

用太阳估测天气雷达天线增益的方法探讨*

李 喆¹ 陈大任¹ 王崇文¹ 张 帅² 张晓飞²

(1. 中国气象局气象探测中心 北京 100081; 2. 安徽四创电子股份有限公司 合肥 230061)

摘要: 天线增益是雷达气象方程中的一个重要参数,直接影响天气雷达回波强度的测量精度。分析利用太阳作为信号源测量天气雷达天线增益的可行性,详细介绍了测量原理和方法。利用太阳法测量了一部C波段移动式新一代天气雷达的天线增益,并分析了测量误差和提高测量精度的方法。观测试验结果表明,利用太阳测量的天线增益与雷达出厂测试结果接近,精度还有待进一步提高;太阳可用来定期监测天气雷达业务网络中天线的增益变化,有助于及早发现并诊断天气雷达天线指向、馈线损耗、接收机部分存在的故障。

关键词: 天气雷达;天线增益;太阳能流密度;噪声功率

中图分类号: TN959.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Discussion on antenna gain measurement for weather radar using the sun

Li Zhe¹ Chen Daren¹ Wang Chongwen¹ Zhang Shuai² Zhang Xiaofei²

(1. Meteorological Observation Center of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

2. Anhui Sun Create Electronic Co., Ltd., Hefei 230061, China)

Abstract: Antenna gain is an important parameter in weather radar equation and has a direct influence on accuracy of reflectivity measurement. This paper analyzes the feasibility of antenna gain measurement for weather radar using the sun as a signal source, and introduces relevant principles and methods. Then it measures antenna gain of a C-band mobile China new generation radar (CINRAD) by the sun and analyzes error sources as well as methods to improve measurement accuracy. Observation experiment shows that antenna gain measured using the sun is close to factory test result while measurement accuracy requires further improvement. Therefore, the sun can be used to monitor variation of antenna gain in the operational weather radar network regularly, which is helpful for identifying and diagnosing breakdowns in antenna pointing, feeder line loss and receiver in weather radar system as early as possible.

Keywords: weather radar; antenna gain; solar flux; noise power

1 引言

我国新一代天气雷达网大规模建设并投入业务运行以来,在天气预报、灾害性天气预警等方面发挥了重要作用。新一代天气雷达的回波强度定标工作是非常重要的,通过定标,可保证雷达定量估测降水的精度,提高气象产品的数据质量,增强组网雷达回波的一致性和可比较性^[1-5]。天线增益是雷达气象方程中的一个重要参数,直接影响天气雷达回波强度的测量精度。然而,受测试条件限制,新一代天气雷达天线分系统的性能测试均由雷达生产厂家在分机出厂验收中进行,在雷达现场安装架设后尚无有效的方法对天线增益进行长期监测。

雷达天线增益是指在输入功率相等的条件下,天线与

理想辐射单元在空间同一点处所产生信号的功率密度之比,它定量描述了天线在某一特定方向上把输入功率集中辐射的程度,是天线设计的主要指标之一^[6]。射电天文学的研究和发展,为天线增益测量提供了一个有效的方法。由于太阳的射电频谱覆盖范围广,极化特性已知;且太阳能流密度较强,可满足大部分具有高灵敏度接收系统的天气雷达对信噪比的要求;同时,太阳位置有精确的计算方法,能够使得在任意时刻任意地点,雷达天线对准太阳,且绝对满足远场条件。因此,太阳可以作为理想的外部信号源,对天气雷达的天线增益进行测量。

目前,在美国和欧洲等国家的天气雷达业务网中,开展了在雷达离线状态下应用太阳监测天线和接收机稳定性的研究和业务观测试验^[7-9],如美国天气局WSR-88D业

收稿日期:2015-09

* 基金项目:国家自然科学基金(U1431104)资助项目

务雷达网每个月都会利用太阳估测一次天线增益,监测组网雷达天线性能的变化。在我国新一代天气雷达业务网中,太阳作为参考信号源,主要用于确定天线指向误差,对雷达空间方位、俯仰定位精度进行修正,使雷达天线的机械轴和电轴一致^[10],但尚未利用太阳来监测雷达天线的性能。

