易雪婷,邹海波. 2017. 多普勒天气雷达波束水平距离的计算方法[J]. 气象与减灾研究,40(1):36-42.
Yi Xueting, Zou Haibo. 2017. Calculation on horizontal distance of Doppler radar beam[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,40(1):36-42.

多普勒天气雷达波束水平距离的计算方法

易雪婷 , 邹海波

江西省气象灾害应急预警中心, 江西 南昌 330096

摘 要: 从球坐标系出发,利用三角形余弦定理和大气折射理论,推导了不作任何近似的、包含地球曲率和大气折射影响的多普勒天气雷达波束水平距离 D_m 的计算公式,并与斜距投影 D_r、地表平面近似的计算公式(不考虑地球曲率和大气折射,记为 D_d)和地表球面近似的计算公式(不考虑大气折射,记为 D_s)进行了对比分析。结果发现,在标准大气状态下,D_m 与 D_r 在高仰角相差 2.5 km 以上(D_r 大),最高距离差达 3.5 km(19.5°仰角最大斜距处);与 D_d 在低仰角相差 0.5 km 以上(D_d 大),与 D_r 相差在 0.5 km 以下(D_m 大)。并利用 2011—2015 年南昌站的探空资料,分析了南昌地区各个季节大气折射的变化情况及其与标准大气的区别。结果显示,夏季南昌上空电磁波的传播受大气折射的影响最大,冬季电磁波受大气折射的影响最小。最后,给出了南昌地区各个季节地球曲率 K 及等效地球半径 R_m 与标准大气的订正关系。

关键词:多普勒天气雷达,水平距离,地球曲率,大气折射,地表平面近似
中图分类号: P412 **文献标识码**: A **文章编号**: 1007-9033(2017)01-0036-07
doi:10.12013/qxyjzyj2017-006

Calculation on Horizontal Distance of Doppler Radar Beam

Yi Xueting , Zou Haibo

Meteorological Disaster Emergency Warning Center of Jiangxi , Nanchang 330096, *China*

Abstract: Based on the spherical coordinate system, triangle cosine theorem and atmospheric refraction, with the consideration of the influence of earth curvature and atmospheric refraction, the formula of radar beam horizontal distance was derived. In addition, this paper also comparatively analyzed several calculation formulas of radar beam horizontal distance. The results indicate that: in the standard atmosphere, the difference between the true horizontal distance and the slope distance of radar beam is more than 2.5 km at high elevation angle (slope distance is larger), and reaches 3.5 km between their maximum distances; the difference between the distances calculated by surface plane approximation formula and the true horizontal distance is more than 0.5 km at low elevation angle (the distance calculated by surface plane approximation formula is larger); the difference between the distance calculated by surface spherical approximation formula and the true horizontal distance is less than 0.5 km at low elevation angle (the true horizontal distance is larger). Result also show that the influence of atmospheric refraction on electromagnetic wave propagation over Nanchang is the greatest in summer, while the smallest in winter. Furthermore, the correction relationships between standard atmosphere and the equivalent earth's radius as well as earth curvature for all seasons in Nanchang are provided in this paper.

Key words: Doppler weather radar; horizontal distance; earth curvature; atmospheric refraction; surface plane approximation

0 引 言

中尺度对流天气如雷暴、暴雨、冰雹、龙卷等经常带来严重的自然灾害,严重威胁着人民生命财产安全,但由于其局地性强、突发性强、持续时间短等特点,常规观测手段受限于较低的分辨率,往往难以

收稿日期: 2016-12-23; **修订日期**: 2017-02-28.
基金项目: 2016 年江西省气象局重点项目"基于雷达 TREC 风和动态分级 *Z-I* 关系的 QPF 研究";中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室基金(编号:2016LASW-B11);2013 年江西省气象局创新团队"市县短临天气预警业务平台".
作者简介: 易雪婷,助理工程师,主要从事气象灾害监测预警业务与研究, E-mail:aryayue@foxmail.com.

对其进行准确的分析和预报(夏文梅等,2002;张小玲等,2012;邹海波等,2014;高士博等,2016)。而多普勒天气雷达则具有很高的时空分辨率(5—6 min,250—1 000 m),雷达资料无论是在临近天气预报、灾害性天气监测还是中尺度数值模式的应用中较常规观测资料都有很大的优越性,尤其是多普勒天气雷达的资料同化,对于改善中尺度数值模式初始场,提升数值预报准确率具有重要意义(Serafin 等,2000;盛春岩等,2006;杨毅等,2008;张沛源等,2008;俞小鼎,2011)。

