

文章编号: 2096-1618(2023)02-0154-06

基于天气雷达的太阳法方位波束宽度改进算法

王新¹, 赵思亮¹, 漆洋², 李文钊¹

(1. 重庆市气象信息与技术保障中心, 重庆 401147; 2. 成都理工大学地球物理学院, 四川 成都 610051)

摘要:天气雷达天线性能参数是雷达常数中十分重要的一部分,直接影响雷达回波强度的测量精度。文中讨论了将太阳作为检测信号源对天气雷达天线参数测试的方法及测试步骤,并提出一种太阳法方位波束宽度修正算法。利用太阳法对一部X波段天气雷达的天线进行测试,并对比分析方位波束宽度算法改进前后对波束宽度的测量误差。实验结果表明,改进算法后,波束宽度测试结果更加稳定,且测试精度较高。

关键词:太阳法;波束宽度;天气雷达

中图分类号:TN958

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcu.2023.02.005

0 引言

天气雷达天线参数是衡量雷达探测精度和数据质量的重要指标。天线的方向图表示天线辐射能量在空间的分布情况,测量天线辐射特性十分重要,可通过对天线方向图的测量推导出天线主瓣宽度等指标^[1]。目前天气雷达由于业务需要,架设位置均要求制高点周边一两百公里无遮挡,这就给天气雷达天线指标的定期和不定期测试带来了极大不便。纵然架设铁塔测试,也因设备笨重、电源不便、操作不便、测试精度差等原因而无法普及,所以目前该项指标测试虽然重要,但由于实施困难和不便而不做强行测试要求。少数测试也会利用太阳法定性测试,只要大致满足即可,该方法的使用,因操作简单、测试精准高而使国内雷达厂家和用户大大减少测试成本,提升雷达测试精度。

本文讨论了太阳法测试天线方向图的方法,分析太阳法方位波束宽度随太阳高度角变化的规律,并提出一种太阳法方位波束宽度修正算法,提高了波束宽度测量精度。

1 太阳法理论基础

射电源是指能向外辐射电磁波的恒星、行星及星云等天体。对于地球来说,太阳是能流密度较大的射电源,具有较宽的频谱域且极化特性已知,太阳噪声是太阳对外辐射的射电电磁波^[2]。因此,在天气雷达研究领域,可以将太阳作为雷达的一个天然信号源,且绝对满足远场条件,在天气雷达天线测试领域具有较高的应用

价值和广泛的应用前景。太阳法实验条件应满足:实验期间没有明显的太阳活动(太阳黑子、太阳耀斑等);尽量选择天气晴朗时进行实验,下雨、雾天不建议做太阳法实验;实验时太阳高度角应在 $20^{\circ} \sim 50^{\circ}$ ^[3-7]。

1.1 太阳光学角径

在地球上观察到的太阳是有一定角径大小的,通常称为太阳光学角径。太阳作为地球最近的恒星,距离地球的平均距离约为 1.5×10^8 km,太阳的平均赤道半径为696295 km。

在地球上观察到的太阳角径为

$$\theta_s = 2 \arctan(d/D) \quad (1)$$

式中, d 为太阳赤道半径, D 为地球与太阳之间的距离。经计算得出,太阳光学角径约 θ_s 约为 0.53° 。太阳光学角径在太阳法实验中通常用于波束宽度的修正,示意图见图1。

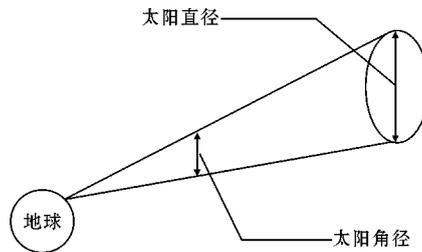


图1 太阳光学角径示意图

1.2 太阳能流密度

太阳能流密度是指单位时间和频率内沿着法线方向通过的单位面积太阳噪声能量,用来表示太阳射电强弱,单位 $W/(m^2 \cdot Hz)$ ^[8-13]。太阳流量单位A.U表示:

$$1 \text{ A.U} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1} \quad (2)$$

不同频率上的太阳能流密度为

$$S_f = (\alpha S_{10.7} + \beta)(f - 2800) + S_{10.7} \quad (3)$$

式中: $S_{10.7}$ 为 10.7 cm (频率为 2800 MHz) 处的太阳能流密度 (可在专用网站上查知); α 为 0.0002; β 为 -0.01; f 为雷达工作频率。

