

Geodesics 算法在雷达投影转换中的应用检验

管理¹ 戴建华^{1*} 吴昊²

(1 上海中心气象台, 上海 200030; 2 江苏省测绘工程院, 南京 210013)

摘要 基于上海市气象局布设于临港的 X 波段移动式双线偏振雷达观测资料, 利用反射率因子、差分反射率和相关系数等变量识别出东海大桥固定地物回波位置, 进而采用 Geodesics 和 HRAP (Hydrologic Rainfall Analysis Project) 投影转换算法将雷达回波的极坐标位置转换至地理坐标。以国家测绘局利用 GPS 技术测量的沪芦高速 (东海大桥段) 地理坐标作为真值, 将环境大气分为晴空回波-低湿度情况和降水回波-高湿度情况分类检验两种算法的效果。检验算法包含经投影转换后地物回波样本位于桥面主体内部的数目 (多边形检验) 和样本偏离桥体中心线的距离 (中心线检验)。其结果表明: Geodesics 算法在多边形和中心线检验方面表现均优于 HRAP 算法, 其在雷达投影转换的实际业务中具备一定的应用价值。

关键词 Geodesics 算法; HRAP 算法; 东海大桥; 固定地物回波

中图分类号: P415.2 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20190063 **文献标识码:** A

引言

多普勒天气雷达是监测中小尺度天气系统最为重要的手段之一, 全国天气雷达监测网的建立极大提升了天气预警业务的时效^[1-4]。伴随部分省市单偏振天气雷达升级双线偏振雷达工作的开展以及 X 波段短波长雷达逐步投入应用, 空间粒子的相态可以被更准确识别出。业务用天气雷达以极坐标的形式存储雷达数据^[5], 但气象预报业务中的模式和实况产品多以地理坐标的方式存储, 为在实际预报中结合模式输出和雷达产品进行综合研判, 需将雷达极坐标数据统一转换到地理坐标系下。针对天气雷达领域投影转换 (坐标变换) 的问题, 国内外已有众多学者进行了相关探索和研究。Vincenty (1975)^[6] 提出了适用于早期计算机的笛卡尔坐标系和地理坐标系的转换方法; Rapp (1993)^[7] 在此基础上总结了地理坐标变换的相关理论框架和方法; Reed (1999)^[8] 提出了针对 NEXRAD 雷达的 HRAP 投影算法, 并应用于美国天气雷达监测网; 金宏斌等

(2003)^[9] 指出了雷达坐标变换中存在的问题并提出统一地心坐标系减小地球曲面误差的方法; Karney (2013)^[10] 在前人的基础上提出了 Geodesic 算法, 利用级数展开的方式寻求运算效率和准确性的最佳折衷; 杨淑心等 (2016)^[11] 提出了利用向量投影实现各个雷达坐标数据互相转换的方法。但上述方法多局限于理论研究阶段, 其实际投影转换效果尚未进行有效的检验。

上海市气象局于 2016 年初在浦东临港架设了 X 波段移动式双线偏振雷达, 在初期调试阶段, X 波段雷达在低仰角下能够观测到明显的东海大桥固定地物回波。东海大桥作为明显标志物, 非常适合用来检验雷达投影转换算法。本文基于不同天气背景下 X 波段雷达观测到的东海大桥地物回波位置, 分别利用 Geodesics 算法和 HRAP 算法进行雷达极坐标到地理坐标的投影变换。转换后的结果分别与东海大桥桥面地理坐标和东海大桥中心线位置进行对比, 检验两种算法对于雷达坐标投影变换的优劣, 以期在使用雷达信息的精确地理位置时, 对坐标投

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

国家重点研发计划 (2018YFC1507601)、国家自然科学基金 (41775049)、上海市科委研究计划项目 (16DZ1206100) 和上海市气象局强对流创新团队共同资助

作者简介: 管理, 男, 1989 年生, 硕士, 工程师, 主要从事天气雷达资料处理与应用工作, Email: glion2005@163.com

收稿日期: 2019 年 2 月 12 日; 定稿日期: 2019 年 6 月 13 日

* 通信作者, Email: djhnn@sina.com

影变换可能带来的误差有更准确的认识。

1 东海大桥固定地物回波识别

东海大桥为连续多跨的双塔中央单索面斜拉桥,起始于上海市浦东新区(原南汇区)芦潮港,北与沪芦高速相连,南跨杭州湾北部海域,直达浙江嵊泗县小洋山岛。桥身全长 32.5 km,桥面宽度 31.8 m,通航孔净高 40 m,主塔全高 159 m^[12]。图 1 为 X 波段移动式双线偏振雷达以及东海大桥的地理信息示意图。