由于雷达立体观测的扫描方式,原始雷达观测资料是按照仰角、方位和斜距(雷达波束水平距离)来储存,而在实际天气业务和科研中常常需要用到地理坐标系的雷达资料,如基于雷达资料的短时临近业务预报(Mueller 等,2003;Liang 等,2010)和雷达资料在数值模式中的应用等(李媛等,2011;陈杰等,2012)。因此,实际业务中常常需要将雷达资料从极坐标系转换至地理坐标系,且在这个转换过程中雷达波束的定位(水平距离和高度)至关重要,波束定位的精度会直接影响坐标转换的结果。文中将从球坐标系出发,结合三角形的相关定理和大气折射理论,推导一个既包含地球曲率影响又包含大气折射影响的雷达波束水平距离精确计算公式,为雷达波束的精确定位提供参考。

1 雷达波束水平距离的计算方法

1.1 地表平面近似

若将地面近似为水平面(图 1),则雷达波束探测到目标物的水平距离 r 可以表示为:

$$r = R\cos\theta \tag{1}$$

式中,R 为雷达到目标物的斜距,单位:km;θ 为雷达仰角,单位:°。

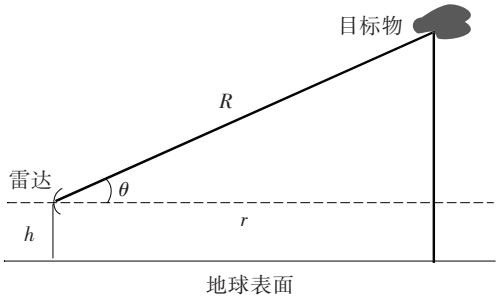


图 1 地表平面近似雷达探测示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of radar detection for surface plane approximation

1.2 地表球面计算

事实上,地球是一个球体,地球表面是球面。如图 2 所示,雷达(位于 A 点)波束探测到的目标物(位于 E 点)的水平距离 r 实际上是 A 点到 B 点的弧长。根据弧长公式,r 可表示为:

$$r = (R_e + h)\varphi \tag{2}$$

式中,h 为雷达测定的海拔高度,单位:km;R_e 为地球半径,单位:km;φ 为雷达(A 点)到地心(O 点)与目标物(E 点)到地心(O 点)的夹角(单位:弧度)。由式(2)可知,只要知道 φ,就可以求出雷达(A 点)到目标物(E 点)的水平距离。由余弦定理可得:

$$R^2 = (R_e + h)^2 + l_{EO}^2 - 2(R_e + h)l_{EO}\cos\varphi \tag{3}$$

式中,R 为雷达到目标物的斜距;l_{EO} 为 E 点到地心 O 点的线段长度。变换式(3)可得:

$$\varphi = \arccos\left[\frac{(R_e + h)^2 + l_{EO}^2 - R^2}{2(R_e + h)l_{EO}}\right] \tag{4}$$

从式(4)可以看出,只要知道目标物(E 点)到地心(O 点)的距离 l_{EO},就可以计算出 φ,进而可计算出雷达(A 点)到目标物(E 点)的水平距离 r。同样,利用余弦定理和三角函数特性,l_{EO} 计算式为:

$$l_{EO}^2 = R^2 + (R_e + h)^2 + 2R(R_e + h)\sin\theta \tag{5}$$

1.3 大气折射的影响

电磁波在真空中是沿直线传播,但实际大气中

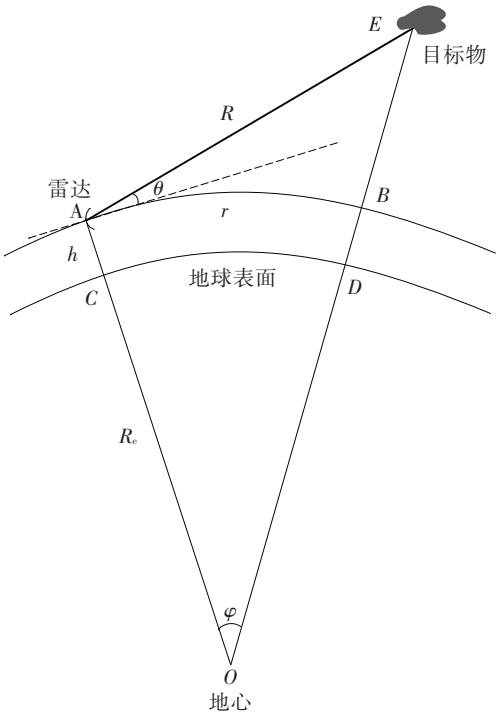


图 2 地表球面近似雷达探测示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of radar detection for spherical surface approximation

电磁波的传播会产生折射现象,大气折射的存在使电磁波的传播路径发生弯曲,故电磁波在实际大气中不是沿直线传播。因此,为进一步提高雷达波束水平距离的计算精度,必须考虑雷达波束传播路径的折射情况。