2 太阳法方位波束宽度修正算法

2.1 太阳法天线方向图测量

2.1.1 测量原理

天线噪声温度是用来衡量天线接收的功率大小的一个量。根据奈奎斯特定理,外部噪声源在带宽为 Δf 内所产生的噪声功率 P_r 为

$$P_r = kT_a \Delta f \quad (4)$$

其中, k 为玻尔兹曼常数 (1.38×10^{-22} J/K), T_a 为天线噪声温度。

由式(4)可知,天线接收的噪声功率与天线噪声温度成正比,因此天线噪声温度只用于表示天线接收的噪声功率的大小,与太阳的物理温度以及环境温度无关。由于太阳辐射能量的强弱和太阳能流密度有关,因此天线接收到的噪声功率与太阳能流密度有密切的关系^[14]。

若太阳能流密度为 S_0 , 雷达天线对准太阳时,在带宽为 Δf 内天线接收的噪声功率 P_s 为:

$$P_s = 0.5 \cdot A_e \cdot \Delta f \cdot S_0 \quad (5)$$

其中 A_e 为天线有效面积,由于太阳噪声为全极化,因此系数 0.5 表示天气雷达天线接收到太阳的一个偏振分量 (水平极化或垂直极化)。

太阳的辐射强度与频率有关,因此天线噪声温度与频率有关。太阳能流密度:

$$S_0 = \int_{\Omega} P(\theta, \varphi) B(\xi, \zeta) \quad (6)$$

式中 $P(\theta, \varphi)$ 为天线功率方向图, $B(\xi, \zeta)$ 为太阳亮温度。令 $P_r = P_s$, 则

$$\begin{cases} T_a = \frac{1}{2k} A_e \int_{\Omega} P(\theta, \varphi) B(\xi, \zeta) d\Omega \\ B(\xi, \zeta) = 2kT_B(\xi, \zeta) / \lambda^2 \end{cases} \quad (7)$$

式中 $T_B(\xi, \zeta)$ 为太阳亮温度。则:

$$T_a = \frac{A_e}{\lambda^2} \int_{\Omega} P(\theta, \varphi) T_B(\xi, \zeta) d\Omega \quad (8)$$

因此天线噪声温度是天线功率方向图和太阳亮温度的卷积,所以太阳法所测得的方向图和实际天线功率方向图不一致,即天线温度漂移曲线是天线功率方向图受太阳亮温度加权的結果^[14],如图2所示。

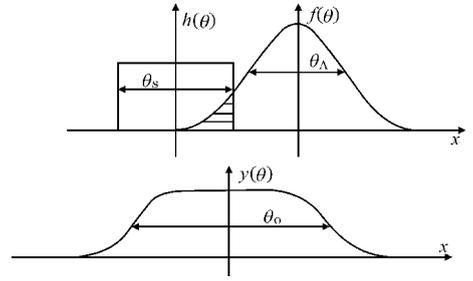


图2 方向图测量原理

只有当太阳的角径相对于雷达波束宽度满足 ($\theta_A / \theta_s > 5$) 时,太阳法所测得的功率方向图才保持天线功率方向图的原来值。对于 X 波段天气雷达来说,波束宽度与太阳角径不满足上述条件,因此用太阳法实际所测得的方向图和天线功率方向图的半功率波束宽度并不一致,太阳法测得的波束宽度将被加宽,必须进行修正之后才能得到天线真实的波束宽度。

2.1.2 测量步骤

天气雷达在进行太阳法实验时,最好选择晴朗的天气,太阳高度角位于 $20^\circ \sim 50^\circ$ 最佳,计算机时间精度应不低于 1 s。首先关闭雷达发射机,停止雷达的正常业务工作,根据雷达所在经纬度以及北京时间,使用高精度太阳位置算法计算出太阳理论位置,驱动雷达天线对准太阳,并且控制天线从太阳位置 $-3^\circ \sim +3^\circ$ 进行扫描 (方位、俯仰各扫描一次)^[15],扫描速度控制为 $0.5^\circ/\text{s}$,并同时从软件终端采集 IQ 数据,对 IQ 数据进行解析和处理后,绘制出太阳法天线方向图,最后计算方向图参数,见图3。

