

吴汪毅, 杨光. 运用雷达组网拼图建立精细化人工增雨作业参数[J]. 气象, 2011, 37(1): 107-111.

运用雷达组网拼图建立精细化人工增雨作业参数^{* 1}

吴汪毅 杨 光

安徽省人工影响天气办公室, 合肥 230031

提 要: 利用安徽省合肥、阜阳、蚌埠、黄山 4 部 S 波段多普勒雷达, 江苏南京、徐州 2 部 S 波段多普勒雷达, 河南驻马店以及江西九江的 S 波段多普勒雷达, 对这 8 部同型号的多普勒雷达进行组网和资料拼图插值, 通过 GIS 数据和地理空间转换, 建立了 2~8 km 高度强度场雷达拼图, 并根据火箭弹道轨迹方程, 计算火箭人工增雨作业的仰角、方位角和用弹量, 精细化地分析了火箭人工增雨的作业参数。

关键词: 组网雷达, GIS 数据, 雷达拼图, 人工增雨作业参数

Using Regional Mosaic of Radar Network to Establish Fine Technique Parameters of Weather Modification

WU Wangyi YANG Guang

Anhui Weather Modification Office, Hefei 230031

Abstract: An 8-radar network located at Hefei, Fuyang, Bengbu, Huangshan, Nanjing, Xuzhou, Zhumadian and Jiujiang is used to establish the regional mosaic of Anhui Province. By using GIS and geographical space conversion, the radar echo images at heights of 2—8 km are obtained. According to the rocket trajectory equations, the rocket elevation, azimuth and the ammunition amount used are calculated, and the technique parameters of weather modification are precisely analyzed.

Key words: radar network, regional mosaic, GIS, technique parameters of weather modification

引 言

当前国内人工影响天气作业参数的制定, 主要是依据天气雷达产品进行指标识别或寻找依据的, 通过分析识别, 来给出人工影响天气的作业时机、作业部位(地面作业的方位和仰角)、用弹量等。从 20 世纪 90 年代开始, 随着数字化天气雷达的普遍应用, 通过雷达建立人工影响天气作业参数的业务开展, 以此为核心, 建立了人工影响天气的作业指挥系统, 使人工影响天气作业进入了科学化、量化、客观化的阶段^[1-9]。

进入 21 世纪, 全国 S 波段多普勒雷达布局逐步

完成, 全国大多数省份都均匀分布多个 S 波段多普勒雷达。目前的实时人工增雨作业指挥系统均采用的是单雷达参数指挥。由于单雷达在离开雷达较远的方向空间分辨率较低, 垂直部位缺测点较多。因此通过雷达组网技术, 建立各种插值方法^[10-13], 获得各水平层的 CAPPI 资料, 是区域型雷达组网技术应用发展的趋势。本文利用安徽省及其周边省的 S 波段多普勒雷达强度场资料, 利用雷达拼图技术, 对雷达回波重叠区进行插值, 可以获得雷达在垂直方向上的缺测资料, 结合火箭弹道曲线和用弹量公式, 再加上实时作业参数的算法方法, 可建立人影作业指挥系统, 通过业务软件, 在人影作业时可精细化进行作业指挥。

* 本文得到安徽省新技术项目“利用双偏振雷达研究对流云降水粒子相态演变规律”(km201011)资助

2009 年 10 月 28 日收稿; 2010 年 7 月 26 日收修定稿

第一作者: 吴汪毅, 主要从事云雾物理和人工影响天气工作. Email: 3wccdel@sina.com

1 作业参数的系统特点和总体框架

作业参数依托于安徽省火箭人影作业指挥系统进行分析。系统总体框架分为 3 个部分:雷达组网拼图、火箭弹道曲线和作业参数精细化。雷达组网拼图:安徽省及周边省 8 部 S 波段多普勒雷达进行组网,并用插值方法进行强度场资料的拼图,生成的图叠加在使用 GIS 数据处理过的地图上,可以进行缩放、移动等矢量处理;火箭弹道曲线:提供火箭的 AgI 含量、火箭运动轨迹,与雷达组网拼图综合分析,可生成实时作业参数;作业参数精细化:通过作业参数算法方法,考虑各种条件及限制,根据平均风场,可以精细化地对人影作业进行实时指挥。

