

# 基于 STM32 的射电望远镜跟踪系统设计

陈健康, 王新君

(河海大学 计算机与信息学院, 南京 211100)

**摘要:** 为了满足天文爱好者的对射电天文学的探索, 对于大型的射电望远镜天线, 其指向精度要求高, 观测的过程中需要做各种实时修正, 造价昂贵, 并不适合用于科普, 因此设计了一种基于 STM32 微处理器的双轴射电望远镜控制系统; 系统通过两台直流电机控制抛物面天线对太阳的运动轨迹进行跟踪并实时采集射电望远镜接收机电压, 并将采集的数据利用 TCP 传输方式快速送至 PC 机用户监控软件进行显示和存储; 该系统实现了时间分辨率为 1ms 的太阳射电数据采集与存储, 提高了系统捕获持续时间很短的太阳爆发能力, 为科普爱好者研究、分析太阳活动提供了数据支撑。

**关键词:** 射电望远镜; 天线跟踪; 数据采集; STM32

## Radio Telescope Tracking System Design Based on STM32

Chen Jiankang, Wang Xinjun

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In order to satisfy the astronomer's exploration of radio astronomy, for a large radio telescope antenna, the pointing accuracy high, needs to be done in the process of all kinds of real-time correction of observation, expensive, is not suitable for popular science, so we design a biaxial radio telescope control system based on STM32 microprocessor. Paraboloid antenna system through two DC motors control for trajectory tracking of the sun and real-time acquisition radio telescope receiver voltage, and data collected by using TCP transport quickly sent to the PC user monitoring software for display and storage. This system has realized the time resolution of 1 ms solar radio data acquisition and storage, improve the system ability to capture the short duration of the outbreak of the sun, for the study of the popular science enthusiasts, analysis provides data to support the solar activity.

**Keywords:** radio telescope; antenna tracking; data collection; STM32

## 0 引言

太阳射电天文学自从 19 世纪 30 年代问世以来, 随着观测技术方法和观测仪器的不断完善和更新, 在 80 多年得到了快速的发展。尤其是射电望远镜频谱仪的发明, 为太阳射电辐射特性的研究做出了重要的贡献, 推动了太阳射电的研究与探索。太阳射电望远镜频谱仪是用来观测太阳的射电辐射的一种仪器, 它主要是通过控制天线对准太阳, 之后天线接收太阳射电辐射, 并经过滤波、放大、衰减等一系列的前端信号处理得到的太阳的频谱<sup>[1-2]</sup>。本文研究的目的是控制射电望远镜天线准确跟踪太阳, 并将天线接收到的射电数据进行处理和保存下来, 为人们研究、预报太阳活动提供数据依据。

## 1 太阳射电观测系统分析

### 1.1 太阳辐射的测量

由于射电望远镜测量的功率很小, 在多种辐射的参量中, 本文在实验中选用天线温度来表征太阳辐射的强度。天线温度用  $T$  来表示, 对于全功率型接收机,  $T$  和接收机

的输出电压  $V$  的关系用下式表示:

$$V = GkBT + V_0$$

式中,  $G$  是接收机的增益, 随着内部压控衰减器的衰减系数  $L$  的变化而变化,  $k$  是波尔兹曼常数,  $B$  是带宽,  $V_0$  是接收机的零点电压, 该值理论为 0 V。

### 1.2 跟踪系统数学模型

如图 1 所示, 以球心  $O$  为原点, 建立三维坐标系一,  $X$  轴为赤经方向,  $Z$  轴为球心  $O$  与北极点的连线,  $Y$  轴垂直于  $XOZ$  平面; 接下来以  $Y$  轴作为旋转轴, 将整个坐标系旋转  $90^\circ - \varphi$  度建立坐标系二, 其中  $\varphi$  为观测地的纬度。

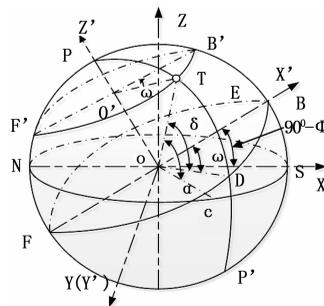


图 1 地平坐标系

记太阳俯仰角为  $\alpha$ , 方位角为  $\gamma$ , 时角为  $\omega$ , 赤纬角为  $\delta$ <sup>[3]</sup>。由于坐标系二是由坐标系一旋转得到, 不难计算出对应的旋转矩阵为:

收稿日期: 2018-12-04; 修回日期: 2019-02-26。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2018B677X14); 江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX18\_0547)。

作者简介: 陈健康(1995-), 男, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事自动控制方向的研究。

$$A = \begin{bmatrix} \cos(90^\circ - \varphi) & 0 & \sin(90^\circ - \varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(90^\circ - \varphi) & 0 & \cos(90^\circ - \varphi) \end{bmatrix} \quad (1)$$

太阳在地平坐标系中的的坐标  $(x, y, z)$  与太阳在坐标系二中的坐标  $(x', y', z')$  的关系为:

$$(x, y, z) = (x', y', z') \cdot A \quad (2)$$

设天球的半径为  $R$ , 则太阳在坐标系二中的坐标与天球半径所对应的关系如下:

$$x' = R \cos \delta \cos \omega, y' = R \cos \delta \sin \omega \\ z' = R \sin(90^\circ - \delta)$$

由式子 (1) 和 (2) 可得太阳  $T$  在地平坐标系中的:

$$\begin{cases} x = R(\cos \delta \cos \omega \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi) \\ y = R \cos \delta \sin \omega \\ z = R \sin \varphi \sin \delta + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega \end{cases} \quad (3)$$

由图 1 可求得太阳的俯仰角  $\alpha$  的正弦值, 方位角  $\gamma$  的余弦值:

$$\begin{cases} \sin \alpha = z/R = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \\ \cos(\gamma - 180^\circ) = \sin \gamma (\sin \alpha \sin \varphi - \sin \delta) / \\ (\cos \gamma \cos \varphi) \end{cases} \quad (4)$$

地球自转一周为一天, 即为 24 小时, 不同时刻有不同的时角。地球自转一周为  $360^\circ$ , 因此每小时的时角为  $15^\circ$ , 太阳时角  $\omega$  在正午时为 0, 每隔一小时变化为  $15^\circ$ , 计算公式为:

$$\omega = (T - 12) \times 15^\circ \quad (5)$$

其中:  $T$  为真太阳时, 可通过北京时间并查询天文年历得到。

$\delta$  可由库伯方程得到:

$$\delta = 23.45 \sin(360 \times \frac{284 + n}{365}) \quad (6)$$

其中:  $n$  代表当日在一年当中的第几天, 每往后加一天, 如元旦时  $n=1$ , 平年的最后一天  $n=365$ , 闰年  $n=366$ 。

这样, 式 (4) 计算太阳方位角和俯仰角, 赤纬角和时角可以通过式 (5) 和 (6) 计算得到, 纬度可以通过 GPS 准确获得。

### 1.3 跟踪方法选取

程序跟踪主要是依据观测地的经纬度和时间等信息推导出太阳的位置公式, 其次实现太阳的位置公式的编程, 然后使用程序实时的计算出太阳每一时刻的位置, 最后根据计算出的结果和跟踪装置所在的位置的差值来驱动跟踪装置向目标移动。对于程序跟踪还可以分为单轴跟踪和双轴跟踪, 相对于单轴跟踪来说双轴跟踪具有较高的跟踪精度。所以选用的是双轴跟踪, 程序跟踪的控制系统是采用开环的控制方式。程序跟踪的主要特点是控制系统结构简单容易实现; 太阳的地理位置的变化主要受到观测地的经纬度和时间信息等的影响, 所以能够在大多数的气候下稳定的跟踪太阳; 只是算法稍微复杂点, 需要进行实时的计算太阳的位置信息, 这就需要控制系统需要很高的数据处理能力与较大的数据存储空间, 但是对于现今的微处理芯片来说这些问题就显得简单了。

## 2 系统硬件设计

结合对系统设计的实际需求, 决定选用美国 ST 公司的 STM32F103ZET6 芯片作为控制系统和采数系统的微处理器。其中控制模块主要由控制微处理器、电机、天线、GPS 模块、按键控制电路和一些基础电路组成, 采集模块主要由采集微处理器、天线接收机等组成, 而上位机主要用于数据处理和存储。天线的转台采用双轴式跟踪装置, 我们将其分为方位控制电机和俯仰控制电机两部分, 电机可以正反两方向自由度转动<sup>[4-5]</sup>。方案设计如下图 2 所示。