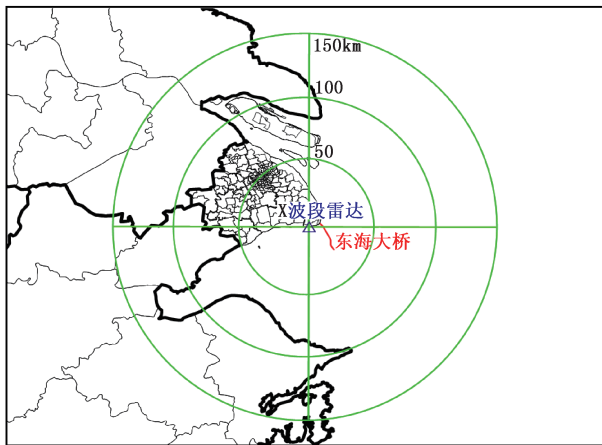


图 1 X 波段移动式双偏振雷达及东海大桥位置(三角)示意图

本文所用天气雷达型号为北京敏视达公司生产的 X 波段双线偏振移动式雷达,其主要技术指标及性能参数如表 1 所示。

表 1 X 波段移动式双线偏振雷达主要技术指标及性能参数

雷达参数	指标
雷达坐标	纬度:31°22'48", 经度:121°11'56"
雷达高度	35 m
工作模式	水平/垂直双发双收
探测范围	75/150 km
距离分辨率	75/150 m
测量误差	反射率: 优于 1 dBz
	速度/谱宽: 优于 1 m/s
	差分反射率: 优于 0.2 dB
	差分相移: 优于 3°
标定检查	相关系数: 优于 0.99
	反射率在线标定
	速度和谐宽检查
	噪声电平测量
	噪声温度检查
	地物抑制能力检查
发射机功率和初始相位订正	
双通道幅相一致性在线检查	

前文已述东海大桥采用主塔最高达 159 m, 远超 X 波段雷达的海拔高度(35 m)。再结合 X 波段雷达反射率因子及偏振量的具体反映, 可以认为低仰角情况下探测到的 S 形地物回波为东海大桥导致的固定地物回波。

在不同天气背景下, 大气折射指数存在较大差异, 而影响大气折射指数的变量中又以湿度的影响最为突出^[13]。本文利用上海的 3 部雷达和上海宝山的探空资料, 将大气背景划分为晴空回波且大气湿度较低的情况(以下简称晴空-低湿)以及降水回波且大气湿度较高情况(以下简称降水-高湿)分别讨论。划分依据如下: 以 X 波段雷达为中心, 沿逆时针方向划分 4 个象限, 东海大桥主体位于第 4 象限。利用南汇和青浦雷达(S 波段雷达, 最大探测距离 460 km)定性确定晴空和降水的情况, 即若南汇和青浦雷达 150 km 以内均为弱的晴空回波, 且宝山探空和近海自动站表征的湿度条件较差(探空曲线 850 hPa 以下温度露点差大于 5 °C, 地面相对湿度小于 50%), 则认为该时段为晴空-低湿情况; 反之, 若 S 波段雷达 150 km 扫描范围内有大量超过 25 dBz 的降水回波, 且宝山探空和近海自动站表征的湿度条件较好, 则认为该时段为降水-高湿情况。在此需要指出, 为避免降水回波和东海大桥固定地物回波混杂在一起的情况, 降水-高湿的数据样本选择第 4 象限内未出现降水回波的数据。

下文以 2016 年 6 月 5 日 08:00 为例, 阐述识别东海大桥固定地物回波的具体步骤。上海宝山站探空资料显示(图略)中低层湿度条件较差, 对应的南汇和青浦雷达 150 km 距离圈(图略)以内未出现明显降水回波, 据此认为该时段内 X 波段雷达主要探测到的为晴空湍流回波和地物回波。再结合 X 波段雷达反射率因子、差分反射率和相关系数进一步区分地物回波和晴空湍流回波。

X 波段雷达 0.5°PPI 图像显示(图 2a, 图 2b, 图 2c), 在雷达的 90°~135°方位角之间, 有一条明显的线状回波, 反射率因子值较大(25~40 dBz), 相关系数较小(多在 0.7 以下), 差分反射率较小(-2 dB 以下)。参看前后时次的 0.5°仰角反射率因子 PPI 也能发现线状强回波的位置较为固定。上述偏振雷达的参量特征均符合固定地物回波的判别标准^[14-18]。由于差分相移率是偏振雷达基于差分相位和径向距离的二次产品, 其计算过程涉及距离长度, 为避免距

离误差对东海大桥固定地物回波识别的影响,本文仅选用反射率、差分反射率和相关系数 3 个变量综合识别固定地物回波。由于东海大桥主体位于 X 波段双线偏振雷达的 $90^{\circ} \sim 135^{\circ}$ 范围内(图 1)没有其他显著地物的干扰,根据现有的研究成果,将反射