2 GIS 数据处理和雷达组网拼图方法

2.1 GIS 数据及处理方法

2.1.1 数据来源

GIS 数据来源于国家基础地理信息中心的《全国 1:25 万地形数据库、数字高程模型》。坐标系统采用 1954 北京坐标系,高程基准采用 1956 黄海高程系。网格尺寸:3"×3"。等高线的等高距,东部平原丘陵区为 50 m。

2.1.2 数据处理

使用 1:25 万安徽省 GIS 边界数据,建立以 110°E 为参考轴的 6°带的高斯正形投影。可以建立以任何作业点为中心的任何半径的矢量地图。误差小于 1 m。

高斯-克吕格投影直角坐标的计算公式^[14]如下: a 为椭球体长半轴; b 为椭球体短半轴; f 为扁率 $(a-b)/a$; e 为第一偏心率, $e = \sqrt{1-(b/a)^2}$; e' 为第二偏心率, $e' = \sqrt{(a/b)^2-1}$; N 为卯酉圈曲率半径, $N = \frac{(a^2/b)}{\sqrt{1+e'^2 \cos^2 B_f}}$; R 为子午圈曲率半径, $R = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 B)^{3/2}}$; B 为纬度, L 为经度,单位:弧度(RAD)。 B_f 为底点纬度,由子午弧反算公式得到。 X_N 为纵直角坐标, Y_F 为横直角坐标,单位为 m。高斯-克吕格投影正解公式: $(B, L) \rightarrow (X, Y)$, 原点纬度 0, 中央经度 L_0 。

$$X_N = k_0 \{ M + N \operatorname{tg} B [\frac{A^2}{2} + (5 - T + 9C + 4C^2) \frac{A^4}{24}] +$$

$$(61 - 58T + T^2 + 270C - 330TC) \frac{A^6}{720} \}$$

$$Y_F = FE + k_0 N [A + (1 - T + C) \frac{A^3}{6} +$$

$$(5 - 18T + T^2 + 14C - 58TC) \frac{A^5}{120}]$$

$$T = \operatorname{tg}^2 B$$

$$C = e'^2 \cos^2 B$$

$$A = (L - L_0) \cos B$$

$$M = a [(1 - \frac{e^2}{4} - \frac{3e^4}{64} - \frac{5e^6}{256}) B - (\frac{3e^2}{8} - \frac{3e^4}{32} - \frac{45e^6}{1024}) \sin 2B + (\frac{15e^4}{256} + \frac{45e^6}{1024}) \times \sin 4B - \frac{35e^6}{3072} \sin 6B]$$

$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}} = \frac{(a^2/b)}{\sqrt{1 + e'^2 \cos^2 B}}$$

上面公式中东纬偏移 $FE = 500000 \text{ m} + \text{带号} \times 1000000$; 高斯-克吕格投影比例因子 $k_0 = 1$; 高斯-克吕格投影反解公式: $(X, Y) \rightarrow (B, L)$, 原点纬度 0, 中央经度 L_0 。

$$B = B_f - \frac{N_f \operatorname{tg} B_f}{R_f} [\frac{D^2}{2} - (5 + 3T_f + C_f - 9T_f C_f) \frac{D^4}{24}] + (61 + 90T_f + 45T_f^2) \frac{D^6}{720}]$$

$$L = L_0 + \frac{1}{\cos B_f} [D - (1 + 2T_f + C_f) \frac{D^3}{6}] + (5 + 28T_f + 6C_f + 8T_f C_f + 24T_f^2) \frac{D^5}{120}]$$

