

雷达和卫星图象的坐标同化及其实现

万玉发 陈少林 罗建国 袁誉常 金鸿祥

(武汉中心气象台)

提 要

雷达和卫星图象综合处理及叠加显示是一项新技术。本文主要介绍武汉区域中心数字化天气雷达自动联网拼图以及和H卫星云图实行叠套显示的坐标同化方法和实现过程,并对经投影变换后的两种底图坐标变形问题进行了分析和讨论。

多部数字化天气雷达高频度自动联网拼图可以有效地监视较大范围的降水及强对流天气,而把卫星云图和雷达拼图利用一定的方式叠合在一个平面上时,就可以从三维立体角度观测云雨的发展演变以及云雨分布的相互关系。文献[1]、[2]在这方面作了很好的工作。云雨图叠加及综合处理,对于开展短时预报和中尺度天气系统的研究将提供一个非常重要的手段。

由于地表面是一个曲面,所以数字化雷达图和卫星云图的直角坐标表示都是经过了特定的由曲面到平面的转换过程,即地理投影[3]。要实现云雨图叠加,需解决的问题是把多部雷达图和卫星云图按相同的分辨率统一到新的直角坐标系中(新的地理投影),即投影变换。在中纬度地区,气象图象一般采用麦卡托和兰勃脱两种投影方式^[1,2]。在“长江中游数字化天气雷达自动联网拼图”课题中,我们完成了6部雷达组网的软件工作,与此同时,完成了H卫星云图的投影变换并可和雷达网一起实时综合处理和叠套显示。本文将对联网拼图以及和H卫星云图实行叠套的地理投影、实现方法及精度分析方面作一小结。

一、雷达联网和云雨图叠套的坐标同化

正如前面所述,要实现云雨图的重叠处理和显示,从原理上讲就是要把两种图统一到新的坐标系中(在此称为底图坐标系)。简单地表示为: $X=\phi_1(\varphi, \lambda)$, $Y=\phi_2(\varphi, \lambda)$ 。其中 (φ, λ) 是相应 (X, Y) 点的地理坐标, ϕ_1 和 ϕ_2 为转换函数。事实上,投影方式(底图坐标系)一经确定,参考地图投影学^[3], ϕ_1 和 ϕ_2 即可得出,由地理坐标 (φ, λ) 到直角坐标 (X, Y) 的转换就可方便地实现。

但是,经数字化处理的雷达和卫星云图的平面直角坐标是两种不同的地理投影方式获得的,并均与底图投影方式(麦卡托和兰勃脱)不同,这就需要正确判别原投影方式,

然后将原直角坐标逆转换到地理坐标(即由 (x, y) 到 (φ, λ) 的转换), 并代入底图投影公式中, 实现投影变换, 达到不同气象图象的平面位置同化。最后的转换公式可表示为 $X = \phi_1[\varphi(x, y), \lambda(x, y)]$, $Y = \phi_2[\varphi(x, y), \lambda(x, y)]$ 。

1. 底图兰勃脱(Lambert)投影坐标公式^[3]

$$\begin{cases} X = \rho \cdot \sin \delta \\ Y = \rho_0 - \rho \cdot \cos \delta \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{式中 } \rho_0 = \frac{R}{\alpha} \cos \varphi_1 \left[\operatorname{tg}(45^\circ + \varphi_1/2) / \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi_0/2) \right]^\alpha$$

$$\rho = \frac{R}{\alpha} \cos \varphi_1 \left[\operatorname{tg}(45^\circ + \varphi_1/2) / \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2) \right]^\alpha$$

$$\text{而 } \alpha = \frac{\ln \cos \varphi_1 - \ln \cos \varphi_2}{\ln \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi_2/2) - \ln \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi_1/2)}$$

以上系列公式中, 参见图 1, (X, Y) 为任意点A投影后的直角坐标; (φ, λ) 为点A的地理坐标; ρ_0 为坐标原点所对应的纬圈投影圆弧的半径; ρ 为点A的投影半径; δ 为点A相对坐标原点投影后的经差; α 为圆锥常数($\alpha = \delta / (\lambda - \lambda_0)$), 其值与圆锥的切割位置有关; λ_0, φ_0 为底图坐标原点经纬度; φ_1 和 φ_2 为圆锥的两个割纬度(即标准纬度); R 为平均地球半径。