本文首先介绍了用太阳测量天气雷达天线增益的原理和步骤。在此基础上,以一部业务化 C 波段移动式新一代天气雷达(CINRAD/CCJ)为例,利用太阳法实测了天线增益,并与天线出厂时在微波暗室内测量的天线增益^[11]进行了比较,分析了测量误差,提出了改善测量精度的方法。

2 测量原理及方法

根据奈奎斯特(Nyquist)定理,外部噪声源在带宽为 B 的接收机输入端产生的噪声功率 P 可以表示为:

$$P = kTB \quad (1)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K), T 是外部噪声源的温度, B 是接收机的噪声带宽。接收机的噪声带宽 B 可以通过测量已知温度的冷源(假负载)和热源(固态噪声源)功率获得,即:

$$P_h - P_c = kB(T_h - T_c) \quad (2)$$

式中: P_h 和 P_c 分别表示热源和冷源的噪声功率测量值, T_h 和 T_c 分别表示热源和冷源的噪声温度。而太阳噪声功率 P_s 可以表示为:

$$P_s = kT_s B \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可计算得到太阳噪声温度为:

$$T_s = P_s \frac{T_h - T_c}{P_h - P_c} \quad (4)$$

雷达天线接收到的太阳能流密度 S ($W \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$) 为:

$$S = \frac{P_s}{A_e B} \quad (5)$$

式中: A_e 为天线有效面积。由式(3)和式(5),可得:

$$A_e = k \frac{T_s}{S} \quad (6)$$

由天线增益 G_a 的定义:

$$G_a = \frac{4\pi A_e}{\lambda^2} \quad (7)$$

λ 为雷达工作波长。将式(6)代入式(7),得:

$$G_a = \frac{4\pi k T_s}{S \lambda^2} \quad (8)$$

令 Q 作为与波长有关的常数,换算到分贝值为:

$$Q(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi k}{\lambda^2} \right) \quad (9)$$

则天线增益可表示为:

$$G_a(\text{dB}) = Q(\text{dB}) - S(\text{dBS}) + T_s(\text{dBK}) \quad (10)$$

需要注意的是,式(10)得到的天线增益是初始增益。要获得最终的天线增益,需要做一些订正工作,包括太阳辐

射功率的极化订正、馈线损耗、波束填充、功率测量误差、天线指向误差等因素。

太阳法测量天气雷达天线增益的原理框图如图 1 所示。选择接收系统(包括接收机和信号处理器)最前端的低噪声放大器(LNA)输入端口为噪声功率测量的参考平面。测量步骤如下。

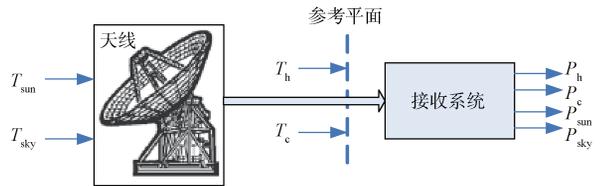


图 1 太阳法测量天线增益的原理

1) 断开天线和接收机的连接,将固态噪声源连接至参考平面处,对固态噪声源加电后,测量接收系统输出的热噪声功率值 P_h ;

2) 将固态噪声源断电,测量接收系统输出的冷态噪声功率值 P_c ;

3) 将天线指向太阳,一般选择太阳仰角较高的时刻,可有效避免干扰和地物杂波的影响,记录此时接收系统输出的太阳噪声功率值 P_{sun} ;