折射指数 n 定义为电磁波在自由空间的传播速度与在介质中的传播速度之比。在实际大气中折射指数 n 是温度、压力和水蒸气等气象因子的函数(Thayer,1974;张捍卫等,2014),其关系式为:

$$n(h)=\left[\frac{77.6p(h)}{T(h)}+\frac{3.73\times10^{5}e(h)}{T^{2}(h)}\right]\times10^{-6}+1 \quad (6)$$

式中,h 为高度,单位:km;T 为空气温度,单位:K;p 为气压,单位:hPa;e 为水汽压,单位:hPa。由于不同高度上折射指数 $n(h)$不同,电磁波在大气中发生折射是必然的。为了揭示雷达波束的弯曲情况,根据曲率的定义和折射定律,曲率 K 与折射指数 $n(h)$之间可以近似表示为:

$$K=-\frac{\mathrm{d}n(h)}{\mathrm{d}h} \quad (7)$$

由式(7)可知,当曲率 $K<0$(即 $\mathrm{d}n(h)/\mathrm{d}h>0$)时波束向下弯曲,如图 3 所示,此时雷达探测到目标物的距离 l_{AG} 较不考虑大气折射时的距离 l_{AB} 大。同理,当曲率 $K>0$(即 $\mathrm{d}n(h)/\mathrm{d}h<0$)时波束向上弯曲,此时雷达探测到目标物的水平距离较不考虑大气折射时的水平距离小(图略)。而当曲率 $K=0$($\mathrm{d}n(h)/\mathrm{d}h=0$)时,是否考虑大气折射,对雷达探测目标物的水平距离都无影响。

由于地球本身近似球体,地球本身就有一个曲率 K_e。当考虑折射时不仅电磁波是弯曲的,地球表面也是弯曲的,这需要重新考虑电磁波路径的定量计算。为了简化问题,经典的方法是将雷达波束的传播路径视为直线,用等效曲率 K_m(视雷达波束传播路径为直线后,传播路径与地球表面的曲率)来代替地球曲率 K_e。等效曲率 K_m 可表示为:

$$K_m=K_e-K=\frac{1}{R_e}+\frac{\mathrm{d}n(h)}{\mathrm{d}h} \quad (8)$$

相应地,等效地球半径 R_m 可表示为:

$$R_m=\frac{1}{K_e}=\frac{R_e}{1+R_e\dfrac{\mathrm{d}n(h)}{\mathrm{d}h}} \quad (9)$$

综上所述,用等效地球半径 R_m 代替第 1.2 节中的地球半径 R_e 计算得到的弧长 l_{AG}(即雷达到真实目标物的水平距离),就是考虑大气折射影响下采用地表球面近似计算得到的雷达波束水平距离,记为等效水平距离 D_m。

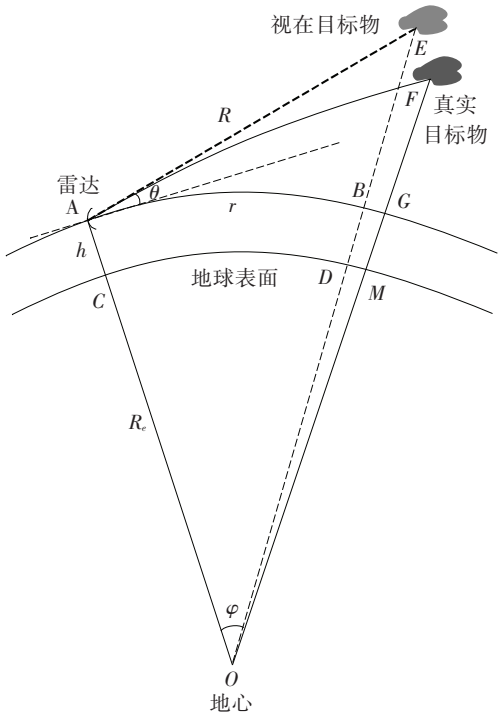


图 3 大气折射存在下地表球面近似雷达探测示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of radar detection with the consideration of the influence of earth curvature and atmospheric refraction

2 计算结果分析

以南昌新一代多普勒天气雷达为例,假设雷达体扫模式为 VCP 21(即降水模式),该模式一次体扫共有 9 个不同的仰角,分别为 0.5°、1.45°、2.4°、3.35°、4.3°、6.0°、9.9°、14.6°和19.5°,距离库为 1 km(即同一波束的采样频率),体扫一次所需时间约为 6 min。

