

景号然,郑伟,刘宗庆,等,2020. 基于 SRTM 天气雷达净空环境评估算法误差分析[J]. 气象,46(2):278-282. Jing H R, Zheng W, Liu Z Q, et al,2020. Error analysis on the assessment algorithm of clearance environment of weather radar based on SRTM [J]. Meteor Mon,46(2):278-282(in Chinese).

基于 SRTM 天气雷达净空环境评估算法误差分析*

景号然^{1,2,3} 郑伟^{2,3} 刘宗庆^{2,3} 谢晓林^{2,3} 彭涛^{2,3}

1 四川省气象探测数据中心,成都 610072

2 中国气象局大气探测重点开放实验室,成都 610225

3 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室,成都 610072

提 要: 采用航天飞机雷达地形测绘使命(SRTM)高程数据对天气雷达净空环境进行评估,可有效提高雷达选址评估效率。利用人工测量数据和 SRTM 数据进行天气雷达净空环境评估对比试验,结果表明基于该数据的天气雷达净空环境评估算法总体与人工测量方法具有较好的一致性。采用方位修正和距离修正算法后,基于该数据的天气雷达净空环境评估算法精度明显提高。

关键词: SRTM 数据,天气雷达,净空环境,误差分析

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.02.013

Error Analysis on the Assessment Algorithm of Clearance Environment of Weather Radar Based on SRTM

JING Haoran^{1,2,3} ZHENG Wei^{2,3} LIU Zongqing^{2,3} XIE Xiaolin^{2,3} PENG Tao^{2,3}

1 Sichuan Meteorological Observation and Data Center, Chengdu 610072

2 CMA Key Laboratory of Atmospheric Sounding, Chengdu 610225

3 Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610072

Abstract: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data were used to evaluate the clearance environment and the site-selection evaluation efficiency of radar was effectively improved. In this paper, the comparative experiment of weather radar clearance environment assessment is carried out by using manual measurement data and SRTM data. Error analysis of this method suggested that the evaluation algorithm of weather radar clearance environment based on SRTM was matching with the artificial measured data. The calculation error was significantly reduced when corrected with azimuth correction and distance correction algorithms.

Key words: SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), weather radar, clearance environment, error analysis

引 言

在天气雷达选址研究中,净空环境直接关系到

雷达的观测能力,同时雷达数据质量也会受到净空环境影响,利用数字高程模型(digital elevation model)可以分析出雷达波束受地形遮挡的影响,同时利用该方法可以完成波束功率损耗评估,且地形

* 中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(KLAS2017010)和四川省气象局课题(SCQXKTQN2020034)共同资助

2018年10月15日收稿; 2019年9月16日收修定稿

第一作者:景号然,主要从事天气雷达技术保障工作. Email:jinghaoran_sc@foxmail.com

遮挡在达到一定程度后是不能被忽略的(Kucera et al, 2004; Krajewski et al, 2006)。我国在雷达站网建设初期利用人工测量获取海拔数据,再采用遮蔽角和等射束方法分析天气雷达净空环境情况(万玉发等, 2000; 张培昌等, 2001)。2011 年国内第一次完成基于航天飞机雷达地形测绘使命(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)数据的天气雷达探测环境覆盖情况图(王曙东等, 2011), 2018 年广东省利用 SRTM 数据完成了该地区的雷达覆盖分析, 进一步推动了该方法的实际应用(李明凤等, 2018)。天气雷达净空环境分析多应用在站网评估和雷达数据质量控制这两方面, 雷达波束具有一定的发射角度, 波束范围内的充塞情况直接影响回波信号强弱, 最终导致回波失真, 因此造成雷达观测数据质量下降的主要原因包括净空环境因素(肖艳娇等, 2008; 张亚萍等, 2002; 杨杰等, 2014; 杨洪平等, 2009; 范思睿, 2016), 已经有研究表明在预先考虑雷达净空环境影响的情况下可以减小降水被低估的风险(王红艳和刘黎平, 2015; 勾亚彬等, 2017), 净空环境评估对雷达站网建设和数据质量控制都有重要的意义, 但是基于 SRTM 数据在雷达净空环境评估中没有给出计算数据的误差分析和影响评估结果的相关因素, 这是阻碍该方法推广和应用的重要原因(朱丹等, 2018; 景号然等, 2019)。本文立足研究应用 SRTM 数据如何获得更为准确的净空环境评估数据, 与测风经纬仪测量值和计算的环境评估值进行对比, 完成实例误差分析, 验证文中提到的距离和方位修正算法在消除分析误差中的作用。