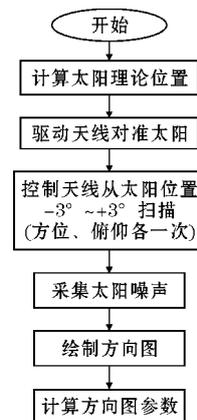


图3 方向图测量过程

2.2 方向图参数计算及修正方法

2.2.1 波束宽度计算

在完成噪声峰值功率 (P_N) 的计算后,确定对采集到的噪声峰值功率 P_N 以下 4 dB 为切断功率点 (P_c),再去掉 P_c 以下的数据 (图4)。随后对数据进行抛物线平滑拟合,平滑方法为首先比较邻近两个点采集的

太阳噪声功率,如果数据(太阳噪声功率)超出 ± 3 dB,则中心点值采用与中心点相邻的两点值的平均值代替,通过拟合抛物线($Ax^2+Bx+c=0$)平滑数据^[15],同时对拟合数据最大值减去3 dB的数据计算出波束宽度 θ_0 。

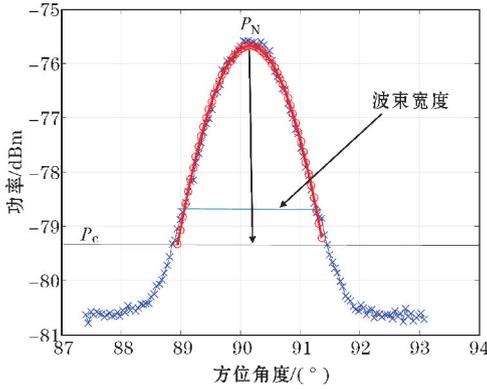


图4 方位波束宽度计算

2.2.2 波束宽度修正算法

将太阳作为测试信号源时,由于在地球观测到的太阳有一定的角径大小,因此不能将太阳看作一个点源,即太阳法测试得到的波束宽度并不是真实的天线波束宽度,需要依据太阳光学角径进行订正才能得到真实的天线波束宽度。

太阳法俯仰波束宽度:

$$\theta_A = \sqrt{\theta_0 - 0.1505 \cdot \theta_s^2} \quad (9)$$

式中 θ_A 为订正后的天线波束宽度, θ_0 为实验得到的太阳法俯仰波束宽度, $\theta_s = 0.53^\circ$ 为太阳光学角径。

目前业界提出一种依据太阳高度角订正太阳法方位波束宽度的算法^[3]:

$$\theta_A = \sqrt{\theta_0 - 0.1505 \cdot \theta_s^2} \cdot \cos\beta \quad (10)$$

但是在实际应用中发现,随着太阳高度角的增高,使用该算法得到的波束宽度值与真实天线波束宽度值误差逐渐变大。于是本文分析了方位波束宽度随太阳高度角变化的关系,提出一种方位波束宽度改进算法。

2.2.3 太阳法方位波束宽度改进算法

在一段连续的太阳法实验中发现,俯仰波束宽度一直保持稳定,而方位波束宽度随着太阳高度角的增大而不断增大,因此需要依据太阳高度角对方位波束宽度进行订正。

通过分析实验数据和雷达天线的扫描方式,发现太阳法方位波束宽度随着太阳高度角变化的原因:在太阳法实验中,是根据天线的方位角信息和对应方位角的太阳噪声功率值绘制出功率方向图。而随着太阳高度角的增大,天线实际扫描的角度范围比天线转台的扫描角度范围偏小,只有在天线仰角为 0° 时,天线

实际扫描的角度范围才和天线转台的扫描角度范围保持一致。于是太阳法方位波束宽度与仰角的空间几何关系如图5所示。

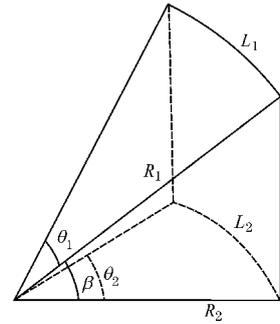


图5 太阳法天线扫描的空间几何关系

图5表示天线扫描的空间几何关系,其中 θ_1 为太阳法方位波束宽度真实值, θ_2 为太阳法方位波束宽度实验值(即从太阳法方向图中计算得到的波束宽度), R_1 为天线真实扫描半径, R_2 为 R_1 到水平面的投影, L_1 、 L_2 分别为两段弧长,且 $L_1=L_2$, β 为太阳高度角。