率 25 dBz 以上,差分反射率 -2 dB 以下,相关系数 0.7 以下的点识别为东海大桥固定地物回波。以该时段 X 波段雷达数据为例,经阈值筛选,该时段内(2016 年 6 月 5 日 08:00)共筛选出 44 个满足条件的固定地物回波点(图 2d)。

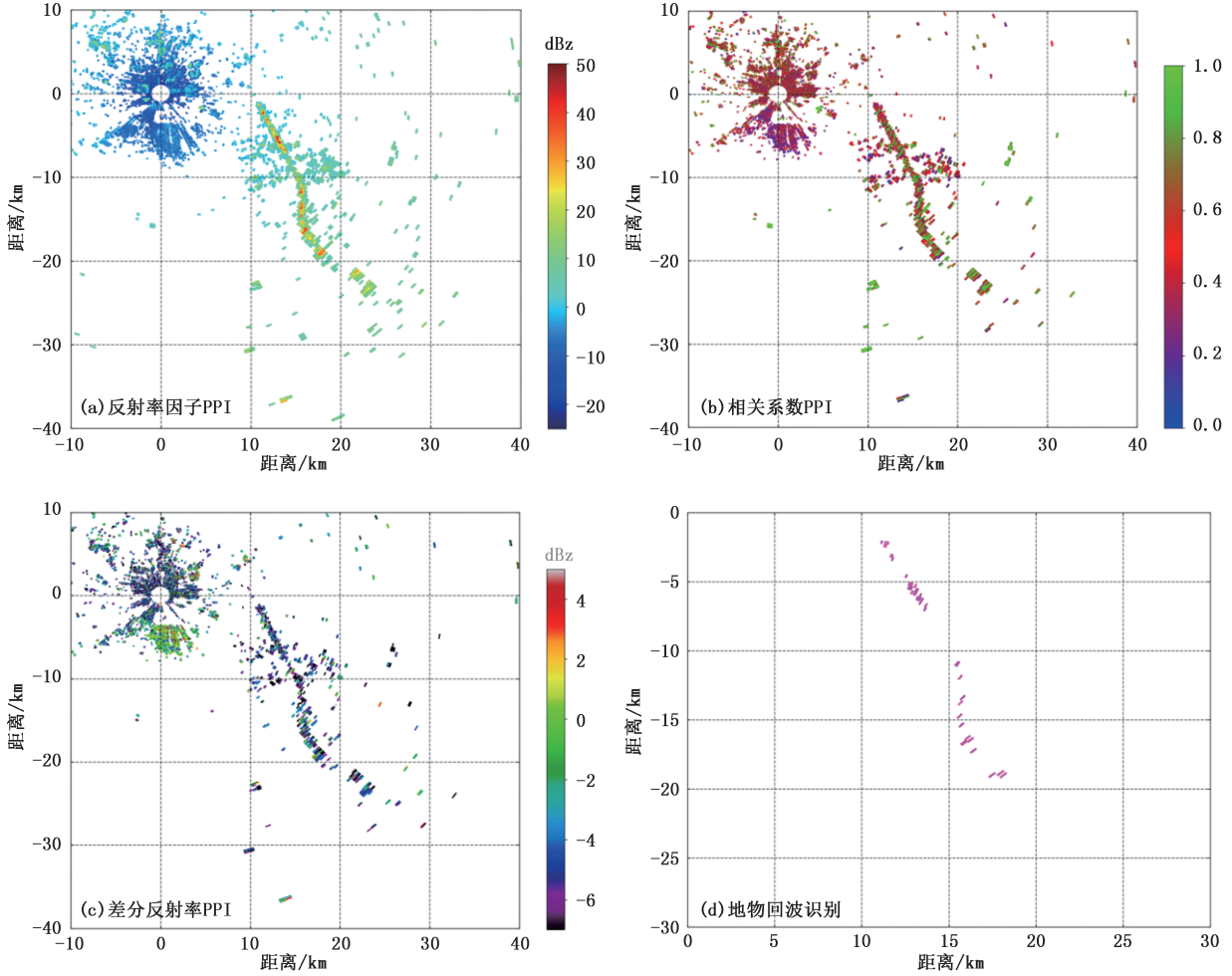


图 2 2016 年 6 月 5 日 08:00, 0.5° 仰角上海 X 波段雷达产品图像及固定地物回波识别

2 算法介绍

2.1 Geodesics 算法原理

假设地球赤道平面半径为 a , 过南北极的极轴半轴为 b , 则地球扁平率 f 、3 阶扁平率 n 、偏心率 e 以及 2 阶偏心率 e' 可由式(1)~(4)计算得到。

$$f = (a - b) / a = 1 - \sqrt{1 - e^2} \quad (1)$$

$$n = (a - b) / (a + b) = f / (2 - f) \quad (2)$$

$$e^2 = (a^2 - b^2) / a^2 = f(2 - f) \quad (3)$$

$$e'^2 = (a^2 - b^2) / b^2 = e^2 / (1 - e^2) \quad (4)$$

本文遵循 WGS-84 标准定义赤道半径 a 为 6387137 m、极轴半径 b 为 6356752.314245 m, 将 a 和 b 带入计算以上中间变量得到表 2 中的参量。

