应用于气象雷达的快速太阳法标定软件设计

王 婷[1], 吴 宁[1], 洪佳洁[1], 吴 雷[2]

(1. 南京航空航天大学 信息科学与技术学院, 江苏 南京 210016;
2. 安徽四创电子股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

[摘要] 针对气象雷达天线电轴的标定问题, 在研究以太阳为参照物标定雷达天线指向方法的基础上, 以 Linux平台设计实现了太阳法标定软件. 软件设计主要从两方面缩短标定时间: 利用雷达天线的高精度定位特性, 通过预设天线的扫描区域以缩小扫描范围, 从而缩短雷达搜索太阳位置耗费的时间; 通过 socket网络编程接口开发实现软件与雷达前端系统的数据传输, 利用多线程机制以及 UDP通信协议提高数据收发的实时性. 运行结果表明该软件能够快速准确的完成对气象雷达天线的标定, 并且在搜索太阳信号的过程中不需要人工干预, 实现全自动搜索.

[关键词] 气象雷达, 太阳法标定, Linux平台
[中图分类号] TP311.1 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2009) 04-0016-05

Design of a Software of Fast Solar Calibration Used for Weather Radar

Wang Ting[1], Wu Ning[1], Hong Jiajie[1], Wu Lei[2]

(1. College of Information Technology Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Anhui Sun Create Electronics Co., Ltd, Hefei 230088, China)

Abstract: The software designed in this paper is used to calibrate the pointing accuracy of the weather radar antenna, and is applicable to the radar with high precision in antenna positioning. This method takes the sun as the reference object. The time of calibrating is shortened in two ways. The scanning scope of the weather radar is narrowed by setting the location of the radar antenna with theoretical position of the sun previously to shorten the searching time. The real-time data transmission between radar front-end system and the software is accomplished by using UDP multicast mode and multithreading mechanism. The software is developed in Eclipse IDE with Qt based on the Linux OS. The test results showed that the software meets the expected requirements. It can search the sun noise signal automatically.

Key words: weather radar; solar calibration; linux OS

气象雷达对气象目标精确定位的能力优于其它探测手段, 而气象雷达天线电轴的实际空间指向与其对应的方向显示数据之间严格保持一致, 是确保气象雷达系统对气象目标精确定位的必要条件之一[1].

对气象雷达天线电轴进行标定的诸多方法中, 操作方便且精度较高的方法为太阳法标定[2-3]. 应用太阳法标定雷达时, 雷达发射机不工作, 以被动方式接收太阳辐射能量, 对天线的方位角、仰角进行标定[3]. 文献[3-6]均采用太阳法标定雷达天线指向. 文献[3, 4]中采用的方法需要通过大范围方位扫描确定太阳的大概方位, 然后逐渐逼近太阳噪声信号功率极大值出现的位置. 文献[5, 6]通过固定的雷达天线指向对太阳噪声信号功率进行采样, 然后分析采样数据确定太阳的实际位置. 上述方法对于具有高精度天线定位系统的雷达而言, 完成一次标定需要耗费大量的时间.

本文采用了一种旨在缩短标定时间的方法. 该方法首先通过数学模式计算太阳理论位置, 然后利用雷达天线的高精度定位特性, 用计算结果设置雷达天线使其在此位置附近扫描, 减小搜索范围, 从而缩短搜索太阳实际位置耗费的时间. 软件与嵌入式雷达主机的数据交互通过 socket网络编程实现, 利用 UDP通信协议以及多线程机制提高数据收发的实时性. 软件基于 Linux平台开发, 采用雷达系统软、硬件互相配合的方式设计实现, 具有操作简单、结果显示迅速等优点, 提高了时效.

收稿日期: 2009-06-08
通讯联系人: 吴 宁, 教授, 博士生导师, 研究方向: 电子系统集成与专用集成电路设计. E-mail: wunee@nuaa.edu.cn

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　基本原理

太阳法常用的实现方法有两种: 一种方法[3,4]是通过雷达逐步扫描搜索太阳噪声信号, 确定太阳噪声信号极大值出现的方位角、仰角以及时刻 T 作为太阳实际位置的读数; 然后通过数学模式计算 T 时刻太阳理论位置的方位角和仰角, 求出太阳位置理论值与实际值的差值, 得到标定数据 (方法 1). 这种方法适用于天线波束较宽的雷达. 另一种方法[5,6]将雷达天线停在太阳将经过的轨迹上, 记录噪声信号功率值随时间的变化, 分析数据确定噪声信号功率峰值出现的时刻. 然后通过数学模式计算噪声信号功率峰值出现时刻对应的太阳理论位置, 求出太阳理论位置与天线指向的误差, 得到标定数据 (方法 2). 这种方法适用于天线定位特性较差的雷达. 若采用上述两种方法标定具有高精度天线定位特性的雷达, 将会耗费大量的时间.