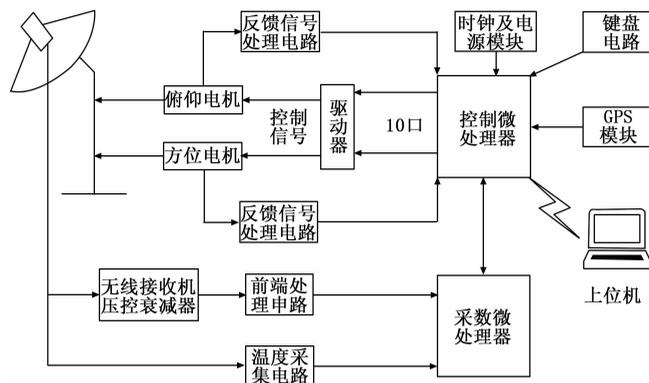


图 2 系统硬件框图

### 2.1 驱动电机的设计

电机的作用是对控制处理器发出的控制信号进行判断并做出对应的动作<sup>[4]</sup> (正转、反转或者停止)。本文通过调研与研究最后选择一种改进型的直流电机, 即在电机的轮齿处安装关开式霍尔传感器来产生反馈信号, 实现与控制单片机通信<sup>[6-7]</sup>。

### 2.2 GPS 模块

本文中采用高稳定度高灵敏度 MT-285 授时 GPS 定位模块来获得太阳位置矢量计算中所要用到的时间和地理位置等信息。太阳望远镜跟踪系统在每次上电时首先读取存于 Flash 中的经纬度信息, 但如果是首次实验经纬度信息未存于 Flash 中则可以使用按键功能先获得经纬度信息, 并存入 Flash 中<sup>[8]</sup>。经过调试, 采用 GPS 的太阳跟踪系统能有效的改进传统的跟踪方法所积累的误差、跟踪精度低等缺点。

### 2.3 温度采集模块

采集的环境温度是作为天线定标时计算天线温度的输入值。温度采集模块使用了一片温度传感器 DS18B20。相对于传统的温度测量系统, 温度传感器 DS18B20 能够很好的解决引线误差补偿、多点测量切换误差和放大电路零点漂移误差等问题, 能够达到较高的测量精度, 能够很好的抗干扰信号。

### 2.4 接收机电压采集模块

当天线对准太阳时, 由于太阳辐射强度较弱, 天线接收机需要将输出的信号转换成为电信号, 并对信号进行混频、滤波、放大等一系列的处理, 最终将太阳辐射强度表征成为微处理器适合采集的电压形式, 电压的大小随着辐

射强度正比例变化。微处理器在采集电压之后传输至上位机并经过一系列公式变化后即可得到所需要的太阳辐射数据。太阳活动剧烈时,接收机的输出的电压值有可能大于微处理 AD 采样的基准电压,导致电压信号采集精度下降,输入的信号过大甚至会烧坏微处理器的 IO 口。因此,在电路设计时在微处理器的 AD 转换电路时增加了集成运算放大器 TL082D。

## 2.5 前端处理电路

前端处理电路主要是对 A3144 霍尔开关所输出的信号进一步加以处理,去掉由于机械、环境因素而产生的干扰以及防止信号突变对单片机及其外围模块的损害。主要有低通 RC 滤波器、光耦电路和整形电路等。这里主要介绍光耦电路和整形电路。其中光耦电路为去除控制执行模块的电路设计对单片机的影响,增强输入信号的抗干扰性,反馈信号在进入单片机前最好进行隔离处理,这样可以防止信号突变而对单片机或者外围模块的损害。所以在电路设计时增加了光耦电路,对反馈信号进行隔离,系统选择的是 PC827 和 PC847 光耦芯片。在控制系统中,霍尔传感器反馈回的信号一般都很好,但是有时候因为某些机械因素或者环境因素而导致输出的波形边沿较差,这样的信号不能直接输入单片机的 I/O 口,所以需要利用脉冲整形电路可以对这些信号加以整形。整形电路主要分为两类,施密特触发器和单稳态触发器。施密特触发电路是一种波形整形电路,当边沿较差或畸变脉冲进入电路时,其输出变为方波或脉冲输出。对于霍尔传感器反馈回的信号,施密特触发器能够很好的去掉干扰。而本文中选用的是 HEF40106BP 反相施密特触发器。