4) 将天线指向偏离太阳较远的冷空,为避免干扰和地物杂波的影响,可指向天顶(天线仰角为 90°),记录此时接收系统输出的天空背景噪声功率值 P_{sky} 。

根据式(2),由步骤 1) 和 2),可得接收机的噪声带宽 B 。步骤 3) 中,天线指向太阳时测量的噪声功率为太阳自身辐射功率与天空背景噪声功率之和。从 P_{sun} 中扣除 P_{sky} ,即可获得太阳自身辐射功率 P_s ,代入式(4),可得太阳噪声温度 T_s 。再代入式(8),即可计算天线增益。

3 试验结果

在 2015 年 3 月 25 日 14 时~15 时,在合肥大杨店雷达试验场,在晴空天气条件下,利用太阳法对一部业务化 C 波段移动式新一代天气雷达进行了天线增益测量。该雷达工作频点为 5 430 MHz,采用中心馈电的圆形旋转抛物面天线,天线直径为 3.2 m, E 面和 H 面波束宽度均为 1.28° ,天线出厂时在微波暗室内测量的天线增益(不包括馈线损耗)为 42.45 dB。

按照步骤 1)~4),将型号为 Agilent N7815C 的固态噪声源连接至参考平面处,在雷达终端显示器上读出多组噪声源加电和不加电时的噪声功率,分别取平均值,得到 $P_h = 21.04$ dB, $P_c = 8.25$ dB。然后,对天线指向太阳时(仰角约 45°)的噪声功率值 P_{sun} 和天线指向冷空时(仰角约 90°)的噪声功率值 P_{sky} 进行了多次测量,并取平均值,得到 $P_{sun} = 11.90$ dB, $P_{sky} = 6.50$ dB。如表 1 所示。

表 1 接收系统输出的噪声功率

测量参数	接收系统输出功率/dB
噪声源加电功率 P_h	21.04
噪声源不加电功率 P_c	8.25
太阳功率 P_{sun}	11.90
冷空功率 P_{sky}	6.50

需要注意的是,即使噪声源不加电时,仍然存在其自身热辐射产生的噪声功率,这也就解释了为何当噪声源不加电时,信号处理器输出功率会比天线指向冷空时,信号处理器输出功率高 1.75 dB 的原因。此外,表 1 中的接收系统输出噪声功率值都需要折算到图 1 所示的参考平面上,以确定 LNA 输入端口接收到的实际噪声功率值。为得到从参考平面注入功率 P_{in} (dBm) 到接收系统输出的噪声功率 P_{out} (dB) 的对应关系,采用型号为 Agilent E8257D 的外接信号源通过定向耦合器从图 1 中的参考平面注入,测量了接收系统的动态特性曲线,如图 2 所示。对应动态特性曲线低端 1 dB 拐点的信号源注入功率为 -105 dBm。

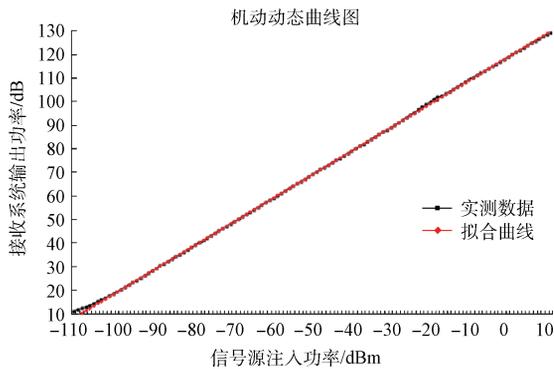


图 2 接收系统动态特性曲线

实测接收系统的动态范围为 116 dB,信号处理器输出功率值 P_{out} 与 LNA 输入功率值 P_{in} 的线性拟合函数关系为

$$P_{out} = P_{in} + 118.0 \quad (11)$$

由式(11),将信号处理器输出功率值减去 118.0,即可折算到参考平面处的噪声功率值,如表 2 所示。

表 2 参考平面处的噪声功率

测量参数	参考平面处的噪声功率/dBm
噪声源加电功率 P_h	-96.96
噪声源不加电功率 P_c	-109.75
太阳功率 P_{sun}	-106.10
冷空功率 P_{sky}	-111.50