在标准大气下,曲率 $K=-\dfrac{\mathrm{d}n(h)}{\mathrm{d}h}\approx4\times10^{-5}$ km^{-1},将其代入式(9)可计算得到等效地球半径 $R_m=8\,500$ km,将 R_m 视为 R_e 代入式(2)—(5)便可计算出不同仰角不同斜距处雷达波束的水平距离,这就是标准大气下考虑大气折射影响的采用地表球面近似计算的水平距离,记为标准大气下的等效水平距离 D'_m。将 D'_m 与雷达波束斜距投影(记为 D_r)、采用地表平面近似计算的水平距离(记为 D_d)、采用地表球面近似计算的水平距离(记为 D_s)进行对比分析,以探讨各种方法计算得到的水平距离的精度。

此外,由于大气中的对流云团一般位于 20 km 高度以下,文中将重点探讨 20 km 高度以下目标物水平距离的精度。目标物的高度 H 的计算式为:

$$H = h + R\sin\theta + \frac{R^2}{2R_e} \tag{10}$$

利用式(10)大致计算出不同仰角下 20 km 高度处的最大斜距。以南昌多普勒雷达为例,雷达的海拔高度 h 为 95 m,地球半径 R_e 取 6 370 km。表 1 是根据式(10)在最大探测高度 20 km 条件下计算出的各仰角下的最大斜距。由表 1 可以看出,最大斜距随着仰角的增加迅速减小,当仰角为 0.5°时最大斜距为 452 km,仰角为 19.5°时最大斜距为 59 km,约为 0.5°仰角的 10%。

表 1 南昌多普勒雷达不同仰角下的最大斜距

Table 1 Maximum slant distance at different elevation angles of Doppler radar in Nanchang

序号	仰角/(°)	最大斜距/km	序号	仰角/(°)	最大斜距/km
1	0.50	452	6	1.45	368
2	2.40	304	7	3.35	254
3	4.30	217	8	6.00	169
4	9.90	111	9	14.60	78
5	19.50	59			

2.1 与斜距投影的对比

图 4 是雷达波束等效水平距离 D'_m 与对应斜距投影 D_r 的差(记为水平距离误差)随仰角和距离的分布。分析发现,在标准大气下,在不同仰角不同距离处水平距离误差都小于 0 km,即 $D'_m < D_r$;水平距离误差随仰角和距离的增大而增大,各仰角上最大水平距离误差均位于最大斜距处(表1),且最大水平距离误差随仰角的增加而增加,水平距离误差从 0.5°仰角处的 −0.7 km 逐渐上升至 19.5°仰角处的 −3.5 km。雷达 PUP 有 0.5°、1.5°和 2.4°三种仰角的反射率产品,且最大探测距离为 230 km。从图 4 还可以看出,在 PUP 产品的最大探空距离 230 km 以内,0.5°—1.45°仰角的最大水平距离误差都在 −0.5 km 以内,2.4°仰角的最大水平距离误差基本也在 −0.5 km 以内。由于多普勒天气雷达的距离库为 1 km(即分辨率),−0.5—0.5 km 的误差识别不了,即 230 km 以内 2.4°以下仰角探测的 D'_m 与 D_r 相当。

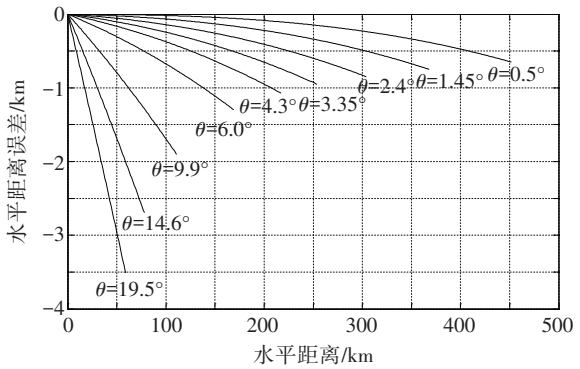


图 4 不同仰角雷达波束等效水平距离与斜距投影之差($D'_m - D_r$)

Fig. 4 The difference between equivalent horizontal distance and slant distance of radar beam at different elevation angles ($D'_m - D_r$)

2.2 与地表平面近似的对比

分析雷达波束等效水平距离 D'_m 与采用地表平面近似计算的水平距离 D_d 之差(图 5)发现,在标准大气状态下,不同仰角上采用地表平面近似计算的雷达波束水平距离都较等效水平距离大,即 $D_d > D'_m$,且两者的距离差随着仰角和距离的增大而增大,各个仰角上的最大距离差都位于最大斜距处。虽然这个距离差随仰角的增大而增大,但是最大距离差(0.63 km)并不是出现在最大仰角 19.5°上,而是出现在最小仰角 0.5°上。这主要是由于高仰角探测的雷达波束斜距投影较短,低仰角探测的斜距投影较长所致(表1)。从图 5 还可以看出,在 230 km 范围以内,9 个仰角上 D_d 与 D'_m 的差都在 0.5 km 以内,小于 0.5 倍分辨率,这表明在标准大气状态下,230 km 以内的目标物采用地表平面近似计算的水平距离与考虑大气折射影响下采用地表球面计算的水平距离基本相当。