## 2.6 通信模块

采集单片机的通信模块主要分为两个部分:与控制单片机通信以及和 PC 机进行通信。其中,与控制单片机通信主要是获取控制单片机的工作状态以及观测地的地理位置,之后将所获得的信息上传到 PC 机上并显示出来,实现 PC 机对当前射电望远镜系统工作模式的监视;与 PC 机的通信主要是将采集的温度、接收机的输出电压、控制单片机的工作状态以及观测地地理位置上传到 PC 机上,主要的实现方式有串口通信和 TCP/IP 通信。对于 RS-485 串口通信时最好选择 9600 的波特率,则每毫秒能够传输 1.2 个字节,而通信 1 帧 6 个字节,所以 RS-485 串口通信在 9600 波特率时的最快传输速率是每 7.2 毫秒一个数据,所以如果对于要存储时间分辨率为 1ms 的数据或者小于 1ms 的数据时,RS-485 串口通信要在保证数据的可靠信的前提下传输速度显然不满足我们的需求了,所以本文引入了 TCP 通信在保证数据的可靠信下,以提高数据传输速度。单片机如果与网络进行通信需要进行串口转网络服务器,本文中选用的是 USR-TCP232-T。

## 3 系统软件设计

本系统的微处理器部分软件设计均使用 C 语言在 Keil uVision5 集成开发环境下开发,其具有良好的界面风格,

功能强大,使得代码开发的效率大大提高。软件设计从功能上可分为三大部分:下位机跟踪控制系统、数据采集传输系统以及上位机用户监控软件设计<sup>[9-10]</sup>。具体的到各个部分来说,跟踪控制系统软件设计包括微处理器系统初始化、接收 GPS 数据帧并解析、计算得到太阳理论位置对应的方位角和俯仰角、控制天线转动到指定位置;数据采集传输系统包括读取温度传感器 DS18B20 的温度数值、采集并处理接收机电压、向上位机传输采集数据;上位机界面包括实时显示系统工作的相关参数、存储微处理器发送上来的观测数据、提供控制按钮方便用户手动调整天线位置。

### 3.1 系统总设计

微处理器根据上位机发送的指令确定工作方式,当选择自动跟踪时,天线依次进入校零、定标和跟踪三个状态。其中当处于初始化状态和天线校零状态时,微处理器需要向上位机界面发送工作状态提示和观测地经纬度信息;当天线工作于定标状态时,除了发送工作状态信息并且需要分别采集温度传感器数据和接收机电压,发送至上位机用作计算太阳辐射的参数;当天线跟踪状态开始时,在向上位机发送工作状态提示后开始一直采集接收机的电压并发送至上位机界面,直到跟踪结束。

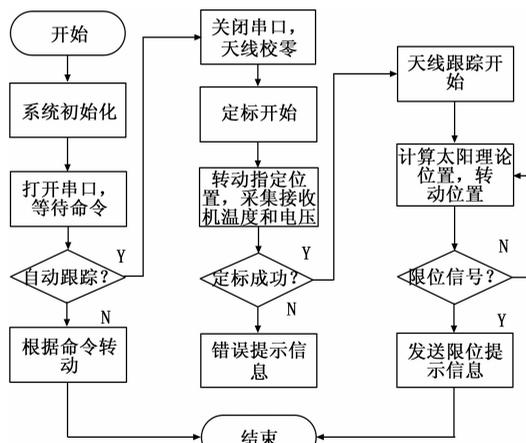


图3 系统总设计流程图

### 3.2 用户界面设计

系统中的 PC 的软件界面是在 Microsoft Visual C++ 6.0 平台上开发的。用户软件界面的设计是为用户提供一个可视化的监控界面,用户可以根据界面上工作模式观察当前系统处于什么工作模式,以便实时了解系统处于什么状态,以及对采集单片机发送上来的数据信息进行处理、存储和画出当前天线温度曲线图,以使用户实时的观测射电数据。

## 4 系统结果分析

图 4 为室外的太阳射电跟踪系统,左半图中的抛物面即是小型抛物面天线,小型抛物面天线下面是两个转台,从上到下分别为俯仰电机和方位电机。系统在方位方向上的跟踪精度达到 0.08 度,在俯仰方向上的跟踪精度达到 0.07 度。