表 2 WGS-84 参数

参量	数值
f	1/298.257223563
b	6371007.180918
n	0.00167922038638370
e^2	0.006694379 99014132
e'^2	0.00673949674227643

鉴于 WGS-84 标准下,地球为近似规则球体的扁椭球,为方便计算过程中大圆弧长和地球球面距

离的准确匹配,建立一个规则球体的辅助球体进行计算,如图 3 所示。

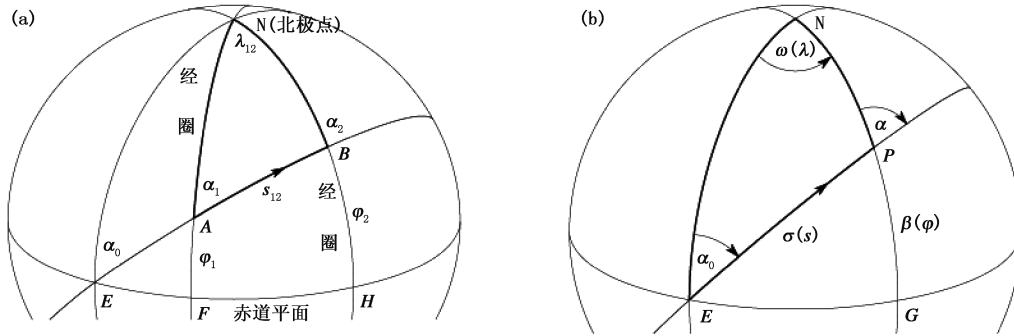


图 3 地球坐标系示意:(a)椭球型地球,(b)辅助球形

(N 为北极点, NAF 和 NBH 为经圈, λ_{12} 为 A 点和 B 点的经度差, φ_1 和 φ_2 为 A 点和 B 点的纬度值, EFH 为赤道平面, P 为 EAB 曲线上的任意一点)

图 3a 为地球椭球体示意,图 3b 为与之对应的规则辅助球体。在辅助球体中(图 3b), P 点对应图 3a 中的 B 点。由扁椭球体旋转对称性^[16]可知,图 3a 中 E 点、 A 点和 B 点之间遵循如式(5)所述的关系:

$$\sin\alpha_0 = \sin\alpha_1 \cos\beta_1 = \sin\alpha_2 \cos\beta_2 \quad (5)$$

其中 β 为参数纬度,由式(6)计算得到

$$\tan\beta = (1-f)\tan\varphi \quad (6)$$

首先,图 3a 球面三角形 NEA 中, A 点经纬度已知(经度为 λ_1 , 纬度为 φ_1 , 对应参数纬度为 β_1), A 点与 B 点间的方位角为 α_1 , 球面距离 s_{12} 。利用式(7)~(9)可计算出辅助球体中的 α_0 、 σ_1 和 ω_1 。

$$\alpha_0 = ph(|\cos\alpha + i\sin\beta| + i\sin\alpha\cos\beta) \quad (7)$$

$$\sigma = ph(\cos\alpha\cos\beta + i\sin\beta) \quad (8)$$

$$\omega = ph(\cos\sigma + i\sin\alpha_0\sin\sigma) \quad (9)$$

其中, $i = \sqrt{-1}$, $ph(x+iy)$ 为角度的复数形式。

其次,根据公式(10)和式(11)计算出图 3a 中球面距离 $EA(s_1)$ 和 E 点经度(λ_1)

$$\frac{s}{b} = \int_0^\sigma \sqrt{1+k^2\sin^2\sigma'} d\sigma' = I_1(\sigma) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \omega - f\sin\alpha_0 \int_0^\sigma \frac{2-f}{1+(1-f)\sqrt{1+k^2\sin^2\sigma'}} \\ &= \omega - f\sin\alpha_0 I_3(\sigma) \end{aligned} \quad (11)$$

其中, $k = e' \cos\alpha_0$, (10) 和式(11)中的 $I_1(\sigma)$ 和 $I_3(\sigma)$ 以傅里叶展开式的形式展开,其表达式为:

$$I_1(\sigma) = A_1 \left(\sigma + \sum_{l=1}^{\infty} C_{1l} \sin 2l\sigma \right) \quad (12)$$

$$I_3(\sigma) = A_3 \left(\sigma + \sum_{l=1}^{\infty} C_{3l} \sin 2l\sigma \right) \quad (13)$$