$$N_f = \frac{(a^2/b)}{\sqrt{1 + e'^2 \cos^2 B_f}} = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_f}}$$

$$R_f = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e'^2 \sin^2 B_f)^{3/2}}$$

$$B_f = \varphi + (3e_1/2 - 27e_1^3/32) \sin 2\varphi + (21e_1^2/16 - 55e_1^4/32) \sin 4\varphi + (151e_1^3/96) \sin 6\varphi$$

$$e_1 = \frac{1 - b/a}{1 + b/a}$$

$$\varphi = \frac{M_f}{a(1 - e^2/4 - 3e^4/64 - 5e^6/256)}$$

$$M_f = (X_N - FN)/k_0$$

$$T_f = \operatorname{tg}^2 B_f$$

$$C_f = e'^2 \cos^2 B_f$$

$$D = \frac{Y_F - FE}{k_0 N_f}$$

上面公式中东纬偏移 $FE = 500000 \text{ m}$; 北纬偏移 FN 北半球 = 0, FN 南半球 = 10000000 m。

然后将平面矢量地图进行平移和缩放,在屏幕指定大小的范围内显示(1 个像素点代表 1 km)。

$$X - X_0 = k(X' - X'_0)$$

$$Y - Y_0 = k(Y' - Y'_0)$$

(X,Y)、(X',Y')为平移前的大地坐标以及平移后的屏幕坐标,k为放缩倍数。

2.2 组网雷达拼图方法

2.2.1 数据来源

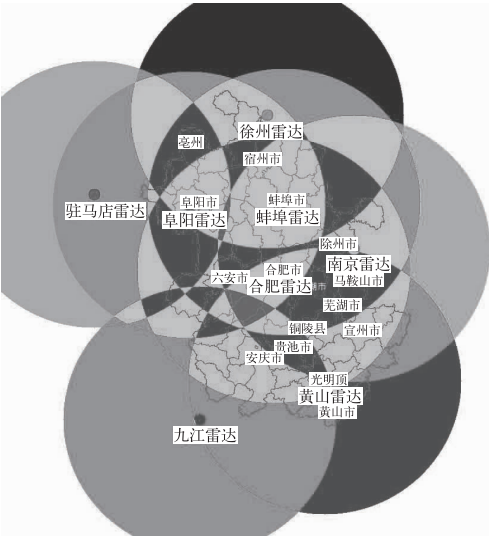


图 1 合肥、阜阳、蚌埠、黄山、南京、徐州、驻马店、九江 8 部雷达覆盖范围示意图
Fig.1 Areas covered by the 8 radars at Hefei, Fuyang, Bengbu, Huangshan, Nanjing, Xuzhou, Zhumadian and Jiujiang

表 1 8 部雷达的位置

Table 1 The location of the 8 radars

雷达地名	纬度	经度	海拔高度/m
合肥	31°52'01"	117°15'29"	165.6
阜阳	31°52'44"	115°44'28"	67.5
蚌埠	32°55'05"	117°26'53"	149.8
黄山	30°08'02"	118°09'00"	1840.2
南京	32°11'28"	118°41'49"	138.2
徐州	34°17'35"	117°09'07"	189.7
九江	29°32'06"	115°57'18"	1373.2
驻马店	33°00'36"	114°01'16"	189.1

把来自安徽省附近合肥、阜阳、蚌埠、黄山、南京、徐州、驻马店、九江 8 部雷达的反射率场插值到统一的笛卡尔坐标网格,8 个雷达的格点反射率场拼接起来形成 3D 拼图网格。由于国家气象业务网中 S 波段雷达只有 0.5°、1.45°、2.4°三个仰角的反射率场资料,因此本文利用多普勒雷达的 0.5°、1.45°、