如图 5 所示是系统一分钟所存储时间分辨率为 1 ms 的射电信号实际观测数据,即以一分钟为存储的时间点,通



图 4 射电系统实验机

信时采用 TCP 进行通信时每分钟所存储的射电数据的大小。由于所存储的数据比较大, 所以只选取了 2018 年 3 月份中午时分数据。

59970	12:00:59:969	1539.62
59971	12:00:59:970	1539.62
59972	12:00:59:971	1539.62
59973	12:00:59:972	1540.43
59974	12:00:59:973	1539.62
59975	12:00:59:974	1540.43
59976	12:00:59:975	1540.43
59977	12:00:59:976	1539.62
59978	12:00:59:977	1540.43
59979	12:00:59:978	1539.62
59980	12:00:59:979	1539.62
59981	12:00:59:980	1539.62
59982	12:00:59:981	1540.43
59983	12:00:59:982	1540.43
59984	12:00:59:983	1540.43
59985	12:00:59:984	1540.43

图 5 部分数据图

图中从左到右分别是一分钟内的第几个值、时间和天线温度值。比如: 59970 12:00:59:969 1539.62, 代表一分钟内的第 59970 个值, 中午 12 点 00 分 59 秒 969 毫秒时, 太阳的辐射天线温度值为 1539.62 K。从上述数据可以看出射电数据采集模块以及数据存储已经可以满足系统的时间分辨率为 1 ms 的射电信号实际观测数据的采集、处理以及存储。

(上接第 118 页)



图 5 产品寿命信息

### 3 结束语

本文在分析目前飞行器在工程应用中存在的客观现实问题的基础上, 以 PBS 结构树为基础, 设计并实现了一套面向飞行器的自主保障寿命管理软件, 介绍了软件的总体架构组成以及各功能模块的业务功能设计, 实现了基于 B/S 的自主保障软件开发框架和实时分布式数据库存储技术, 可精准定位飞行器产品, 快速提供产品所有相关自主保障

### 5 结论

本文是基于前人的工作研究的基础上, 采用理论和实验研究相结合的方式, 设计了一种基于 STM32F103ZET6 为主控芯片的太阳射电望远镜系统, 系统在跟踪精度上达到 0.08 度, 采数系统上实现 1 ms 时间分辨率的射电数据采集与储存, 用户界面可以检测记录太阳辐射天线温度值的变化, 实时监控控制系统工作状态。本文的实验成果基本满足太阳射电望远镜系统的天线跟踪和数据采集以及后期的数据处理。

### 参考文献:

- [1] 王绥瑄. 射电天文学 [N]. 科学通报, 1960.
- [2] 向德琳. 射电天文观测 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [3] 欧阳名三, 徐 锐. 太阳自动追踪系统的研究 [J]. 仪表技术, 2013 (11): 21-23.
- [4] 闫伟峰. 基于 CAN 总线的太阳跟踪控制系统研究与实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [5] 颜杨洋. 大型射电望远镜伺服系统控制方法的比较与研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
- [6] 匡付华, 朱丁才. 霍尔传感器 A3144 在精确位移测量中的应用 [J]. 自动化仪表, 2005, 26 (10): 40-41.
- [7] 卢国杰. 基于 GPS 的太阳跟踪控制系统研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [8] 胡楚敏, 高 锋, 金声震. 小射电望远镜抛物面天线可编程控制系统 [J]. 云南天文台台刊, 1988 (4): 55-58.
- [9] 龙 徐. 太阳位置自动跟踪系统的设计 [D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
- [10] 凌 好, 刘荣忠, 等. 基于 STM32 的太阳自动跟踪控制系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (2): 383-385.

数据、寿命信息、更换维修记录、试验数据等, 为飞行器故障诊断及维护决策提供了有效支撑。

### 参考文献:

- [1] Mercer CR, Simon DL, Hunter GW, et al. Fundamental Technology Development for Gas-turbine Engine Health Management [R]. NASA-TM-2007-0022364, 2007.
- [2] Arita M M, Syrmos V L, Vian J L, et al. Multi Source Data Integration for Aircraft Health Management [R]. IEEE Aerospace Conference, 2008.
- [3] 邵新杰, 曹立军, 田 广, 等. 复杂装备故障预测与健康管理工作 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [4] 徐可军. 军用航空发动机可靠性和寿命管理 [J]. 中国工程科学, 2003, 5 (1): 82-88.
- [5] 于晓春. 航空发动机关键件寿命管理系统分析与设计 [A]. 成都: 首届航空保障设备发展论坛论文集 [C]. 2017, 244.
- [6] 杜振宴. 航空发动机寿命管理与监控实践 [J]. 经贸实践, 2016: 241.
- [7] 刘廷毅. 航空发动机研制全寿命管理研究及建议 [J]. 航空发动机, 2012, 38 (1): 1-6.