2.3 与球面地表的对比

图6为雷达波束等效水平距离D'_m与采用地

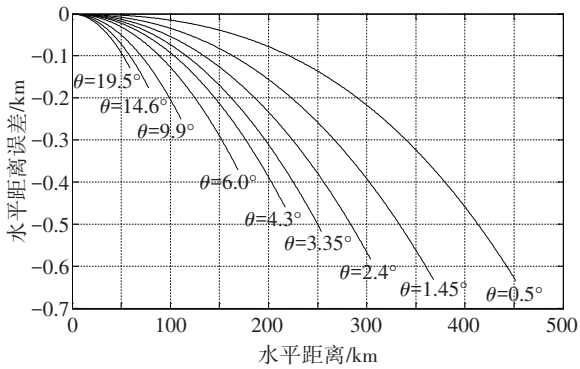


图 5 不同仰角雷达波束等效水平距离与平面近似距离之差($D'_m - D_d$)

Fig. 5 The difference between equivalent horizontal distance and plane approximation distance of radar beam at different elevation angles ($D'_m - D_d$)

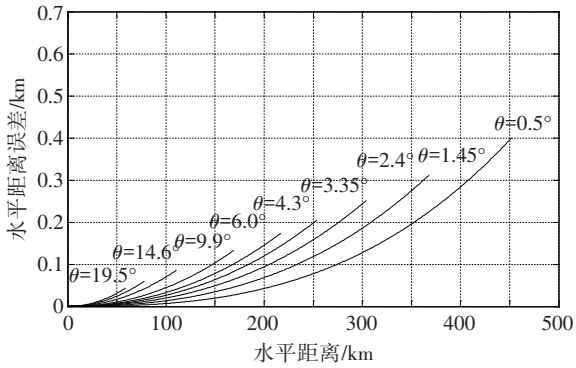


图 6 不同仰角雷达波束等效水平距离与球面近似距离的差($D'_m - D_s$)

Fig. 6 The difference between equivalent horizontal distance and spherical approximation distance of radar beam at different elevation angles ($D'_m - D_s$)

表球面计算(不考虑大气折射影响)的水平距离 D_s 之差的分布。分析发现,与采用地表平面近似计算的水平距离不同,在标准大气状态下,不同仰角上不同斜距处,采用地表球面(不考虑大气折射影响)计算的雷达波束水平距离都较等效水平距离近,即 $D_s < D'_m$;这个距离差随距离的增大而增大,各个仰角上的最大距离差都位于最大斜距处,最大距离差(0.4 km)也位于最小仰角 0.5°上的最大斜距处。对比分析图 5 和图 6 还可以发现,各个仰角上 $|D'_m - D_d|$ 都较 $|D'_m - D_s|$ 大。这意味着,在标准大气状态下,采用地表球面计算的回波的水平距离较采用地表平面近似计算的更接近等效水平距离。

3 个例分析

第 2 章分析结果表明,在标准大气状态下,考虑大气折射影响后采用地表球面计算方法得到的雷达波束等效水平距离 D'_m 与斜距投影 D_r、采用地表平面近似计算的水平距离 D_d、采用地表球面近似计算得到的水平距离 D_s 都有一定的差异。那么将这一推导出的等效水平距离计算公式,应用于雷达产品中的效果如何呢? 下面将利用雷达波束实况资料、探空资料和降水资料来验证该公式的实用性。

南昌站雷达资料、探空资料和南昌周边加密自动站逐分钟降水资料来源于江西省气象信息中心,雷达资料和降水资料的时间为 2013 年 7 月 13 日 12:02—12:06,即台风"苏力"影响江西东南部的时间;探空资料为 2013 年 7 月 13 日 08 时(探空观测为一天两次,分别为 08 时和 20 时,因此文中选用更靠近 12 时的 08 时的资料)。雷达资料处理采用邹海波等(2014)的方法将极坐标数据转换为格点数据。