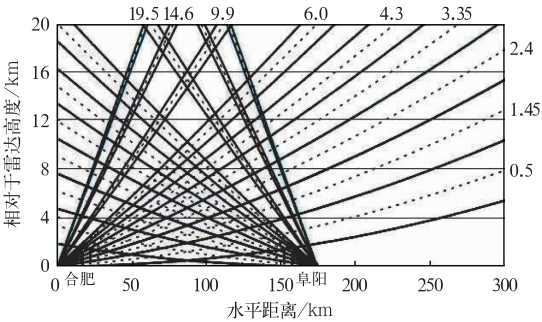


图 2 VCP21 扫描模式下合肥和阜阳
雷达各仰角及观测高度
Fig.2 Radar elevations and observation heights at Stations Hefei and Fuyang in VCP21 scan mode

2.4°三个仰角的反射率场资料进行插值,这些反射率场资料已经进行了质量控制,分辨率都为 1 km。根据人工增雨冷云催化剂的高度要求,形成 2 km、3 km、4 km、5 km、6 km、7 km、8 km 高度的反射率场格点数据并进行绘图。

2.2.2 插值方法

(1) 单个雷达在 2~8 km 的不同高度上选取上下最近的 2 个点进行插值。
$$dBz = dBz_1 \times d_1 / (d_1 + d_2) + dBz_2 \times d_2 / (d_1 + d_2)$$
式中 dBz 为插值后的反射率, dBz_1 为水平层上层的反射率, d_1 为上层反射率距水平层的距离。 dBz_2 为水平层下层的反射率, d_2 为下层反射率距水平层的距离。

(2) 对于多雷达重叠区的拼图算法,国内普遍采取三种方式^[15]:第一种是选取多部雷达中回波最大值作为重叠区域雷达回波值;第二种是根据不同雷达距离重叠区的距离权重来计算重叠区的雷达回波值;第三种是直接取多部雷达回波平均值作为重叠区的雷达回波值。由于本文采取的方案中各个雷达都已插值到相同水平面的相同格点,因此选取多部雷达中回波最大值作为重叠区域雷达回波最大反射率值的方法。

3 弹道曲线和用弹量

3.1 火箭作业的弹道轨迹

由于碘化银的成冰阈温低于-5℃,所以作业的部位应在云中 0℃层以上负温区,而且还要把碘化银送到含水量丰富、上升气流较大的地方。所以火箭发射仰角是由目标云作业部位高度计算出的作

业点与目标云水平距离及火箭弹道飞行参数综合计算而确定。火箭弹道轨迹(图 3)结合雷达的回波区与作业点的距离和高度可计算得到火箭发射仰角^[16]。

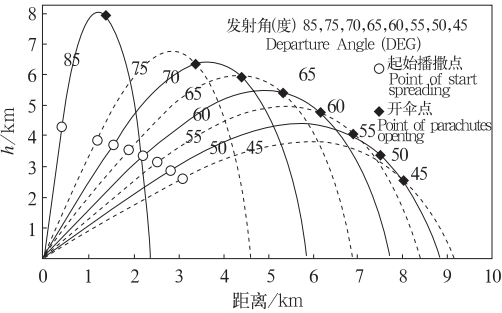


图 3 WR-1B 型火箭弹弹道曲线
Fig. 3 Ballistic curves of the WR-1B rocket

3.2 火箭作业的用弹量

对流云人工催化要达到动力催化效果,人工冰核浓度应达到 300~500 个/L^[4]。而 WR-1B 型火箭每弹种装有 10 克 AgI 催化剂,在-10℃时冰核数可达 1.8×10^{16} 个^[17]。若作业对象为体积 100 km³ 的对流云体,需 3~5 枚火箭可使云中冰核达 300~500 个/L。结合安徽多年实践经验和每次作业云的尺度及强度等特征:对流云用弹量选择 3~5 枚/次;层状云催化人工冰核浓度应达到 20 个/L,对射程内层状云作业需 2~3 枚/次。