由半径、弧长和圆心角的关系可知:

$$\theta_1 = \frac{L_1}{2\pi R_1} \quad (11)$$

$$\theta_2 = \frac{L_2}{2\pi R_2} \quad (12)$$

R_1 与 R_2 的几何关系:

$$R_2 = R_1 \cdot \cos\beta \quad (13)$$

由式(11)、(12)可以得

$$\theta_1 \cdot R_1 = \theta_2 \cdot R_2 \quad (14)$$

由式(13)、(14)可得

$$\theta_1 = \theta_2 \cdot \cos\beta \quad (15)$$

即太阳法方位波束宽度真实值与实验值和太阳高度角满足式(15)。

于是进一步可得太阳法方位波束宽度修正算法:

$$\theta_A = \sqrt{\theta_0 \cdot \cos\beta - 0.1505 \cdot \theta_s^2} \quad (16)$$

3 实验结果

3.1 结果分析

2019年5月10日8-10时,太阳高度角为 $20^\circ \sim 50^\circ$,天气晴朗,对一部X波段天气雷达进行太阳法实验,得到不同仰角下的太阳法方位波束宽度值。该X波段天气雷达实验前已完成标定检测,且雷达各项参数均满足业务指标要求。该雷达天线相关参数如表1所示。

表 1 全固态 X 波段双偏振天气雷达天线参数

序号	天线参数	参数值
1	工作频率	9370 MHz
2	天线增益	≥41.92 dB
3	水平波束宽度	≤1.3°
4	垂直波束宽度	≤1.3°
5	天线直径	1.8 m

图 6 为太阳法方位波束宽度随太阳高度角的变化趋势,可以看出,随着太阳高度角的增大,方位波束宽度也随之增大。这里的太阳高度角是指雷达天线对准太阳时的天线仰角。

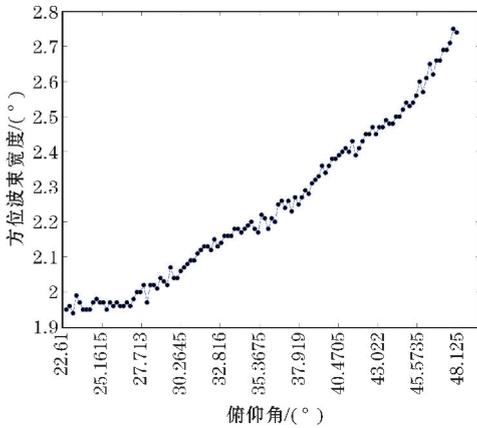


图 6 方位波束宽度随太阳高度角变化趋势

同时为验证本文算法的普遍应用性,对重庆一部业务 S 波段多普勒天气雷达进行太阳法实验。且该部雷达在业务运行前已经完成系统测试和标定工作,各项参数均满足业务指标要求,详细参数如表 2 所示。

表 2 CINRDA/SA 多普勒天气雷达基本技术参数

序号	指标项目	参数值
1	工作频率	2885 MHz
2	天线增益	≥44.5 dB
3	水平波束宽度	≤0.99°
4	垂直波束宽度	≤0.99°
5	第一旁瓣	≤-27 dB
6	交叉极化	≥29 dB
7	电压驻波比	≤1.20

图 7 为两种算法波束宽度修正的实验结果,图 8 为本文提出的方位与俯仰波束宽度的对比结果,从图中能够明显地看出,本文算法的计算结果更趋于稳定,且与俯仰波束宽度基本保持一致,接近波束宽度出厂值,而以往提出的算法随着太阳高度角的增大而逐渐偏离出厂值,测试误差相对较大。图 9 为 S 波段多普勒天气雷达在仰角为 38.23° 时的方位波束宽度 1.301°,经过本文算法修正后的波束宽度为 0.986°,满足业务技术指标要求的 ≤0.99°,图 10 为一段连续时