进而求解图 3a 球面三角形 NEB , 利用式(14)~(16)计算得到 α_2 和 $\beta_2(\varphi_2)$ 和 ω_2

$$\beta = ph(|\cos\alpha_0\cos\sigma + i\sin\alpha_0| + i\cos\alpha_0\sin\sigma) \quad (14)$$

$$\omega = ph(\cos\sigma + i\sin\alpha_0\sin\sigma) \quad (15)$$

$$\alpha = ph(\cos\alpha_0\cos\sigma + i\sin\alpha_0) \quad (16)$$

最后,利用式(11)和(13)确定 A 点和 B 点的经度差 λ_{12} , 结合 A 点的经纬度值(λ_1, φ_1)和上文求解的 φ_2 值确定 B 点的经纬度值(λ_2, φ_2)。

2.2 检验算法

在本文的研究中,以沪芦高速东海大桥段的路网信息作为真值,并引入 HRAP 算法和 Geodesics 算法进行比对。同时采用两种方法分别检验两种算法的效果,其一为统计地物回波位置经投影变换后位于标志物(东海大桥)多边形轮廓内部的散点数目(以下简称多边形检验),其二为计算投影变换后的点与标志物中心线的平均距离误差、均方根距离误差等(以下简称中心线检验)。

2.2.1 多边形检验

利用 Graham scan^[19]方法统计转换后的地物回波地理坐标准确落入标志物多边形内部的散点个数。由于雷达波束展宽(X波段雷达为 1° 左右)的影响,径向 50 km 处雷达波束展宽已达数百米以上,远大于东海大桥桥面宽度(31.8 m)。故多边形检验中实际落入标志物(东海大桥)多边形轮廓内的散点数目较少。本文仅以多边形内部散点绝对数量的差异作为两种算法在雷达投影转换中差异的评价标准。

2.2.2 中心线检验

分别利用 Geodesics 和 HRAP 算法将地物回波极坐标位置转换至地理坐标,进而与东海大桥中心线经纬度信息(沪芦高速路网文件中包含的地理坐标散点)进行对比,取最短的距离作为距离误差。考虑本文的投影转换精度较高,采用 Haversine 算法计算地球球面上两点的球面距离,其计算公式如下:

$$\text{haversion}\left(\frac{d}{R}\right) = \text{haversion}(\varphi_1 - \varphi_2) + \cos(\varphi_1)\text{haversion}(\Delta\lambda) \quad (17)$$

$$\text{haversion}(\theta) = \sin^2(\theta/2) = (1 - \cos(\theta))/2 \quad (18)$$

其中, d 为需要求解的实际球面距离, R 为地球半径 (6387137 m), φ_1, φ_2 为球面两点的纬度值, $\Delta\lambda$ 为经度差, haversion 为 Haversine 函数。

3 Geodesics 和 HRAP 算法效果检验

在 2016 年 6 月 5 日至 6 月 10 日期间, X 波段雷达处于设备调试阶段, 该时段内未开启雷达地物抑制算法, 雷达低仰角扫描范围内可以观察到明显

的东海大桥固定地物回波。根据本文第 2 节所述的数据筛选方法, 在该时段内筛选出满足条件的雷达地物回波数据。本文在晴空-低湿环境下共得到 13414 个地物回波样本, 降水-高湿环境下 16946 个地物回波样本。进而分别利用 Geodesics 和 HRAP 算法进行极坐标至地理坐标的投影变换工作。最后分别利用多边形和中心线检验方式对两种算法进行实际效果检验。在此指出由于 X 波段雷达距离东海大桥较近, 近似认为电磁波在传播路径上为零折射的情况, 投影变换的计算过程中未涉及等效地球半径。

图 4 是以 2016 年 6 月 5 日 08:00 X 波段雷达数据为例进行的投影转换, 整体而言(图 4a)两种投影转换均取得较好的效果, 转换后的散点沿东海大桥中心线紧密排布。由图 4b 和图 4c 的局部放大图可知, Geodesics 算法在相对雷达距离较远处沿中心线分布更为紧密(红色“+”号), 直观上 Geodesics 算法的投影转换效果略优于 HRAP 算法。为定量说明两种投影转换算法的优劣, 针对样本中的所有地物回波位置进行极坐标到地理坐标的转换, 并分别进行多边形检验和中心线检验。