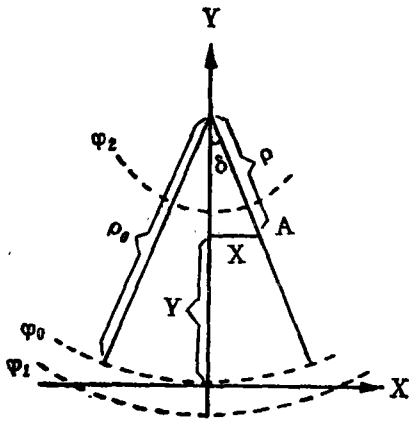


图 1 兰勃脱投影示意图

只要把标准纬度和坐标原点确定, 就可依照以上公式(1)将地面上任一点的地理坐标转换为兰勃脱投影下的平面直角坐标。

2. 底图麦卡托(Mercator)投影坐标公式^[3]

长江中游地处 30°N 左右, 用麦卡托投影也可满足精度要求(后面讨论), 考虑不同方面的使用需要, 在实现了兰勃脱投影的同时, 也实现了麦卡托投影转换, 并可方便地选取。公式如下

$$\begin{cases} X = R \cdot \cos \varphi_1 (\lambda - \lambda_0) \\ Y = l - l_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $l_0 = R \cdot \cos \varphi_1 \ln \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi_0/2)$

$$l = R \cdot \cos \varphi_1 \ln \operatorname{tg}(45^\circ + \varphi/2)$$

参见图 2, φ_1 为圆柱的割纬度(即标准纬度), l 为任意点A到赤道的投影距离, l_0 为坐标原点到赤道的投影距离。

同样, 只要将标准纬度和坐标原点经纬度确定, 就可将实际地面的任意点A地理坐

标转换为麦卡托投影下的平面直角坐标。

3. 雷达数字化图象坐标的逆转换公式

由数字化天气雷达坐标转换方法得出，雷达直角坐标是一种斜轴等距离方位投影的表示。这样可以从雷达相对站址的直角坐标求出相应点的地理坐标

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi = \arcsin \left[\cos \left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{R} \right) \cdot \sin \varphi_r + \sin \left(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{R} \right) \right. \\ \quad \left. \cdot \cos \varphi_r \cdot \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}} \right] \\ \lambda = \arcsin \left(\frac{x \cdot \sin \left(\sqrt{x^2+y^2} / R \right)}{\sqrt{x^2+y^2} \cdot \cos \varphi} \right) + \lambda_r \end{array} \right. \quad (3)$$

式中 φ_r 、 λ_r 为雷达站纬度和经度； x 、 y 为雷达图任意点相对于雷达站的横纵坐标。根据(3)式求得 (φ, λ) 代入(1)式或(2)式，以完成雷达坐标到底图坐标的变换，实现多部雷达的平面坐标统一。

4. H卫星云图的地理投影方式

H卫星云图是经过日本GMS卫星地面处理站投影变换后的一种图象，正确判断其投影方式和参数是实现和雷达拼图叠加的关键。根据文献[3]所介绍的方法，判别H云图为正轴等角方位投影方式。公式如下

$$\left\{ \begin{array}{l} x = \rho_s \sin(\lambda - \lambda_s) \\ y = \rho_s - \rho_s \cos(\lambda - \lambda_s) \end{array} \right. \quad (4)$$

其中， $\rho_s = 2R \cos^2(45^\circ - \varphi_1/2) \cdot \text{tg}(45^\circ - \varphi_s/2)$

$$\rho = 2R \cos^2(45^\circ - \varphi_1/2) \cdot \text{tg}(45^\circ - \varphi/2)$$

式中 φ_s 、 λ_s 为H云图坐标原点纬度和经度； ρ 为投影后任意点A到极点的距离； ρ_s 为坐标原点到极点的距离； φ_1 为标准纬度，参照文献*的说明并经计算即可得出。同时，根据(4)式可方便地从 x 、 y 反求出 φ 、 λ (略)。