间的 S 波段雷达太阳法方位波束宽度修正结果,结果显示,在不同的仰角下,修正结果均满足指标要求,验证了该算法具有普遍应用性。

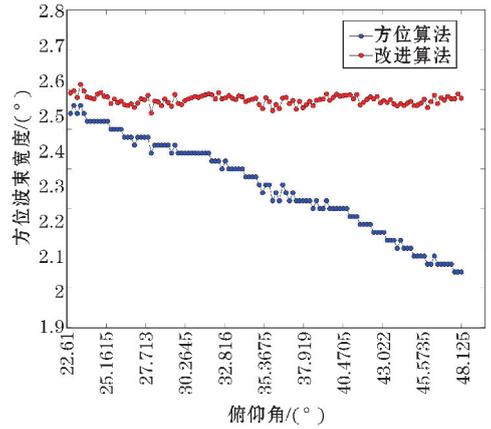


图 7 波束宽度修正结果

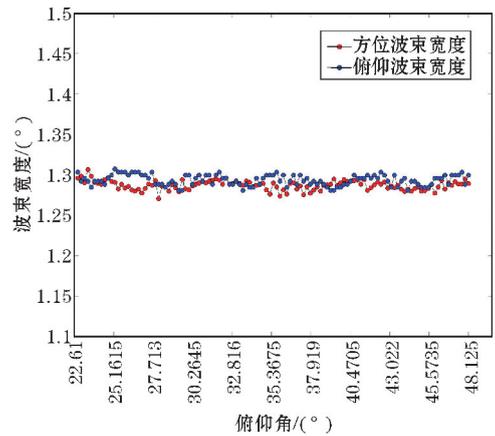


图 8 方位、俯仰波束宽度修正结果对比

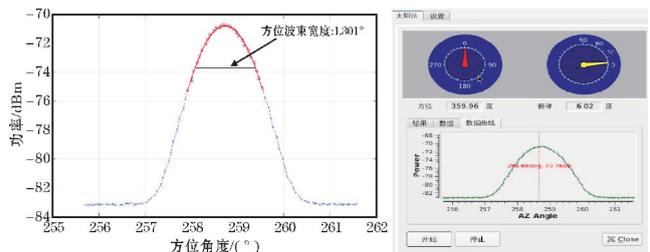


图 9 S 波段天气雷达太阳法数据分析

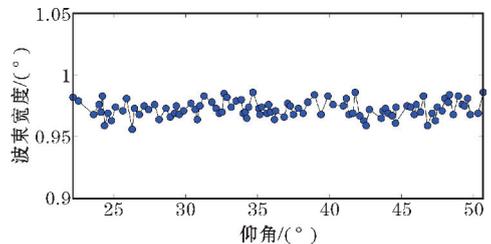


图 10 S 波段雷达太阳法方位波束宽度修正值

3.2 误差分析

从实验数据中,取不同仰角下的 10 组数据,依据

式(10)和式(16)的波束宽度修正算法,对方位波束宽度进行修正,实验结果分别如表3和表4所示。

表3 业界波束宽度修正算法的实验结果 单位:(°)

序号	仰角	方位波束宽度	波束宽度出厂值	误差
1	22.61	1.27	1.3	0.03
2	23.66	1.26	1.3	0.04
3	25.16	1.25	1.3	0.05
4	26.04	1.24	1.3	0.06
5	28.59	1.23	1.3	0.07
6	39.31	1.16	1.3	0.14
7	42.96	1.13	1.3	0.17
8	45.99	1.09	1.3	0.21
9	47.04	1.08	1.3	0.22
10	48.93	1.07	1.3	0.23

根据表3,方位波束宽度的均方根误差为0.08,实际测出的方位波束宽度在不同仰角下变化较大,且随着仰角的增大,波束宽度修正值逐渐变小,方位波束宽度修正值与波束宽度出厂值的误差范围为 $0.03^{\circ} \sim 0.23^{\circ}$ 。

表4 方位波束宽度修正算法改进后的实验结果 单位:(°)

序号	仰角	方位波束宽度	波束宽度出厂值	误差
1	22.61	1.28	1.3	0.02
2	23.66	1.28	1.3	0.02
3	25.16	1.29	1.3	0.01
4	26.04	1.29	1.3	0.01
5	28.59	1.29	1.3	0.01
6	39.31	1.29	1.3	0.01
7	42.96	1.28	1.3	0.02
8	45.99	1.29	1.3	0.01
9	47.04	1.29	1.3	0.01
10	48.93	1.28	1.3	0.02

改进波束宽度修正算法后,方位波束宽度与波束宽度出厂值误差范围为 $0.01^{\circ} \sim 0.02^{\circ}$,方位波束宽度的均方根误差为0.005,两种算法的实验误差对比见表5。

表5 波束宽度修正算法实验误差对比

算法	均方根误差	误差范围/(°)
业界算法	0.08	0.03~0.23
本文算法	0.005	0.01~0.02

测量方法本身的误差要求为待测参数指标误差要求的1/3,天线波束宽度误差指标为 0.1° ,即要求测试误差范围应为 $-0.033^{\circ} \sim 0.033^{\circ}$ 。从表5可知,本文提出的太阳法方位波束宽度修正算法实验结果相较于业界算法的实验结果更稳定,且测试精度较高。综合比较,本文算法更适用于太阳法方位波束宽度的修正。