根据南昌探空站的温度和露点温度资料,利用 1966 年世界气象组织建议采用的饱和水汽压计算公式(邹海波等,2013)计算各层的水汽压。再将各层水汽压、探空温度和气压入式(6)可计算各层的折射指数 n(图 7)。再利用式(7)便可计算各层大气折射影响下电磁波传播路径的曲率 K。从图 7 可以看出,2013 年 7 月 13 日 08 时南昌上空的折射指数随高度的增加先快速减小后缓慢减小,在近地面折射指数最大,超过了 35×10^{-5} km^{-1},到 8 km 高度以后降至 12×10^{-5} km^{-1}以下。结合式(7)可知,雷达电磁波的曲率也会随高度的变化而变化,这给雷达波束水平距离的计算带来了困难。为了简化计算,对折射指数 n 进行了线性拟合,拟合方程为 $n = (-2.26h + 31.76)\times10^{-5}$。再利用式(7)可以得到电磁波的曲率 $K = 2.26\times10^{-5}$ km^{-5},这比标准大气状态的曲率 $K = 4\times10^{-5}$ km^{-5}小了近一倍,这表明 2013 年 7 月 13 日 08 时南昌上空电磁波的传播受大气折射的影响相对较小。将 $K = 2.26\times10^{-5}$ km^{-5}代入式(8)可得到地球等效半径 $R_m = 7\ 441$ km,再将 $R_m = 7\ 441$ km 代入式(2)—(5)式便可以计算出等效水平距离 D_m。利用探空资料计算得到的 D_m,可以认为是雷达波束的真实水平距离。

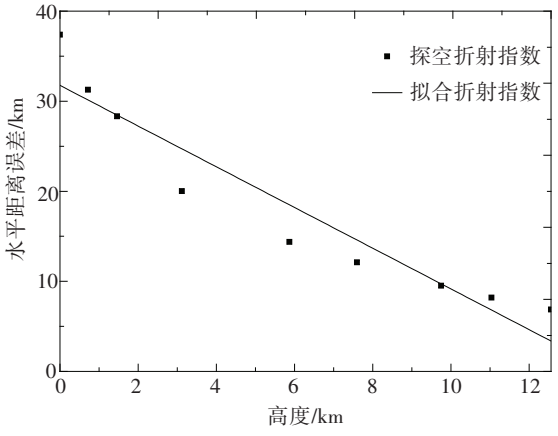


图 7 2013 年 7 月 13 日 08 时南昌站折射指数 n 的垂直分布

Fig. 7 The vertical distribution of atmospheric refractive index in Nanchang station at 08:00 BT on July 13, 2013

图 8 为 2013 年 7 月 13 日 12:2′48″ 南昌雷达 14.5°仰角的回波。其中回波的水平距离是用等效地球距离 R_m(7 441 km)代替 R_e 后代入式(2)—

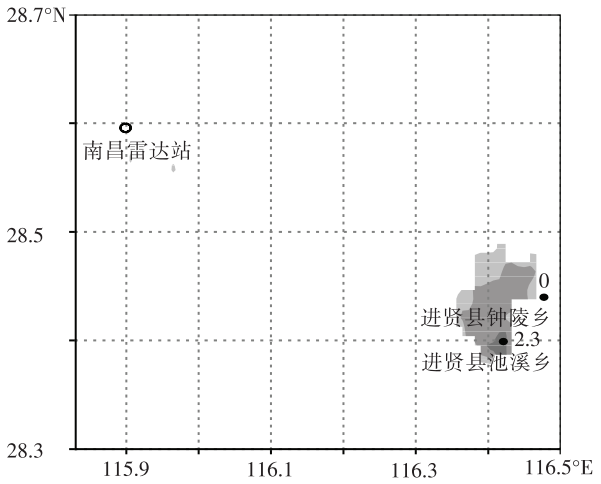


图 8 2013 年 7 月 13 日 12:2′48″南昌多普勒雷达 14.5°仰角探测的雷达波束反射率

Fig. 8 Radar reflectivity of Nanchang Doppler radar at 14.5 degree elevation angle at 12:02:28 BT on July 13, 2013

(5)中计算得到的 D_m。为了验证这种计算结果与实际降水的对应情况,查阅了回波附近的加密自动气象站,在强回波附近及回波远端边缘各有一个自动气象站,即进贤县池溪乡站和进贤县钟陵乡站。从图 8 可以看出,进贤县池溪乡站位于强回波中心,12:02—12:06 累计降水量为 2.3 mm,进贤县钟陵乡在回波外侧,12:02—12:06 累计降水量为 0 mm,回波与降水的位置对应较好。

4 曲率的季节变化特征

实际业务应用时,不可能每天输入探空资料,以订正探测距离。因此,文中利用 2011—2015 年南昌站的探空资料,计算了各个季节南昌上空电磁波传播路径的曲率 K 及相应的等效地球半径 R_m 的变化,以期给出一个业务上实用的订正关系。