二、实现方法

有了以上一系列坐标转换公式，原理上可以将多部雷达联网拼图以及实现和卫星云图的重叠。但是，作为一个实时的业务化系统，快速、准确、自动地实现尤为重要。

1. 实现步骤

图3给出了雷达组网以及云雨图叠加的实时处理框图。大体分四步：(1)进行H云图和各雷达图的预处理。包括：卫星云图的定位处理、各雷达图分辨率和灰度同化等手续。其中H云图的预处理在长城0520-CH上实施，其它方框(不含虚线框)均在386微机

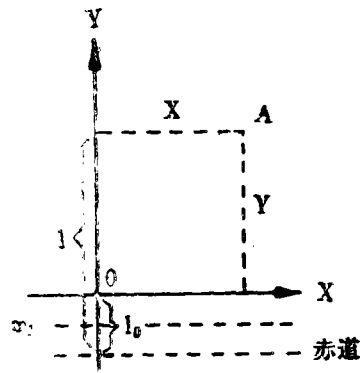


图2 麦卡托投影示意图

*日本地球同步气象卫星——GMS系统综合介绍(第五分册)

上实现；(2)各雷达图及H云图的投影变换，实现坐标同化；(3)雷达间边界及H云图分辨率处理；(4)叠加显示。其产品范围：卫星为2048km×1536km，雷达拼图面积约为

卫星云图的四分之一。显示分辨率为2 km。色彩：叠加时雷达图用8级彩色，卫星图用8级灰度；分别显示用16级彩色或灰度。

2. 转换表的形成

鉴于实时运行之需要，我们在作上面第二步时，采用查表法。转换表是事先就作好的。在算法上采用由原坐标到底图坐标或反之处理计算并存的方式。其中雷达表制作以前者为为主，H云图表以后者为为主。这样为雷达图的多组组合显示及H云图的同化处理带来方便。

3. 雷达转换表的结构及容量

根据公式(1)、(2)，不同雷达相应点的底图坐标不具有整体平移关系。就是说在特定投影方式下，各雷达不能公用一张转换表。又考虑雷达拼图的底图范围为640×480点阵，那么每个象素点的底图坐标需用4个字节表示(X、Y各2个)，而每部雷达数据点是256×256，所以一张表需占256K字节。但是，相当多的点在转换时满足：随着雷达纵坐标一定、横坐标递增时，底图坐标也满足Y一定和X+1的规律(见表)。其中 $N_i (< 256)$ 表

X_1	Y_1	N_1	X_2	Y_2	N_2	...	X_i	Y_i	N_i	...
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-----	-------	-------	-------	-----

示满足上述规律的个数。这样使表容量大为缩短[表1]。两种投影6部雷达的12张转换表总容量(161 879字节)还不足按每点表示的一张表容量(262 144字节)。同时实时转换非常快，6部雷达总转换时间小于30秒。

表1 各雷达转换表长度分布(字节)

投影站名	宜昌	武汉	恩施	长沙	十堰	南昌	缩小倍数
麦卡托	11 232	11 316	19 614	12 342	17 724	11 574	21
兰勃脱	11 136	12 920	20 670	7 067	15 294	19 950	18

三、变形分析及讨论

地球表面上的长度、面积和角度经过投影一般地其量值都会发生某种变化。本系统所选定和实现的两种底图投影方式没有角度变形，图象真实感强。但是存在长度变形，即投影后所表示的距离与实际距离有一定差值(放大或缩小)。两种底图的变形公式如下^[3]