1 算法与数据

由于纬度线圆心并不都经过地球几何地心, 在纬度较大的地区利用勾股定理直接计算两点相对方位和距离会出现明显误差; 在高纬度较高地区, 经纬度并不能等效为垂直(图 1 所示), 所以在研究基于 SRTM 数据的雷达净空环境分析时已经不能忽略这一影响。

查阅资料在近震分析(国家地震局地球物理研究所, 1978)中找到了解决距离误差较好的精确解和近似解, 并兼顾了计算效率。而在消除方位角度计算的误差中, 应用了经典的墨卡托投影法, 该方法在航海途中应用已久, 其投影的地图具有相对方位不变特性。如何应用在经纬度计算相对方位的问题上

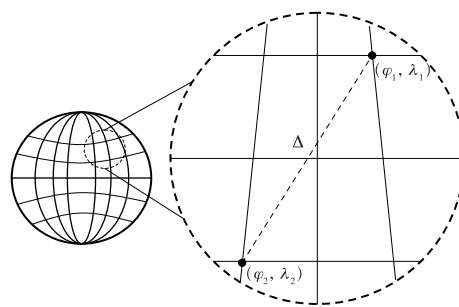


图 1 经纬度计算方位及距离示意图
Fig. 1 Computed azimuth and distance of longitude and latitude

也有详实的阐述(陈榜良, 1956; 程光举, 1980; 彭认灿等, 2016)。将该方法引入算法中可以解决雷达净空环境分析方位误差, 并提高计算效率。

距离误差消除方法: 通过已知两点的经纬度计算两点距离:

$$\Delta = 111.199$$

$$\sqrt{(\varphi_1 - \varphi_2)^2 + (\lambda_1 - \lambda_2)^2 \cos^2\left(\frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}\right)} \quad (1)$$

式中, $(\varphi_1, \lambda_1), (\varphi_2, \lambda_2)$ 是两点的经纬度, Δ 单位为 $^\circ$ 。

在墨卡托投影中, 具有角度不变形的特点, 按照墨卡托投影分别计算出投影 x 和 y 量就可以方便地解出相对方位。

$$\frac{\text{投影上纬线长度}}{\text{地球上实际纬线长度}} = \frac{2\pi R}{2\pi R \cos\varphi} = \sec\varphi \quad (2)$$

$$dy = R \cdot d\lambda \quad (3)$$

$$dx = R \cdot \sec\varphi \cdot d\varphi \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1}(dx/dy) \quad (5)$$

式中, (dx, dy) 表示 $(d\varphi, d\lambda)$ 在墨卡托上的投影距离, θ 表示两个经纬度点之间的相对方位, 以正北为 0° , 顺时针 360° 。

2 对比分析

将距离修正和方位修正算法代入净空分析算法中, 形成基于 SRTM 的雷达净空环境分析方法, 同时为了验证算法可用性, 选择常规高空气象观测业务规范中应用的测风经纬仪作为地物遮挡观测的对比观测项, 在能见度良好情况下开展人工直接观测。以站点 A(四川省阿坝州红原县国家气象观测站)作为实例, 分别利用两种方法进行对比(表 1 和表 2)。

经纬仪分别测量了 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的山体遮蔽角数

表 1 雷达净空环境评估方法对比

Table 1 Comparison of radar clearance environment assessment methods

数据来源	型号/版本	方位分辨率/(°)	测距	方式方法
SRTM	V3@90m	0.25	≥250 km	计算
测风经纬仪	GYR1	0.01	≤能见度	人工

表 2 站点 A 基本信息

Table 2 Basic information on Site A

站名	红原国家气象观测站
站点类型	基准站
经纬度	32.79133521°N、102.5487331°E
地形情况	地形平坦; ≥5 km 处有起伏山体围绕
测量条件	能见度 ≥10 km
测量时间	2018 年 2 月 22 日
测量结果	采集 346 组不定方位最大地物遮挡仰角

据,共测量完成 346 组遮蔽角数据;然后采用 SRTM 高程数据的雷达净空环境评估算法计算获取该站点 360°范围内的遮蔽角数据,计算结果以实测结果为对比项进行了误差分析。