4 精细化的作业参数

单多普勒雷达,由于离地面远处探测资料稀少的原因,等高面 CAPPI 的高度一般取 2 km 左右,最高不超过 4 km。但由于火箭人工增雨作业催化剂的播撒区域都在 4 km 以上,因此了解 4 km 以上高分辨率的拼图 CAPPI 对火箭人工增雨就很有必要。

作业参数算法:

- (1) 由于安徽地处南方,作业时零度线大都在 5 km 左右,同时考虑弹道曲线,取作业点周围 8 km 范围内回波值,4 km 和 5 km 两层的资料。
- (2) 考虑作业安全,避开人口稠密区,对比作业点周围村庄分布,过滤掉有村庄的点。
- (3) 根据安徽经验,大于 30 dBz 的回波有降水潜力。挑选出回波周围 4 个点都大于 30 dBz 的点,计算各点到作业点的方位角。

(4) 使用 MM5 数值模式的 UV 风场资料,对作业点周围 8 km 范围内的水平风场进行平均,得到平均风向。

(5) 对比各个点方位角和平均风向的角度差,根据迎风作业方法,按照角度差从小到大排序。

(6) 按照序列,选择某点计算和作业点的仰角,与火箭射击抛物线比较,如果符合,此点就是作业目标点。如果不符合,就依次查找下一个点,直到找到作业目标点。

图 4、图 5 是 2008 年 11 月 7 日 12 时 5 分安徽组网雷达人工增雨防雹作业指挥系统软件界面截图。作业点是在安徽省宿州市符离镇作业点。可以看到界面右下方是目标作业云的火箭作业参数,并且以作业点为起点,绘制出了火箭作业轨迹,细线表示火箭上升阶段,粗线表示火箭播撒阶段。通过这种图形的方式,直观的表达出火箭发射的方位和作业不同阶段的距离。

在 4 km 高度图上,绘出了火箭作业轨迹示意图,并标有作业指导参数:火箭仰角 45°~70°,对该点云体火箭用弹量 2~3 枚。在 5 km 图上(图 4),绘有火箭作业轨迹示意图,并标有作业指导参数:火箭仰角 50°~74°,对该点云体火箭用弹量 2~3 枚。

而 6 km(图 5)、7 km、8 km 的图,显示云体面积太小,不适合作业。

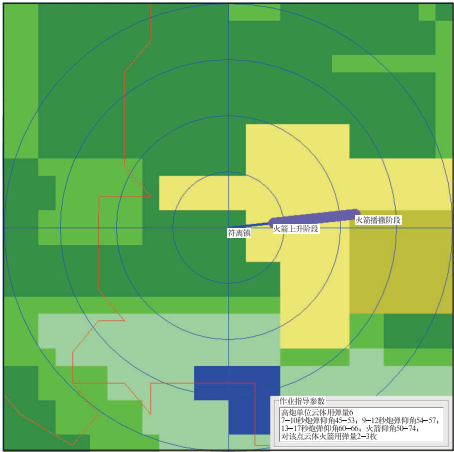


图 4 2008 年 11 月 7 日 12 时 05 分安徽组网雷达人工增雨防雹作业指挥系统软件界面截图(4~5 km)

Fig. 4 Diagram for technique parameters of weather modification given by the radar network of Anhui Province at 12:05 BT 7 November 2008 (4~5 km)

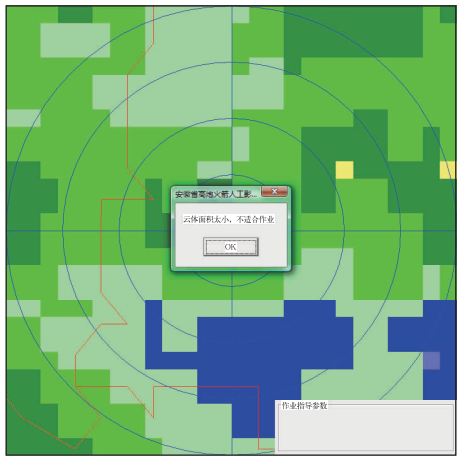


图 5 2008 年 11 月 7 日 12 时 05 分安徽组网雷达人工增雨防雹作业指挥系统软件界面截图(6~8 km)