本文采用一种快速并且容易实现的太阳法标定方法[6] (方法 3). 首先根据地球与太阳的天体运动规律和公历算得太阳赤纬 θ_{CW} 和时差 θ_{SC}[7], 结合雷达天线所在的经纬度 θ_{WD}、θ_{JD} 以及时间信息, 计算出此时太阳在地球表面的理论位置, 即与地理北极的夹角 θ_{AZ} (方位角) 和与地平面的夹角 θ_E (仰角). 计算 θ_E 的公式[3] 为:

$$\theta_E = \sin^{-1}(\sin\theta_{WD} * \sin\theta_{CW} + \cos\theta_{WD} * \cos\theta_{CW} * \cos\theta_{SC}). \tag{1}$$

计算 θ_{AZ} 的公式[3] 为:

$$\theta_M = \tan^{-1}(\tan\theta_{CW} / \cos\theta_{SC}), \tag{2}$$

$$\theta_{AZ} = \tan^{-1}(\tan\theta_{SC} * \cos\theta_M / \sin(\theta_M - \theta_{WD})), \tag{3}$$

θ_M 是为了计算方便引进的参数.

利用计算结果 θ_{AZ}、θ_E 指引雷达天线在此位置附近搜索太阳噪声信号, 一旦发现立即记录当前时间以及雷达天线的方位角 θ_{MAZ}、仰角 θ_{ME}. 一次标定完成后, 计算天线的指向 (实际位置) 与太阳理论位置的误差 E_{AZ}、E_E, 计算公式为:

$$E_{AZ} = \theta_{MAZ} - \theta_{AZ}, \tag{4}$$

$$E_E = \theta_{ME} - \theta_E. \tag{5}$$

若 $E_{AZ} > 0$, 则说明当前天线指向的方位角偏大, 用 E_{AZ} 设置雷达天线的方位角, 然后在伺服系统中将其置 0(即正北); 若 $E_{AZ} < 0$, 则说明当前天线指向的方位角偏小, 用 $(360 - E_{AZ})$ 设置雷达天线的方位角, 然后在伺服系统中将其置 0(即正北). 若 $E_E > 0$则说明当前天线指向的仰角偏大, 用 E_E 设置雷达天线的仰角, 然后在伺服系统中将其置 0, 若 $E_E < 0$则说明当前天线指向的仰角偏小, 用 $(-E_E)$ 设置雷达天线的仰角, 然后在伺服系统中将其置 0

2　软件设计

本软件以 Linux平台使用 Eclipse结合 Qt类库设计. Linux系统是开源的、网络化的操作系统, 有较高的稳定性和安全性. Qt是一个用于跨平台图形界面程序开发的 C++工具包[9], 为应用程序开发者提供建立图形用户界面所需的所有功能. Eclipse集成开发环境是基于 java的可扩展开发平台, 可视化界面友好, 而且 Qt能够以插件的形式与之无缝集成.

太阳法标定软件总体分为参数设置、界面显示、网络通信 3部分. 太阳法标定软件的流程图如图 1所示.

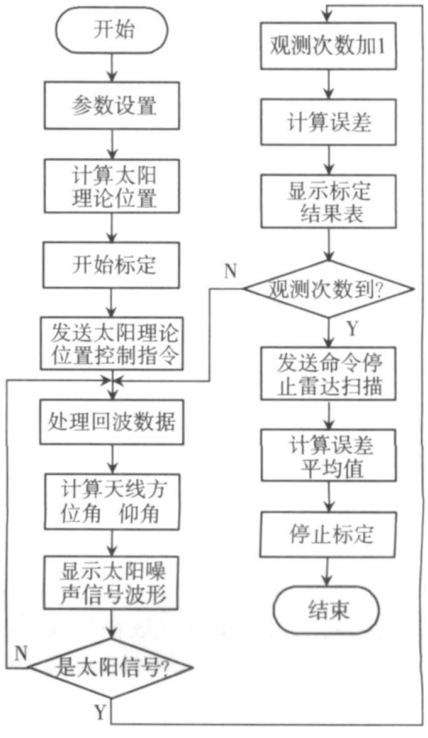

图 1　太阳法标定软件流程图

Fig.1　Solar calibration software flow diagram

软件启动之后, 首先进行参数设置, 利用设置的参数及公式 (1)、(3)计算太阳理论位置, 将计算结果组包发送到嵌入式雷达主机, 指引雷达在此区域扫描. 在雷达扫描的过程中不断对太阳噪声信号进行采样, 将采样数据组包发给太阳法标定软件. 太阳法标

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

定软件对接收到的回波数据进行处理,模拟显示太阳噪声信号波形,计算雷达天线的方位角及仰角,并在标定结果表显示太阳实际位置、太阳理论位置以及误差.扫描结束后,计算误差平均值,得到标定数据.