图 2 中,无论是采用和未采用校正的算法,计算结果和实测结果都有较好的趋势一致性;图中纵坐标为最大遮蔽角,横坐标为方位角,正北为 0°,图中下边竖线表示经纬仪采样方位,每条竖线表示该方位上有经纬仪真实观测值。图 2a 中的计算数据没有按照人工测量进行采样,图 2b 为计算数据按照人工测量采样位置进行抽取后的结果对比,抽样的位置在图中横轴上用黑色柱条表示。两图中的不同曲线代表了不同的计算方法,其中第一组未采用校正算法,计算值并没有进行方位和距离的矫正,第二组只引入距离矫正,该算法根据纬度高低对带入计算的纬线长度进行了调整,第三组采用了距离和方位矫正的算法,对方位增加了方向性的矫正。在图中可以看到,前两组的曲线在极大极小值时,与实测值存在明显的方位误差,表现为方位 45°附近存在负偏差,225°附近存在正偏差。

对三组不同算法得到的结果进行误差比较(图 3),不同算法的误差结果在 0°误差线附近变化,看出其中幅度最大的是未进行矫正算法的计算值,变化最小的为采用距离和方位矫正算法的计算值。由图 2 和图 3 都可以看出在 45°、135°、225°和 315°附近造成较为明显的误差,特别是在没有采用矫正算法的情况下,在采用方位矫正后,四个角度附近的

误差明显减小(图 3 中校正后误差),这是因为在纬度较大地区,由于雷达探测覆盖范围较大,经纬度线出现如图 1 中所示情况,不能等效为正方形经纬线布局形式,所以在未引入矫正算法时出现较大方位误差。

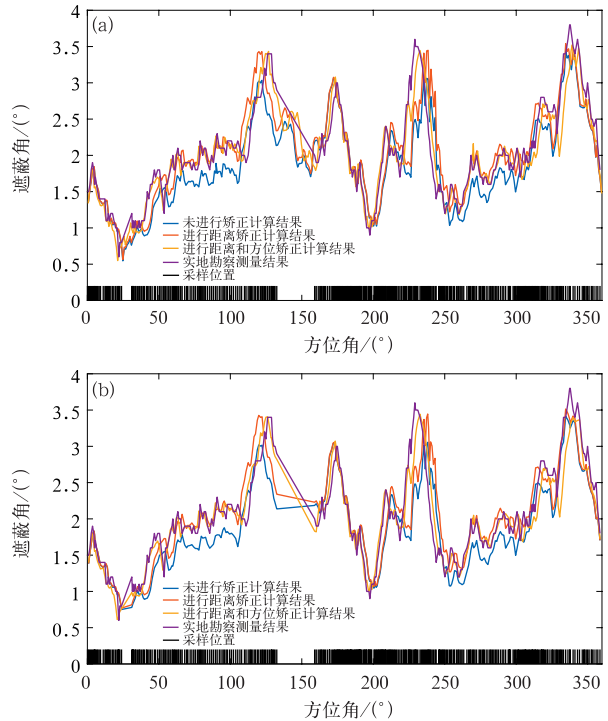


图 2 未抽样进行距离和方位校正算法(a), 抽样后进行距离和方位校正算法(b) 计算结果与实测结果对比

Fig. 2 Comparison of the results calculated and the measured results (a) unsampled distance and azimuth correction algorithm, (b) distance and azimuth correction algorithm after sampling

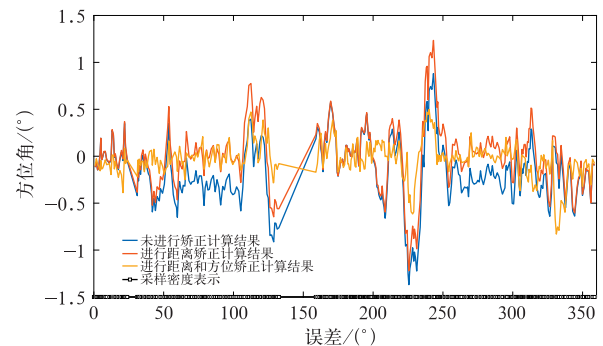


图 3 站点 A 计算值与实测值误差 Fig. 3 Error diagram of calculated value and measured value for Site A