表 2 为南昌地区 2011—2015 年春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12 月—次年 2 月)大气折射曲率 K 的均值、中位数、标准差,并计算了其与标准大气下的曲率 K(4×10^{-5} km^{-5})之差。可以看出,夏季大气折射曲率 K 的均值和中位数比其他季节都要大,与标准大气下的曲率之差比其他季节都要小,冬季曲率 K 最小,与标准大气下的曲率之差最大。这说明,夏季南昌上空电磁波的传播受大气折射的影响相对较大,夏季南昌上空大气折射对电磁波传播的影响与标准大气的差别最小;而冬季南昌上空电磁波的传播受大气折射的影响相对较小,大气折射对电磁波传播的影响与标准大气的差异比其他季节更大;冬季如果利用标准大气下的曲率计算雷达波束水平距离可能会出现较大的误差。标准差的最大值出现在夏季,最小值出现在冬季,这说明夏季电磁波大气折射影响的波动较大,而冬季电磁波大气折射影响的波动较小。将表 2 中南昌地区各季节大气折射曲率 K 值代入式(8),计算得到南昌地区各个季节等效地球半径 R_m,并给出了其与标准大气下等效地球半径 R_m(8 500 km)之差(表 3)。

表 2 南昌地区大气折射曲率 K 的季节变化及其与标准大气下曲率 K 之差(单位:10^{-5} km^{-5})

Table 2 Seasonal variation of atmospheric refractive curvature in Nanchang and its difference with the atmospheric refractive curvature in standard atmosphere(the former minus the latter; unit:10^{-5} km^{-5})

季节	均值	差值 A	中位数	差值 B	标准差
春	2.99	−1.01	3.13	−0.87	1.45
夏	3.10	−0.90	3.36	−0.64	1.76
秋	3.00	−1.00	3.00	−1.00	1.50
冬	2.11	−1.89	2.38	−1.62	1.33

注:差值 A 为南昌地区大气折射曲率 K 的均值与标准大气下曲率 K 的差值,差值 B 为南昌地区大气折射曲率 K 的中位数与标准大气下曲率 K 的差值.

表 3 南昌地区等效地球半径 R_m 的季节变化及其与标准大气下等效地球半径 R_m 之差(单位:km)

Table 3 Seasonal variation of equivalent earth radius in Nanchang and its difference with the equivalent earth radius in standard atmosphere(the former minus the latter; unit:km)

季节	均值	差值 A	中位数	差值 B
春	7 866	−634	7 957	−543
夏	7 937	−563	8 107	−393
秋	7 874	−626	7 877	−623
冬	7 361	−1139	7 508	−992

注:差值 A 为南昌地区等效地球半径 R_m 的均值与标准大气下等效地球半径 R_m 的差值,差值 B 为南昌地区等效地球半径 R_m 的中位数与标准大气下等效地球半径 R_m 的差值.

5 结 论

从球坐标系出发,利用三角形余弦定理和大气折射理论,推导了不作任何近似的、包含地球曲率和大气折射影响的雷达波束水平距离(等效水平距离 D_m,标准大气下记为 D'_m)的计算公式,并与斜距投影 D_r、地表平面近似的计算公式 D_d(不考虑地球曲率和大气折射)和地表球面近似的计算公式 D_s(不考虑大气折射)进行了对比分析,得到以下结论:

1) 在标准大气状态下,不同仰角不同距离处,D'_m 均要小于 D_r,且在高仰角上相差 2.5 km 以上;水平距离误差随仰角和距离的增大而增大,各仰角的最大距离差均位于最大斜距处,最大距离差出现

在最大仰角 19.5°上,达 3.5 km;D_d 较 D'_m 远,且在低仰角上相差 0.5 km 以上,最大距离差(0.63 km)出现在最小仰角 0.5°上;D_s 较 D'_m 近,二者之差都在 0.5 km 以下,最大距离差(0.4 km)也位于最小仰角 0.5°上的最大斜距处。

2) 结合 2013 年 7 月 13 日 08 时台风"苏力"影响江西期间南昌站的探空资料,计算了南昌附近大气的折射情况(等效地球半径为 7 441 km),利用推导得到的雷达波束等效水平距离 D_m 计算公式,将 D_m 引入雷达回波的计算,发现所得到的雷达波束反射率与降水量的对应关系较好,雷达回波的定位较为精确。

3) 利用探空资料,分析了南昌地区各个季节大气折射的变化情况及其与标准大气的区别,并给出了一个业务上实用的订正关系。结果显示,夏季南昌上空电磁波的传播受大气折射的影响最大,且这种影响的波动较大。冬季电磁波受大气折射的影响最小,且这种影响的波动较小。

参考文献(References)

陈杰,闵锦忠,王世璋,等. 2012. WRF-En SRF 系统同化多普勒雷达资料在多类型强对流天气过程的数值试验[J]. 大气科学学报,35(6):720-729. Chen J, Min J Z, Wang S Z, et al. 2012. A numerical experiment on WRF-En SRF for assimilation of Doppler radar data in multicase strong convective weather processes[J]. Trans Atmos Sci, 35(6):720-729.(in Chinese)