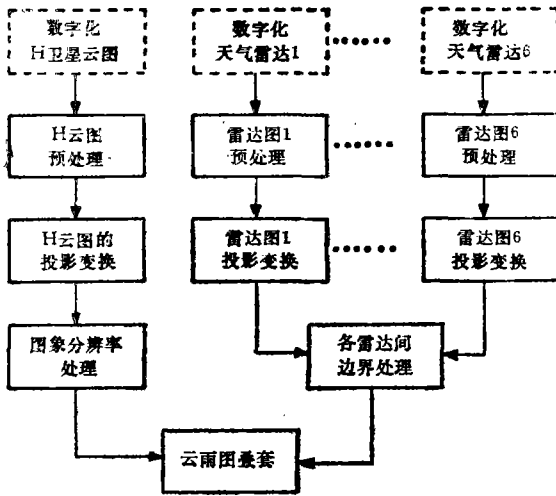


图3 实时处理框图(虚线框为非本系统完成)

$$m_{\text{麦}} = n_{\text{麦}} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi} \quad (5)$$

$$m_{\text{兰}} = n_{\text{兰}} = \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi} \left[\operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi_1}{2} \right) / \operatorname{tg} \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) \right]^\alpha \quad (6)$$

$$\text{其中 } \alpha = \frac{\lg \cos \varphi_1 - \lg \cos \varphi_2}{\lg \operatorname{tg} (45^\circ + \varphi_2/2) - \lg \operatorname{tg} (45^\circ + \varphi_1/2)}$$

在(5)、(6)式中, φ_1 和 φ_2 均为标准纬度; m 为经向、 n 为纬向放大(缩小)倍数。由此可见, 两种变形与所选定的标准纬度有关, 且是纬度的函数, 不随经度而变。

在本系统中, 雷达组网范围相对中心南北最大距离480km, 其中武汉和宜昌雷达在250km左右。通过计算南北方向不同距离的 m 值(令 $\varphi_1=30^\circ\text{N}$, $\varphi_2=60^\circ\text{N}$, $X=0$)和累积误差 $d(\text{km})$ (表略)表明: 兰勃脱投影比麦卡托投影变形要小, 即使在拼图边缘, 兰勃脱投影带来累积误差8km左右。对武汉和宜昌的雷达兰勃脱投影才带来2km左右误差, 麦卡托投影累积误差6km。所以, 两种底图投影精度满足实际应用要求。

由于投影的放大变形, 在雷达坐标向底图坐标变换时, 在底图上就有可能出现盲点(即无数据点)。对组网范围的6部雷达转换时所产生的盲点进行统计(表2)表明: ①兰

表2 各雷达盲点统计一览表

盲点 投影	宜昌	武汉	恩施	长沙	十堰	南昌	总 计
麦卡托	1 388	1 171	978	190	3 539	306	7 572
盲点率%	2.1	1.8	1.5	0.3	5.4	0.5	1.9
兰勃脱	165	166	284	1 012	13	530	2476
盲点率%	0.3	0.3	0.4	1.5	0.0	1.3	0.6

勃脱投影带来盲点主要是 30°N 以南区域; 麦卡托反之。且雷达图偏离 30°N 越远, 盲点越多。②从总的盲点率来看, 麦卡托投影大于兰勃脱投影。③两种投影盲点率都较低。譬如兰勃脱才0.6%, 就是说100个象素点还不到1个盲点。对这些盲点本系统采用逆转换予以填充。

由于卫星云图的变换显示范围比雷达拼图范围大, 当然最大变形也会大一些。不过, 对于本区域, 客观、定量及云雨结合应用有拼图范围就够了。况且这种误差很容易实现自动订正, 限于篇幅, 在此不作更深入的讨论。

参 考 文 献

- [1] Collier, C. G., The united kingdom weather radar network, Met. O. Rrl Research Report, No.29, July, 1982.
- [2] Austin, G. L., Combing satellite and radar data for the short-range forecasting of precipitation. Proc.IAMAP Symposium, Hamburg, 25—28, August, 1981.
- [3] 胡毓巨等, 地图投影, 测绘出版社, 1981.

COORDINATE ASSIMILATION OF RADAR AND SATELLITE IMAGERY AND ITS IMPLEMENTATION

Wan Yufa* Chen Shaolin* Luo Jianguo*
Yuan Yuchang* Jin Hongxiang*

ABSTRACT

The technique of synthetic processing and overlapping of radar and satellite imagery is quite recent. In this paper, the coordinate assimilation of the digital weather radar network mosaic and overlapping with H satellite imagery, and its implementation in the Wuhan Regional Center are described. The coordinate distortion of the two base maps from the projection is also analyzed and discussed.

* Affiliated with the Wuhan Central Meteorological Observatory