为了研究是否因为 SRTM 数据精度造成计算误差,这里采用了两种精度的 SRTM 数据,分别为 90 m×90 m 和 180 m×180 m 分辨率的数据,进行如上分析,从结果上来看采用两种矫正算法后更高的 SRTM 数据误差更小。采用两种矫正算法后误差明显小于不采用或只采用一种算法的计算结果(表 3)。

表 3 计算值误差分析

Table 3 Calculation parameters and error analysis

SRTM 数据分辨率/m	计算值方位角度分辨率/(°)	矫正算法	计算遮蔽角标准差/(°)	计算遮蔽角平均误差/(°)
180	2	无	0.3411	-0.2146
		距离矫正	0.3393	0.0535
		距离+方位	0.2193	0.0529
180	1	无	0.3412	-0.2855
		距离矫正	0.3351	-0.1320
		距离+方位	0.2675	-0.1376
90	1.5	无	0.3503	-0.1736
		距离矫正	0.3570	-0.0085
		距离+方位	0.1962	-0.0146
90	1	无	0.3401	-0.1986
		距离矫正	0.3451	-0.0362
		距离+方位	0.1920	-0.0451
90	0.5	无	0.3381	-0.2415
		距离矫正	0.3416	-0.0827
		距离+方位	0.2211	-0.0919

3 结论与讨论

在使用 SRTM 数据进行天气雷达净空环境评估时,需要引入对经纬度计算方位和距离的矫正算法。由于纬度越高,纬线定义的半径越小,会造成经纬度转换为距离时造成误差偏大,另外,从实测值与不加方位矫正的计算结果对比发现。

利用距离矫正和方位矫正算法可以有效地减小纬度因素对计算带来的影响,具有较好的实用意义。对四川红原县站点 A 的经纬仪实测结果表明,在较高精度的 SRTM 数据下标准误差和平均误差分别能够达到 0.25°和 0.1°。

对研究分析中的不足进行讨论:(1)文中距离矫正和方位矫正算法为快速算法,若采用精确算法,雷达净空环境分析结果的精度还可提高;(2)采用更高精度的 SRTM 数据集可以提高分析精度;(3)地物遮挡距离较近时采用 SRTM 数据计算时会出量

化误差,可将地物按照距离分别分析;(4)将雷达净空环境分析结果与雷达回波遮挡图进行匹配研究,应用于衰减订正分析。

参考文献

- 陈榜良,1956. 墨卡托投影的原理和性质[J]. 测绘通报,(4):170-174. Chen B L,1956. Principle and properties of Mercator projection[J]. Bull Surv Mapp,(4):170-174(in Chinese).
- 程光举,1980. 墨卡托投影与大圆投影的构成及其在确定航线、计算航程与航向方面的应用[J]. 辽宁师院学报(自然科学版),(1):13-28. Cheng G J,1980. Composition of Mercator projection and large circle projection and its application in routing, calculating range and direction[J]. J Liaoning Normal Univ (Nat Sci Ed),(1):13-28(in Chinese).
- 范思睿,2016. 基于 SRTM 数据的波束遮挡能量耗损率计算方法和效果分析[J]. 高原山地气象研究,36(4):79-85. Fan S R,2016. Generation and verification of beam blockage coefficient based on SRTM data[J]. Plateau Mt Meteor Res,36(4):79-85(in Chinese).
- 勾亚彬,汪章维,刘黎平,等,2017. 雷达波束部分遮挡识别应用及效果评估[J]. 高原气象,36(1) 229-240. Gou Y B, Wang Z W, Liu L P, et al, 2017. Application and evaluation of radar partial blockage identification[J]. Plateau Meteor, 36(1):229-240 (in Chinese).
- 国家地震局地球物理研究所,1978. 近震分析[M]. 北京:地震出版社:31-32. Institute of Geophysics, National Seismological Administration,1978. Near Earthquake Analysis[M]. Beijing:Seismological Press:31-32(in Chinese).
- 景号然,谢晓琳,郑伟,等,2019. 基于 SRTM 数据的天气雷达探测环境分析研究[J]. 气象,45(6):871-876. Jing H R, Xie X L, Zheng W, et al, 2019. Research on weather radar environment detection based on SRTM elevation data[J]. Meteor Mon,45(6):871-876 (in Chinese).
- 李明凤,闵超,张阿思,等,2018. 基于 SRTM 数据的广东新一代天气雷达覆盖研究[J]. 地球信息科学学报,20(8):1201-1208. Li M F, Min C, Zhang A S, et al, 2018. Analysis of CINRAD coverage in Guangdong Province based on SRTM data[J]. J Geo-Inf Sci, 20(8):1201-1208(in Chinese).
- 彭认灿,张志衡,董箭,等,2016. 等距离正圆柱投影世界挂图上大圆航线的绘制[J]. 海洋测绘,36(2):30-33,49. Peng R C, Zhang Z H, Dong J, et al, 2016. A method for plotting great circle route on equidistance cylindrical projection world chart[J]. Hydrogr Surv Chart,36(2):30-33,49(in Chinese).
- 万玉发,杨洪平,肖艳娇,等,2000. 多普勒天气雷达站址视程的客观分析技术[J]. 应用气象学报,11(4):440-447. Wan Y F, Yang H P, Xiao Y J, et al, 2000. An objective method for analyzing the horizon of Doppler weather radar stations[J]. Quart J Appl Meteor, 11(4):440-447(in Chinese).