2.1 参数设置

参数设置主要设置雷达天线的经纬度、方位扫描和仰角扫描的幅度、太阳噪声信号的功率范围等参数.雷达天线的经纬度用于公式(1)、(3)计算太阳理论位置.设置仰角和方位角的扫描幅度,以太阳理论位置为中心扩大雷达的扫描区域[9],能有效降低太阳理论位置计算公式产生的误差对标定结果的影响.预先设置太阳噪声信号的功率范围,用于与采样数据进行比较,判断雷达天线的指向是否与太阳位置一致.

此外,软件设计了参数保存功能,可将设置的参数值保存在文件中,软件启动时将自动读取文件.

2.2 界面显示

软件界面显示太阳噪声信号波形以及标定结果表.标定结果表在标定过程中显示标定结果,包括太阳理论位置、实际位置的理论值以及误差.太阳噪声信号波形直接显示扫描结果.

太阳噪声信号波形由绘图函数产生,在软件接收到雷达回波数据时调用.太阳法标定软件不断接收回波数据,绘图函数将被频繁调用,因此必须提高绘图速度,并且避免屏幕闪烁.软件设计通过 update()请求 paintEvent调用绘图函数. paintEvent是 Qt的事件处理器,用于重绘窗口部件,通过 repaint()或 update()请求实现. update()可以把多个绘制事件合并为一个,而 repaint()不允许这样的优化.因此,为了加快绘制速度,通过 update()请求 paintEvent重绘太阳噪声信号波形.

绘图函数通过 QPainter类结合画笔绘制太阳噪声信号波形.在每次绘制噪声信号波形之前,采用画刷清理绘图区域. Qt提供的 QPainter类绘制基本的图形(点、线、矩形、多边形等)以及复杂的图形,画笔(QPen)绘制线和轮廓,画刷(QBrush)进行填充.

2.3 网络通信

在雷达开始扫描之前,太阳法标定软件必须把公式(1)、(3)计算出的太阳理论位置发送给嵌入式雷达主机,指引雷达在以此位置为中心的区域扫描.在雷达扫描的过程中不断对太阳噪声信号进行采样,由于太阳是连续辐射源,雷达回波数据将连续地发往太阳法标定软件.网络通信模块实现太阳法标定软件与雷达的数据交互.

2.3.1 通信模块软件结构

为了降低网络通信延时,提高系统收发数据的实时性,软件设计定义了 4个线程.各线程之间的关系如图 2所示.

控制指令发送线程发送控制指令设置雷达天线的指向以及控制天线转动方向;回波数据采集线程接收雷达发送的太阳噪声信号采样数据;回馈数据采集线程接收雷达返回的命令;交互信息接收线程接收雷达返回的控制权信息. 4个线程独立工作,并有各自独立的缓冲区.程序启动时,太阳法标定软件在系统主线程中开启各个网络线程,等待接收或者发送数据.接收数据时,相应的网络线程会将数据存放到与其对应的本地缓冲区,等待后续处理.发送数据时,软件在规定时间内将数据从缓冲区取走,通过网络传送到嵌入式雷达主机.

发送线程发送数据通过调用 sendto()函数将应用缓冲区的数据发送到指定的接收进程的地址. sendto()函数将数据从应用缓冲区复制到系统缓冲区,然后立即返回. UDP只有一个发送缓冲区大小,该缓冲区长度是 UDP数据报的最大长度.如果应用程序发送的数据长度超过这个最大长度,函数 sendto()将返回 WSAEMSGSIZE错误;若发送的数据长度小于最大长度, sendto()函数将会成功返回.

接收线程通过调用 recvfrom()函数接收数据到太阳法标定软件.在雷达主机系统不发送数据时,接收缓冲队列中没有数据报, recvfrom()函数阻塞不返回,系统挂起对应的线程.当雷达主机发送数据时, UDP层接收数据报并将其存放在接收缓冲队列的尾部.如果接收新数据报时,接收缓冲队列已满,则这个 UDP数据报将被丢弃.