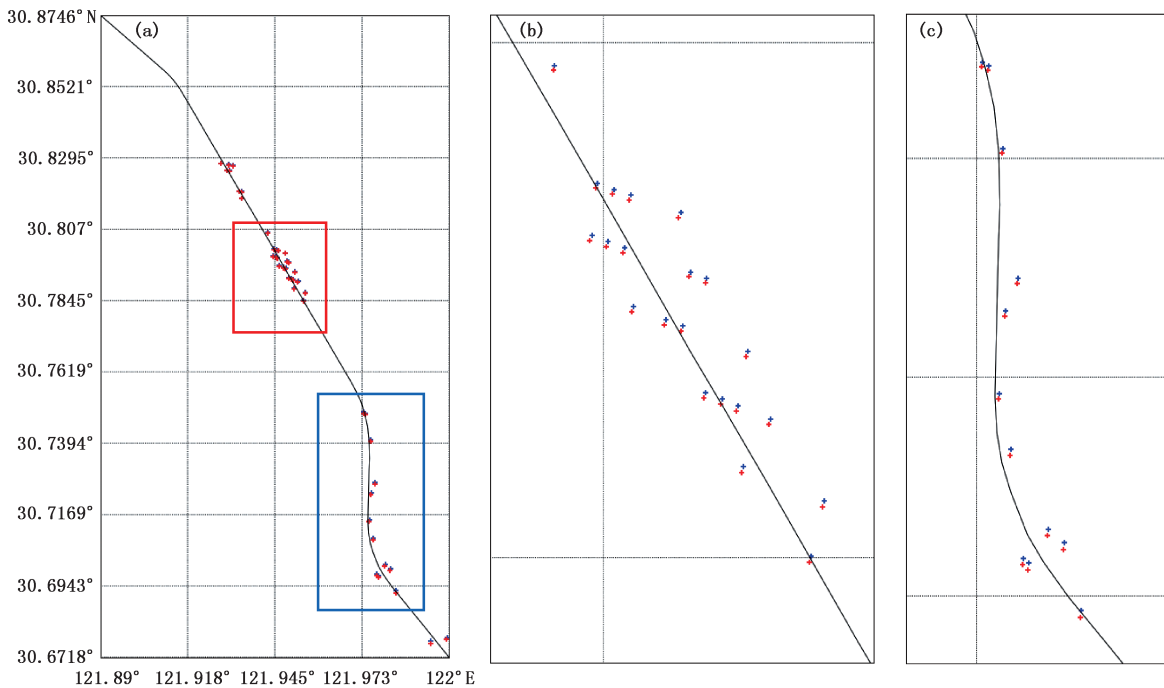


图 4 Geodesic 和 HRAP 算法检验对比:

(a) 投影转换对比图, (b) 红色线框部分局部放大, (c) 蓝色线框部分局部放大
(红色“+”号为 Geodesics 算法结果, 蓝色“+”号为 HRAP 算法结果)

3.1 多边形检验

统计所有样本经投影转换后位于标志物多边形内部的散点个数,计算检验两种算法的准确率,其结果如表 3 所示。

表 3 多边形检验准确率

	样本数	Geodesics	HRAP	Geodesics	HRAP
		命中数	命中数	命中率	命中率
晴空-低湿	13414	478	458	3.563%	3.414%
降水-高湿	16946	614	566	3.623%	3.340%

在多边形检验中,Geodesics 算法在晴空-低湿背景下落入东海大桥多边形内部的点为 478 个,而 HRAP 算法相应为 458 个;在降水-高湿的背景下,Geodesics 算法落入多边形内部的点为 614 个,与之对应的 HRAP 算法为 566 个。以上数据能够说明,在多边形检验评价方面,应对不同天气背景,Geodesics 算法在雷达投影转换方面表现均优于 HRAP 算法。

3.2 中心线检验

表 4 为 Geodesics 和 HRAP 算法在在晴空-低湿和降水-高湿的情况下中心线检验的对比。

表 4 显示 Geodesics 算法在最小误差、平均误差和均方根误差方面均取得更好的效果。Geodesics 算法最小误差达到了 2.673 m(降水-高湿情况下),均方根误差也达到了 115.445 m(晴空-低湿情

况下)。

表 4 Geodesics 和 HRAP 算法转换效果检验对比

	Geodesics	HRAP	Geodesics	HRAP
	(晴空-低湿)	(晴空-低湿)	(降水-高湿)	(降水-高湿)
最小误差	3.064	5.774	2.673	3.543
最大误差	599.498	620.338	599.638	649.936
平均误差	224.909	229.068	226.005	229.853
均方根误差	115.445	116.758	116.761	118.520