- 王红艳,刘黎平,2015.新一代天气雷达降水估算的区域覆盖能力评估[J].高原气象,34(6):1772-1784. Wang H Y, Liu L P, 2015. Assessment of CINRAD regional coverage for quantitative precipitation estimation[J]. Plateau Meteor, 34(6): 1772-1784 (in Chinese).
- 王曙东,裴翀,郭志梅,等,2011.基于 SRTM 数据的中国新一代天气雷达覆盖和地形遮挡评估[J].气候与环境研究,16(4):459-468. Wang S D, Pei C, Guo Z M, et al, 2011. Evaluations on Chinese next generation radars coverage and terrain blockage based on SRTM data[J]. Clim Environ Res, 16(4): 459-468 (in Chinese).
- 肖艳姣,刘黎平,杨洪平,2008.基于天气雷达网三维拼图的混合反射率因子生成技术[J].气象学报,66(3):470-473. Xiao Y J, Liu L P, Yang H P, 2008. Technique for generating hybrid reflectivity field based on 3-D mosaicked reflectivity of weather radar network[J]. Acta Meteor Sin, 66(3): 470-473 (in Chinese).
- 杨洪平,张沛源,程明虎,等,2009.多普勒天气雷达组网拼图有效数据区域分析[J].应用气象学报,20(1):47-55. Yang H P, Zhang P Y, Cheng M H, et al, 2009. The valid mosaic data region of the CINRAD network[J]. J Appl Meteor Sci, 20(1): 47-55 (in Chinese).
- 杨杰,刘黎平,勾亚彬,2014.影响浙江地区降水估测几个因素的分析[J].气象,40(5):589-597. Yang J, Liu L P, Gou Y B, 2014. Analysis of several factors affecting precipitation estimate in Zhejiang[J]. Meteor Mon, 40(5): 589-597 (in Chinese).
- 张培昌,杜秉玉,戴铁丕,2001.雷达气象学:第2版[M].北京:气象出版社:94-149. Zhang P C, Du B Y, Dai T P, 2001. Radar Meteorology[M]. 2nd ed. Beijing, China Meteorological Press: 94-149 (in Chinese).
- 张亚萍,刘钧,夏文梅,等,2002.雷达定量估测区域降水波束阻挡系数的计算[J].南京气象学院学报,25(5):640-647. Zhang Y P, Liu J, Xia W M, et al, 2002. The calculation of beam blockage coefficients in estimating regional precipitation with radar[J]. J Nanjing Inst Meteor, 25(5): 640-647 (in Chinese).
- 朱丹,谷军霞,师春香,等,2018.新一代天气雷达布网设计的有效覆盖和地形遮挡分析[J].气象,44(11):1434-1444. Zhu D, Gu J X, Shi C X, et al, 2018. Analysis of effective coverage and terrain blockage for next generation radar network design[J]. Meteor Mon, 44(11): 1434-1444 (in Chinese).
- Krajewski W F, Ntelekos A A, Goska R, 2006. A GIS-based methodology for the assessment of weather radar beam blockage in mountainous regions: two examples from the US NEXRAD network[J]. Comput Geosci, 32(3): 283-302.
- Kucera P A, Krajewski W F, Young C B, 2004. Radar beam occultation studies using GIS and DEM technology: an example study of Guam[J]. J Atmos Oceanic Technol, 21(7): 995-1006.