根据澳大利亚气象局空间天气中心发布的全球太阳能流密度数据,插值计算后得到 5 430 MHz 频点处的太阳能流密度,试验期间太阳能流密度约为 $S=180.80$ SFU,其中 SFU 为太阳能流密度单位,大小为:

$1 \text{ SFU} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$,换算到分贝值为 $S(\text{dB}) = -197.43 \text{ dB}$,常数 $Q(\text{dB}) = 10\log_{10}\left(\frac{4\pi k}{\lambda^2}\right) = -192.46 \text{ dB}$ 。

固态噪声源在 5 430 MHz 上的超噪比 (ENR) 为 15.69 dB,可以计算得到固态噪声源加电时的噪声温度 $T_h = T_0(10^{\text{ENR}/10} + 1) = 1.10 \times 10^4 \text{ K}$, T_0 为标准室温 (290 K)。固态噪声源断电时,冷源温度为机房内实际室温,实测值为 24 °C,即:

$$T_c = 297 \text{ K}。$$

天线分别指向太阳和冷空时在参考平面处测量的噪声功率为:

$$P_{sun}(\text{mW}) = 10^{P_{sun}(\text{dBm})/10} = 2.45 \times 10^{-11} \text{ mW}$$

$$P_{sky}(\text{mW}) = 10^{P_{sky}(\text{dBm})/10} = 7.08 \times 10^{-12} \text{ mW}$$

则太阳自身辐射功率为:

$$P_s(\text{dBm}) = 10\log(P_{sun} - P_{sky}) = -107.58 \text{ dBm}$$

太阳自身噪声温度为:

$$T_s(\text{dBK}) = (T_h - T_c)(\text{dBK}) + P_s(\text{dBm}) - (P_h - P_c)(\text{dBm}) = 29.93 \text{ dBK}$$

则天线增益为:

$$G_a(\text{dB}) = Q(\text{dB}) - S(\text{dB}) + T_s(\text{dBK}) = 34.90 \text{ dB}$$

为了获得最终的天线增益,需要对初始增益做订正。首先是极化订正。由于太阳辐射的电磁波是全极化的,而 CCJ 雷达只能接收水平极化分量,因此功率损失一半,即 3 dB。其次是接收馈线损耗。利用矢量网络分析仪,实测从馈源到接收系统参考平面的馈线损耗为 2.75 dB。第三是波束订正。根据日地平均距离 $d=1.496 \times 10^8 \text{ km}$ 和太阳直径 $l=1.392 \times 10^6 \text{ km}$,可得地球上观测到的太阳角径为 $\alpha = \arcsin(l/d) = 0.53^\circ$ 。而天线波束宽度为 1.28° ,因此雷达测量的太阳功率是波束加权平均的结果,而不是射电天文台观测到的太阳功率最大值。当天线方向图近似为高斯型时,太阳角径 α 与天线波束宽度 θ 的订正公式为:

$$K(\text{dB}) = 20\log\left(1 + 0.18\left(\frac{\alpha}{\theta}\right)^2\right) = 0.264 \text{ dB}$$

订正后的天线增益为:

$$G_{arec}(\text{dB}) = G_a(\text{dB}) + 3 + 2.75 + 0.264 = 40.91 \text{ dB} \quad (12)$$

4 误差分析

由式(12)可见,使用太阳作为信号源,测量的天线增益与微波暗室中测量的天线增益存在一定误差,主要包括以下因素。

1) 5 430 MHz 处的太阳能流密度 S 是通过插值估算的。根据射电天文学资料统计结果,太阳能流密度的平均测量误差约为 5%,这将引起天线增益测量误差 0.21 dB。