为了更好地展示投影转换后的区间分布情况,图 5 展示了所有参与检验的固定地物回波点的概率分布直方图,并利用 KDE(Kernel Density Estimation)核函数拟合了概率分布曲线。KDE 密度估计是一种参数无关的估计成员概率密度分布并拟合概率分布曲线的方法,目前广泛应用在数理统计、金融分析等多个领域。KDE 概率密度估计公式如下:

$$\hat{f}_h(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (19)$$

式(19)中, K 为返回值非负的核函数, h 是用于数据平滑的带宽, K_h 为缩放核,其具体表达式为:

$$K_h(x) = \frac{1}{h} K(x/h) \quad (20)$$

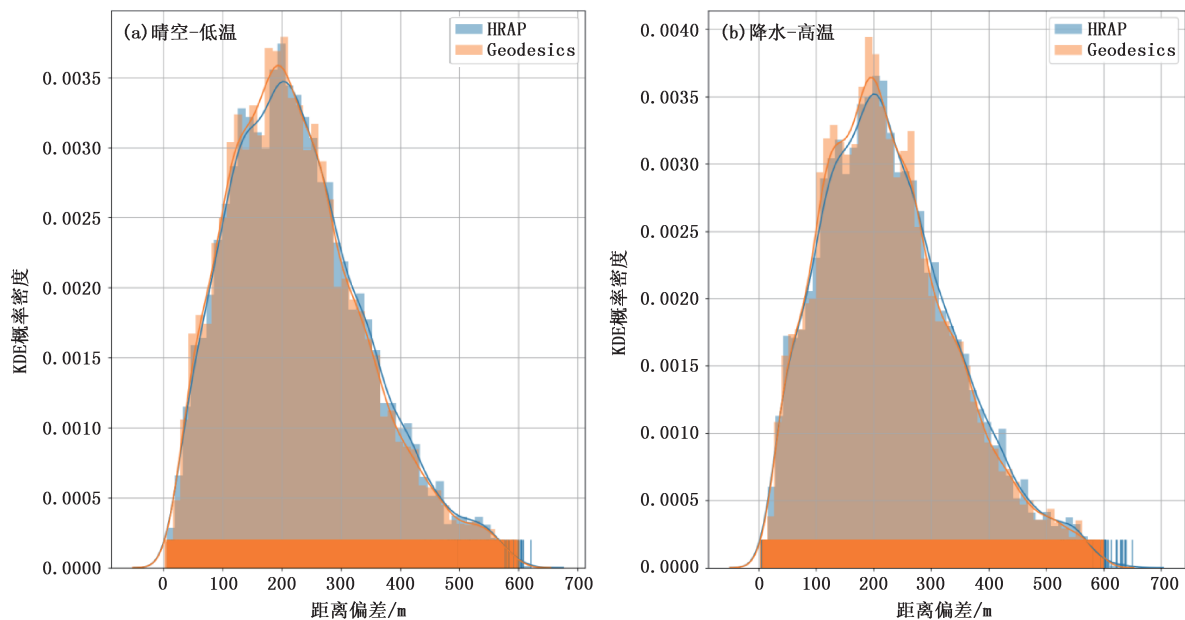


图 5 Geodesics 和 HRAP 雷达投影偏差转换对比

如图 5 所示,晴空-低湿环境下,Geodesics 算法和 HRAP 算法结果在 150~250 m 区间内分布较为集中;对应降水-高湿环境下,两种算法在 150~250 m 的区间内分布较为集中。但 KDE 概率分布曲线显示,200 m 处 Geodesics 算法的概率密度明显高出 HRAP 算法,表明 Geodesics 算法在该区间内更为收敛和集中,在该方面的表现优于 HRAP。对于 0~100 m 的区间范围,Geodesics 算法的 KDE 概率密度均高于 HRAP,说明在此区间内 Geodesics 算法结果分布较多,符合本文采用不同投影算法减小投影误差的初衷。与之相反,在 250 m 以上区间,HRAP 算法整体概率分布要高于 Geodesics 算法。综上,鉴于我们期待雷达极坐标投影转换后能够最大程度上趋近东海大桥中心线,在此方面,Geodesics 算法表现更好。表 3 中的内容也可佐证相比较目前最为成熟和稳定的雷达投影转换算法,Geodesics 算法仍然具有其值得借鉴和使用的方面。

4 结论与讨论

本文利用上海浦东临港 X 波段双偏振雷达观测到的东海大桥地物回波,利用 Geodesic 和 HRAP 投影转换进行了雷达投影转换工作并得到一些初步结论:

(1) 双偏振雷达在低仰角、晴空大气条件下可以清楚地观测到固定的东海大桥地物回波,通过偏振量阈值指标可以分类识别地物回波。

(2) 受限于路网信息精度,本文所述的最短距离为投影转换点到有数据点(路网信息)的最短直线距离,如有条件还需对固定单点地物在不同气象条件下进行投影转换效果检验。

(3) 在雷达定位精度准确的前提下,利用识别出的东海大桥(固定地物回波)极坐标位置,分别通过 Geodesic 和 HRAP 算法转换地理坐标,并将其与东海大桥的实际地理位置进行比较,其结果表明:Geodesic 相较 HRAP 算法在累计偏差、均方根误差、最小偏差及平均偏差等方面效果更好,概率密度也显示 Geodesic 算法在较长距离上的投影误差概率更低。