高士博,闵锦忠,黄丹莲. 2016. EnKF 协方差膨胀算法对雷达资料同化的影响研究[J]. 气象科学, 36(3):319-328. Gao S B, Min J Z, Huang D L. 2016. Impact of inflation methods on radar data assimilation using EnKF[J]. Scientia Meteor Sinica, 36(3):319-328.(in Chinese)

李媛,刘健文,董佩明,等. 2011. GRAPES-3Dvar 雷达资料直接同化对江淮暴雨数值预报影响的分析研究[J]. 气象, 37(4):403-411. Li Y, Liu J W, Dong P M, et al. 2011. Analysis of the impact of radar data assimilation on the numerical forecast of Jianghuai rainstorm by using GRAPES-3Dvar[J]. Meteor Mon, 37(4):403-411.(in Chinese)

Liang Q Q, Feng Y R, Deng W J, et al. 2010. A composite approach of radar echo extrapolation based on TREC vectors in combination with model-predicted winds[J]. Adv Atmos Sci, 27(5):1119-1130.

Mueller C, Saxen T, Roberts R, et al. 2003. NCAR auto-nowcastsystem[J]. Wea Forecasting, 18(4):545-561.

Serafin, Robert J, Wilson, et al. 2000. Operational weather radar in the United States: progress and opportunity[J]. Bull Amer Meteor Soc,81(3):501-815.

盛春岩,薛德强,雷霆,等. 2006. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验[J]. 气象学报,64(3):293-307. Sheng C Y, Xue D Q, Lei T, et al. 2006. Comparative experiments between effects of Doppler radar data assimilation and increasing horizontal resolution on short-range prediction [J]. Acta Meteor Sinica,64(3):293-307.(in Chinese)

Thayer G D. 1974. An improved equation for the radio refractive index of air[J]. Radio Sci, 9(10):803-807.

夏文梅,张亚萍,汤达章,等. 2002. 暴雨多普勒天气雷达资料的分析[J]. 南京气象学院学报,25(6):787-794. Xia W M, Zhang Y P, Tang D Z, et al. 2006. Analysis of Doppler weather radar measurements on rain gush[J]. Trans Atmos Sci, 25(6):787-794.(in Chinese)

杨毅,邱崇践,龚建东,等. 2008. 利用三维变分方法同化多普勒天气雷达资料的试验研究[J]. 气象科学,28(2):124-132. YangY, Qiu C J, Gong J D, et al. 2008. Study on Doppler weather radar data assimilation via 3D-Var[J]. Scientia Meteor Sinica, 28(2):124-132.(in Chinese)

俞小鼎. 2011. 强对流天气的多普勒天气雷达探测和预警[J]. 气象科技进展,1(3):31-41. Yu X D. 2011. Detection and warnings of severe convection with Doppler weather radar[J]. Adv Meteor Sci Technol, 1(3):31-41.(in Chinese)

张捍卫,雷伟伟,丁安民. 2014. 中性大气折射指数理论研究[J]. 大地测量与地球动力学,34(2):51-54. Zhang H W, Lei W W, Ding A M. 2014. Theoretical research on neutral atmospheric refraction index[J]. J Geod Geodyn, 34(2):51-54.(in Chinese)

张沛源,杨洪平,胡绍萍. 2008. 新一代天气雷达在临近预报和灾害性天气警报中的应用[J]. 气象,34(1):3-11. Zhang P Y, Yang H P, Hu S P. 2008. Applications of new generation weather radar to nowcasting and warning of severe weather[J]. Meteor Mon, 34(1):3-11.(in Chinese)

张小玲,谌芸,张涛. 2012. 对流天气预报中的环境场条件分析[J]. 气象学报,70(4):642-654. Zhang X L, Chen Y, Zhang T. 2012. Meso-scale convective weather analysis and severe convective weather forecasting[J]. Acta Meteor Sinica, 70(4):642-654.(in Chinese)

邹海波,单九生,邓诗茹. 2014. 多普勒雷达资料的网格化研究[J]. 气象与减灾研究,37(2):23-30. Zou H B, Shan J S, Deng S R. 2014. Study of the Doppler radar data gridding[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 37(2):23-30.(in Chinese)

邹海波,单九生,吴珊珊,等. 2013. GPS 水汽反演方法的改善及其在台风暴雨中的应用[J]. 中山大学学报(自然科学版),52(6):17-25. Zou H B, Shan J S, Wu S S, et al. 2013. Improvement of GPS moisture solving method and the application to typhoon induced heavy rainfall[J]. Acta Sci Nat Univ Sunyatseni, 52(6):17-25.(in Chinese)