Fig.5 As in Fig. 4, but for heights of 6—8 km

不同的高度,用不同的仰角;回波强度不同,用弹量也不一样。雷达拼图 CAPPI 分层显示的数据,结合火箭参数,可以精细化地获得作业指导参数。

5 总 结

- (1) 多部雷达组网拼图可以较细致地反映离雷达较远处回波的垂直变化情况。
- (2) 能够建立笛卡尔坐标平面中 3D 网络的反射率场,可以以水平和垂直方面的分辨率为 1 km 进行精细化的图像显示。
- (3) 在可作业层能够精细化地进行计算并获得火箭作业参数。
- (4) 雷达参数只考虑了反射率场的组网拼图,没有考虑 VIL、回波顶高、风场等参量。
- (5) 组网拼图的插值在远离雷达而没有雷达重

叠区的地方,有较大的误差。

参考文献

[1] 施文全,李斌,胡寻伦. 利用雷达指挥 WR-1B 型火箭进行防雹作业的方法[J]. 气象,1996,22(7):43-47.

[2] 王斌,杨维军,唐仁茂. 雷达在确定火箭高炮发射角中的应用[J]. 气象,1999,25(6):39-43.

[3] 唐仁茂,杨维军,王斌,等. 夏季对流云火箭增雨技术初步研究[J]. 应用气象学报,2001,S1:58-64.

[4] 李红斌,周德平,濮文耀. 火箭增雨作业部位和催化剂量的确定[J]. 气象,2005,31(10):42-46.

[5] 白先达,陈博杰,张瑞波,等. 新一代天气雷达在人工增雨作业中的应用[J]. 广西气象,2005,14(03):35-39.

[6] 张瑞波,刘丽君,钟小英,等. 利用新一代天气雷达资料分析飞机人工增雨作业效果[J]. 气象,2010,36(2):70-75.

[7] 李红斌,何玉科,濮文耀,等. 多普勒雷达特征参数在人工防雹决策中的应用[J]. 气象,2010,36(10):84-90.

[8] 张志红,周毓荃. 一次降水过程云液态水和降水演变特征的综合观测分析[J]. 气象,2010,36(3):83-89.

[9] 唐仁茂,袁正腾,向玉春,等. 依据雷达回波自动选取对比云进行人工增雨效果检验的方法[J]. 气象,2010,36(4):96-100.

[10] 何红红,刘宪勋,李洪绩. 天气雷达回波区域拼图实现方法[J]. 气象科技,2004,32(01):52-56.

[11] 胡胜,伍志方,刘运策,等. 新一代多普勒天气雷达广东省区域拼图初探[J]. 气象科学,2006,26(01):74-79.

[12] 肖艳姣,刘黎平. 新一代天气雷达网资料的三维格点化及拼图方法研究[J]. 气象学报,2006,64(05):53-58.

[13] 张志强,刘黎平,谢明元,等. CINRAD 三维拼图产品显示系统[J]. 气象,2007,33(09):19-24.

[14] 吴忠性,杨启和. 在电子计算机辅助制图情况下地图投影变换的研究[J]. 测绘学报,1981,10(1):42-48.

[15] 王庆东,严卫,马宁. 数字化天气雷达组网拼图算法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版),2002,3(02):90-93.

[16] 航天工业总公司四院 41 所. 增雨防雹火箭作业系统[G]. 西安,航天工业总公司四院 41 所,1995.

[17] 人工影响天气岗位培训教材[M]. 北京:气象出版社,2002:64-65.