4 结束语

使用太阳法对一部X波段天气雷达进行了多次实验,介绍了天线方向图测试和波束宽度计算方法。对太阳法方位波束宽度修正算法进行验证,并提出一种太阳法方位波束宽度改进算法。通过多次实验结果发现,改进太阳法方位波束宽度修正算法后,方位波束宽度修正值与天线波束宽度出厂值十分接近,测试精度明显优于业界提出的波束宽度修正算法。为进一步验证该算法的普遍性,增加了业务应用的S波段多普勒天气雷达的太阳法实验数据,实验结果表明该算法适用于业务雷达的标定技术。

参考文献:

- [1] 苏德斌,孟庆春,沈永海,等. 双线偏振天气雷达天线性能要求及其检测方法[J]. 高原气象, 2012,31(3):847-861.
- [2] 周红根,吴艳峰,曹德煜,等. 基于太阳噪声气象雷达接收系统标定检验[J]. 现代雷达,2015,37(9):18-21.
- [3] 周红根,高飞,蔡勤,等. CINRAD/SA 雷达标定技术研究[J]. 气象科技,2016(1):7-13.
- [4] 胡斌,刘晓磊,余世同. CIN/CD 雷达天线太阳法标校故障的分析及解决方法[J]. 气象水文海洋仪器,2011,28(4):115-116.
- [5] 张维全,李洋,姚欣. CINRAD/SC 天气雷达系统“太阳法标校”数据修正研究[J]. 气象与环境学报,2009,25(1):35-39.
- [6] 陆卫冬,魏旭辉. XDR 天气雷达控制系统调试与天线标定方法[J]. 农业开发与装备,2015(9):67-69.
- [7] 叶飞,肖萌,银莲,等. 利用太阳法自动标定L波段探空雷达天线指向[J]. 气象科技,2018(3):450-454.
- [8] Patel N K, Ice R L, Boydston O E. WSR-88D OR-DA Antenna Gain and Beamwidth Algorithms[C]. Algorithms, G. B. 2000:16.

- [9] Tapping K F. The 10.7 cm solar radio flux (F10.7) [J]. *Space Weather*, 2013, 11(7).
- [10] Holleman I, Huuskonen A, Kurri M, et al. Operational monitoring of weather radar receiving chain using the sun[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(1):159–166.
- [11] Altube P, Bech Joan Argemí, et al. Quality control of antenna alignment and receiver calibration using the sun: adaptation to midrange weather radar observations at low elevation angles[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2015, 32(5):494–496.
- [12] Reimann J, Hagen M. Antenna pattern measurements of weather radars using the sun and a point source [J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2016, 33(5).
- [13] Ice R J, Heck A K, Cunningham J G, et al. Polarimetric weather radar antenna calibration using solar scans[J]. In *Proceedings of the AMS Annual Meeting, Phoenix*, 2015(6).
- [14] 邵楠, 潘新民, 陈玉宝, 等. 利用太阳法提高新一代天气雷达探测精度[J]. *气象科技*, 2018, 46(6):1065–1072.
- [15] 徐鹏. 基于太阳噪声的雷达天线测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

A Modified Algorithm of Solar Method Azimuth Beamwidth based on Weather Radar

WANG Xin¹, ZHAO Siliang¹, QI Yang², LI Wenzhao¹

(1. Chongqing Meteorological Information and Technology Support Center, Chongqing 401147, China; 2. School of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China)

Abstract: The antenna performance parameter of weather radar, an extremely significant part of radar constant, directly influences the measurement accuracy of radar echo intensity. This paper discusses a method to test weather radar antenna by using the sun as a signal source, relevant principles or methods are described in detail, and an algorithm of solar optical angular diameter is proposed. The antenna of an X-band weather radar is tested by using the solar method, and the measurement errors of the azimuth beam width of the new and old algorithms are compared and analyzed. The measurement error and accuracy of the sun method by measuring an antenna of X-band weather radar are analyzed, the results show that the antenna beam width measurement becomes more stable and the measurement accuracy shows greatly improved by using the azimuth beam width correction algorithm in the solar method.

Keywords: solar method; beam width; weather radar