2) 热态和冷态噪声功率测量值 P_h 和 P_c 均位于接收系统动态特性曲线的低端非线性区,功率测量误差约为

0.20 dB, 则 $P_h - P_c$ 测量误差约为 $\sqrt{0.2^2+0.2^2} = 0.28$ dB。

3) 太阳自身辐射功率 P_s 位于接收系统动态特性曲线的低端非线性区, 测量误差约为 0.20 dB。

4) 热源和冷源的噪声温度 $T_h - T_c$ 测量误差约为 $\sqrt{0.2^2+0.2^2} = 0.28$ dB。

5) 定向耦合器的耦合度误差约为 0.20 dB。

6) 天线波束指向测量误差约为 0.21 dB。

综合考虑以上误差, 则用太阳测量天气雷达天线增益的均方根误差约为

$\epsilon = \sqrt{0.21^2+0.28^2+0.20^2+0.28^2+0.20^2+0.21^2} = 0.57$ dB。

下一步工作中, 需要研究提高天线增益测量准确度的方法, 根据雷达在不同时间、不同方位和仰角下测量的多组数据, 比较测量结果的稳定性; 并通过对已知精确方向目标源的天线指向测量实验, 获得指向偏差实验样本, 建立指向偏差的数学模型, 在线预测指向偏差, 提高天线指向精度。需要注意的是, 利用太阳测量天线增益应该在太阳不活跃期间进行, 即没有太阳耀斑、爆发或者太阳黑子活动时, 以避免太阳能密度的波动, 增大测量结果的不确定性。在业务观测期间, 可以考虑利用太阳定期(如雷达停机维护期间)监测天气雷达天线的增益变化, 有助于及早发现并诊断雷达天线指向、馈线损耗、接收机部分存在的故障。

5 结 论

本文研究了利用太阳作为信号源测量新一代天气雷达系统天线增益的方法, 详细介绍了测量原理和步骤。利用太阳法对一部 C 波段移动式新一代天气雷达进行了天线增益测量, 并分析了测量误差, 提出了改善测量精度的方法。太阳法测量的天线增益与微波暗室测试结果相近, 但精度还有待进一步提高; 该方法简单易行, 可用来定期监测天气雷达天线的增益变化, 有助于及早发现并诊断雷达天线指向、接收馈线损耗和接收机等部分存在的故障。

参考文献

[1] 李柏, 古庆同, 李瑞义, 等. 新一代天气雷达灾害性天气监测能力分析及未来发展[J]. 气象, 2013,

39(3):265-280.

- [2] 潘新民, 柴秀梅, 黄跃青, 等. CINRAD/SA&SB 回波强度定标故障的诊断分析和解决方法[J]. 气象, 2010, 36(12):122-127.
- [3] 梁华, 陈旭辉. CINRAD/CC 雷达信号频谱特性分析应用研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(z1):19-24.
- [4] 许致火, 何建新, 史朝, 等. 我国地基天气雷达技术系统发展介绍[J]. 气象科技, 2012, 40(3):326-328.
- [5] 陈钟荣, 李祥超, 顾松山. 双基多普勒天气雷达信号采集方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(z1):125-126.
- [6] 刘辉. 某型雷达天线方向图在线测量方法与分析[J]. 电子测量技术, 2013, 36(6):105-108.
- [7] 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.
- [8] ALTUBE P, BECH J, ARGEMÍ O, 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 and Oceanic Technology, 2015, 32(5):927-942.
- [9] HOLLEMAN I, HUUSKONEN A, GILL R, et al. Operational monitoring of radar differential reflectivity using the sun[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(5):881-887.
- [10] 郭泽勇, 曾广宇, 潘新民, 等. 新一代天气雷达空间定位误差的分析与改善[J]. 热带气象学报, 2014, 30(5):990-995.
- [11] 俞建, 赵杰. 远场暗室条件下圆极化天线增益不同测试方法分析研究[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9):34-36.

作者简介

李喆, 硕士, 工程师, 主要研究方向为气象雷达技术。
E-mail:lizhe0906@163.com