(4) 本文的工作针对明显标志物(东海大桥地物回波)展开,但是对于实际三维雷达回波的坐标转换效果特别是垂直方向高度的验证,现有条件下还比较困难。如有试验条件,可尝试使用无人机悬挂金

属球法根据雷达探测到的金属球回波信息,运用本文的两种算法进行坐标转换计算,综合评估两种算法的技术指标。

(5) 本文的 Geodesics 算法以 C++ 语言作为开发语言,并辅以 C++ 标准库(C++ Standard Library)完成,在实现跨平台支持的同时,具备准确的算法精度和快速的运算效率。

参考文献

- [1] 吴剑坤,陈明轩. 基于雷达回波区域跟踪算法的临近预报技术进展[J]. 气象科技, 2018, 46(5):899-909.
- [2] 陈雷,戴建华,陶岚. 一种改进后的交叉相关法(COTREC)在降水临近预报中的应用[J]. 热带气象学报, 2009, 25(1): 117-122.
- [3] 周长春,吴蓬萍,陈梁勋. 成都一次脉冲风暴特征及成因分析[J]. 气象科技, 2016, 44(2):283-289.
- [4] 高帆,褚颖佳,胡鹏,等. 一次长生命史超级单体风暴的雷达观测特征和维持机制[J]. 气象科技, 2018, 46(2):336-342.
- [5] 俞小鼎,姚秀萍,熊廷南,等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006:23-24.
- [6] Vincenty T. Direct and inverse solutions of geodesics on the ellipsoid with application of nested equations [J]. Survey Review, 1975, 23(176): 88-93.
- [7] Rapp R H. Geometric Geodesy, part 2 [M]. Ohio State University, 1993.
- [8] Reed S M, Maidment D R. Coordinate transformations for using NEXRAD data in GIS-based hydrologic modeling [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 1999, 4(2): 174-182.
- [9] 金宏斌,徐毓,董峰. 雷达信息处理系统中的坐标变换问题研究[J]. 空军预警学院学报, 2003, 17(3):54-55.
- [10] Karney C F. Algorithms for geodesics [J]. Journal of Geodesy, 2013, 87(1): 43-55.
- [11] 杨淑心,沃维丰,朱莹. 投影法在多雷达坐标变换中的应用[J]. 现代雷达, 2016, 38(6):50-53.
- [12] 穆祥纯. 跻身世界先进水平的上海跨海大桥建设技术[J]. 城市道桥与防洪, 2017(3):71-74.
- [13] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 北京:气象出版社, 2006:50-55.
- [14] Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D: Description and application to an MCS [J]. Weather and Forecasting, 2009, 24(3): 730-48.
- [15] 尹春光,王勤典,胡平,等. X 波段双偏振雷达探测数据分析与校验[J]. 气象科技, 2011, 39(5):608-614.
- [16] 张治国,张曼,仰美霖,等. X 波段双线偏振天气雷达双通道一致性测试及分析[J]. 气象科技, 2017, 45(5):14-24.
- [17] 蔡康龙,李兆明,俞小鼎,等. X 波段双偏振雷达垂直指向法标定的应用[J]. 气象科技, 2018, 46(5):880-885.

- [18] 冯亮,肖辉,孙跃. X波段双偏振雷达水凝物粒子相态识别应用研究[J]. 气候与环境研究, 2018(3):110-130.
- [19] Graham R L. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set [J]. Info Pro Lett, 1972,1:132-133.

Application and Verification of Geodesics Algorithm in Radar Projection Conversion

GUAN Li¹ DAI Jianhua¹ WU hao²

(1 Shanghai Central Meteorological Observatory, Shanghai 200030;

2 Jiangsu Institute of Surveying and Mapping Engineering, Nanjing 210013)

Abstract: Based on the data observed by the X-band dual-polarization mobile radar located at Lingang owned by the Shanghai Meteorological Service, the fixed ground clutter echo of the East China Sea Bridge can be recognized with reflectivity, differential reflectivity and correlation coefficient. Then the Geodesics and HRAP algorithms are introduced to transform the position of fixed ground clutter echoes from polar coordinate to geographic coordinate. The GPS-measured geographic position of Hulu Highway (East China Sea Bridge section) from the National Geomatics Center of China is regarded as the true value. These two algorithms are examined separately under two types of atmospheric conditions: the clear echo with low humidity and the precipitation echo with high humidity. The verification algorithms include two methods: the number of samples located inside the bridge polygon (polygon verification) and the distance from the bridge centerline (centerline verification). The result shows that the Geodesics algorithm performs better compared with the HRAP algorithm both in polygon verification and centerline verification, indicating its importance in the practical application of radar projection conversion.

Keywords: Geodesics algorithm; HRAP algorithm; East China Sea Bridge; ground clutter echo