2.3.2 通信协议

网络通信模块采用 UDP协议.与 TCP协议相比, UDP协议面向无连接的服务,在通信过程中没有建立连接的时间开销,具有较小的传输延时.同时, UDP协议还支持组播和广播模式.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

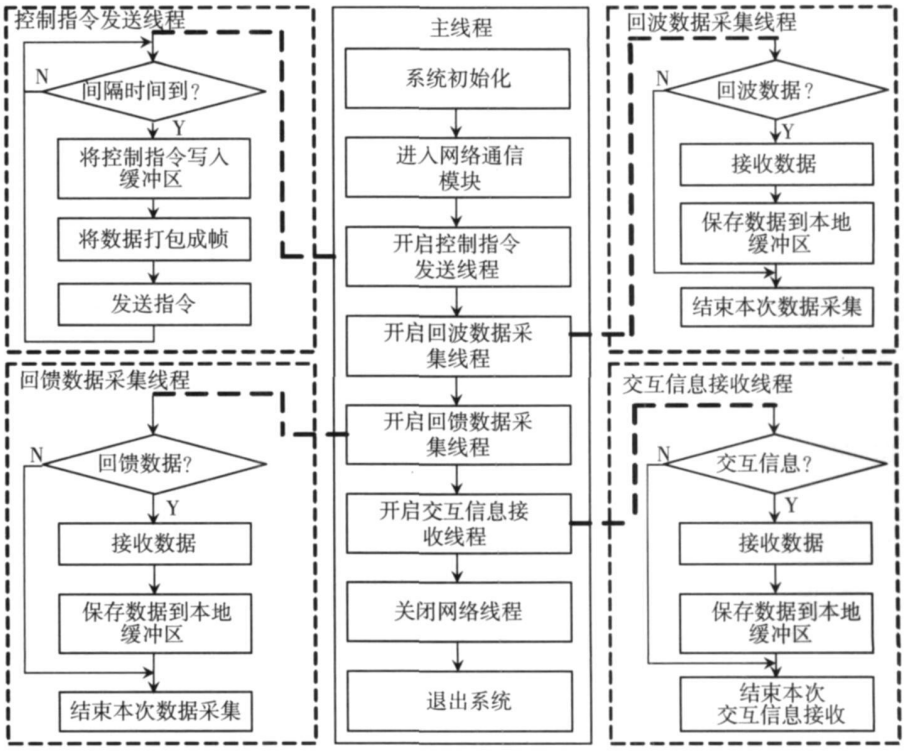

图 2　网络通信模块各线程关系图

Fig.2　Network communication module threads diagram

软件设计将 UDP数据报文分为报头和数据两部分. 报头包含解析数据报的必要信息, 包括同步标志、生存时间、总帧数和当前帧号, 长度固定为 5个字节. 数据段长度根据数据类型而定. 若需传送的数据超过了最大长度, 则将该数据丢弃.

软件定义了数据头结构作为控制头信息, 用于区分不同的数据类型. 软件向嵌入式雷达主机发送的数据必须加上控制头信息, 然后组包通过网络发送. 太阳法标定软件根据控制头信息判断接收到的数据类型, 以便进行相应的数据处理. 所有数据在发送之前都必须组包, 加上报头才允许发送.

软件设计定义了 5个单向通信端口, 提高并行传输数据的能力. 端口 5050接收回波数据、端口 5051接收回馈数据、端口 5053接收交互信息、端口 5052发送控制指令、端口 5054发送交互信息. 当太阳法标定软件处于运行状态时, 启动网络通信程序, 嵌入式雷达主机创建 socket, 并将该 socket与指定端口绑定 (若发送控制指令, 与端口 5052绑定; 若发送交互信息, 与端口 5054绑定), 然后太阳法标定软件开启控制指令发送线程等待发送控制指令. 与此同时太阳法标定软件创建 socket, 并将 socket与指定端口绑定 (若接收回波数据, 与端口 5050绑定; 若接收回馈数据, 与端口 5051绑定; 若接收交互信息, 与端口 5053绑定), 开启接收线程, 等待接收嵌入式雷达主机发送的数据.

3　运行结果分析

通过多次在晴朗天气记录的运行结果. 图 3显示了方位角和仰角误差. 图 4显示了采用不同的方法完成标定花费的时间. 比较通过 3种方法获得的测量数据可知: 方法 3的仰角误差接近于方法 2的仰角误差, 但是方位角误差小于方法 2的方位角误差. 与方法 1和方法 2完成标定的耗时相比, 方法 3完成一次标定的耗时比较短.

