- 3 胡毓钜, 龚剑文, 黄伟. 地理投影. 北京: 测绘出版社, 1981. 40~ 41.
- 4 万玉发, 陈少林, 罗建国, 等. 雷达和卫星图像的坐标同化及其实现. 南京气象学院学报, 1990, 13(4): 638~ 643.

## AN OBJECTIVE METHOD FOR ANALYZING THE HORIZON OF DOPPLER WEATHER RADAR STATIONS

Wan Yufa Yang Hongping Xiao Yanjiao Wu Cuihong Xu Xiangming  
(Hubei Meteorological Bureau, Wuhan 430074)

### Abstract

A software for analyzing objectively the horizon of Doppler weather radar stations is developed. According to the geographic information of the selected radar station and its periphery, the software can calculate speedily and display automatically the barricaded elevation map as well as the range-azimuth distribution maps for different heights of a single radar station and the composite map for multiple radars under the Mercator or Lambert projection mode. It provides an objective tool to analyze and appraise the possible horizon of Doppler radars, the combined coverage effect of the conjoint radar network and the quantitative application of radar data.

**Key words:** Doppler radar station Radar horizon Objective analysis