4　总结

本文设计的太阳法标定软件, 采用数学模式计算的太阳理论位置设置雷达天线的扫描区域, 缩小扫描范围, 有效地缩短了雷达搜索太阳位置耗费的时间; 通过 socket网络编程接口开发实现软件与雷达前端系统的数据传输, 利用多线程机制以及 UDP组播模式提高数据收发的实时性. 通过在 CINRAD/CC雷达中

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

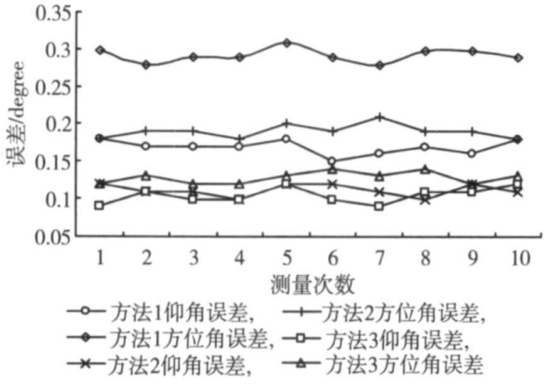

图 3　方位角、仰角误差曲线图

Fig.3　Azimuth error and elevation error graph

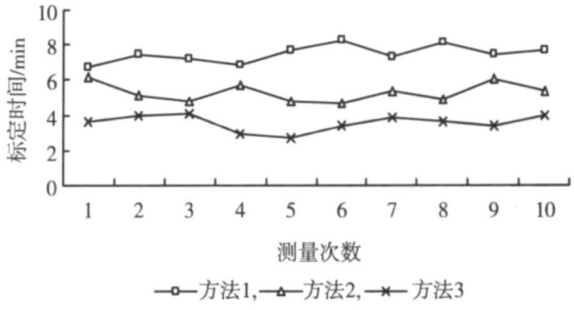

图 4　标定时间曲线图

Fig.4　Time of calibrating graph

的应用表明,设计的软件能够快速完成标定.本文设计的软件不适用于夜晚对雷达天线进行标定,以北极星为参照物标定雷达天线的方法是今后的研究方向.

[参考文献](References)

[1] 张培昌,杜秉玉,戴铁丕. 雷达气象学[M]. 2版. 北京:气象出版社, 2002: 122-140.
Zhang Peichang, Du Binyu, Dai Tiepei. Radar Meteorology[M]. 2nd Edition. Beijing: China Meteorological Press, 2002: 122-140. (in Chinese)

[2] 中央气象局气象科学研究院雷达气象组. 713天气雷达观测使用技术[M]. 北京:气象出版社, 1981: 8-10.
Meteorological Organization in Academy of Meteorological Science of China Meteorological Administration. Observation Techniques of 713 Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1981: 8-10. (in Chinese)

[3] 葛润生,张淑君,蔡作金. 应用太阳辐射测量 713雷达的天线参数[C]//大气探测文集, 北京: 1983: 185-187.
Ge Runsheng, Zhang Shujun, Cai Zuojin. Measurement of 713 radar antenna parameters with solar radiation[C]//Collection of atmosphere exploration, Beijing: 1983: 185-187. (in Chinese)

[4] 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(2): 35-40.
Zhang Weiquan, Li Yang, Yao Xin. Data correction of solar calibration method for CINRAD/SC weather radar system[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2009(2): 35-40. (in Chinese)

[5] Puhakka, Pekka V S. Solar calibration with dual polarization weather radar[C]//11th Conference on Mesoscale Processes and the 32nd Conference on Radar Meteorology, United States, 2005, 10: 24-29.

[6] Leskinen M, Puhakka P V S, Puhakka T M. A method for estimating antenna beam parameters using the sun[C]//In Proceedings of ERAD, 2002: 318-323.

[7] 于贺军. 气象用太阳赤纬和时差计算方法研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2006(9): 49-53.
Yu Hejun. Study on the formula of the solar declination and time difference in meteorology[J]. Meteorological Hydrological and Marine Instruments, 2006(9): 49-53. (in Chinese)

[8] 钱波,龚璞,王德生. 基于 Linux的软件化和网络化雷达终端系统的实现[J]. 电子技术应用, 2005(7): 61-63.
Qian Bo, Gong Pu, Wang Desheng. The software and network design of radar terminal system on Linux OS[J]. Application of electronic technique, 2005(7): 61-63. (in Chinese)

[9] 蔡志明,卢传富,李立夏. 精通 Qt4编程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 283-296.
Cai Zhiming, Lu Chuanfu, Li Lixia. Proficient in Qt4 Programming[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008: 283-296. (in Chinese)

[责任编辑:刘　健]

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net