

气压测高仪的设计与实现*

李 博^{1,2,3} 李孝辉^{1,2}

(1. 中国科学院国家授时中心 西安 710600; 2. 中国科学院精密导航定位与定时技术重点实验室 西安 710600;
3. 中国科学院大学 北京 100190)

摘 要:为了解决车辆在多遮挡环境下难以定位的问题,研制了一款适用于辅助车载接收机定位的高精度气压测高仪。该气压测高仪可以辅助导航接收机在3颗可视卫星的情况下进行导航定位,并提高垂直方向的定位精度。气压测高仪由微控制器STM32控制压力传感器MS5534C采集大气压力和温度,并通过串口将数据向上位机传输。最后通过两个对比实验验证气压测高仪性能。实验结果表明:气压测高仪测得高度的分辨率为1 m,在海拔500 m处,高度均方根误差为0.81 m,可满足辅助车载定位的需求。

关键词:气压测高;MS5534C;STM32F103;辅助定位

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Design and implementation of barometric altimeter

Li Bo^{1,2,3} Li Xiaohui^{1,2}

(1. National Time Service Centre, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. Key Laboratory of Precision Navigation Positioning and Timing, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

3. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This article developed a barometric altimeter with high precision to solve the problem that it is difficult for vehicles positioning in multiple occlusion environments. The GNSS receiver can achieve navigation and positioning in the case of three visible satellites and improve positioning accuracy in the vertical direction aided by the barometric altimeter. Barometric altimeter is controlled by microcontroller STM32, by using pressure sensor to collect the atmospheric pressure and temperature, and sent data to the host computer using a serial port. The benefit of barometric altimeter is demonstrated with the two contrast experiments. The experimental results show that the height resolution measured by the barometric altimeter is 1 m and the RMSE of the height is 0.81 m at 500 m altitude, and satisfy the requirements of vehicles positioning.

Keywords: barometric altimeter; MS5534C; STM32F103; assisted positioning

1 引 言

近年来,全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)得到了快速的发展。但是,GNSS垂直方向上的精度稍逊于水平方向。通常,垂直精度在航空领域至关重要,随着城市的发展,在城市立交桥或者盘山公路的导航中,垂直方向精度的重要性也日渐突出。

在城市峡谷和森林区域等多遮挡环境中,容易造成定位中断。通过测量气压得到高度信息可以辅助GNSS导航,增加系统的可用性。在通过立交桥或盘山公路时,

GNSS的高程精度无法分辨出车辆所处的高度,通过气压测高仪可以精确的测量出相对高度,提高了系统在高程方向上的精度。本文设计了一款高精度气压测高仪,阐述了设计的原理与实现方法,并设计了性能分析实验,分析了气压测高仪的性能,可以满足日常车载定位的需求。

2 气压测高仪设计要求

大气压强随高度而变化的规律是气压测高的理论基础。在标准大气条件下,对流层内由气压计算高度的公式为:

$$H = \frac{R_d}{g} \cdot \left(\frac{T_0 + T}{2} \right) \ln \frac{P_0}{P} + H_0 \quad (1)$$

式中： $R_d=287.05 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 是干空气的气体常数， $g=9.80665$ ，为重力加速度。当参考点取海平面时，在标准大气条件下，海平面处的静压 $P_0=101.325 \text{ kPa}$ ，温度 $T_0=288.15 \text{ K}$ ，海平面高度 $H_0=0 \text{ m}$ 。式(1)也称为 Laplace 气压-高度方程。使用式(1)通过测量到气压 P 和温度 T 可以计算出相对于参考点 H_0 的高度 H 。

在一定的环境温度下，高度的变化可以通过式(1)右侧，对气压 P 求偏导得到，如式(2)所示：

$$\frac{\partial H}{\partial P} = \frac{R_d}{g} \cdot \left(\frac{T_0 + T}{2} \right) \cdot \left(-\frac{1}{P} \right) \quad (2)$$

根据式(2)，分别画出了温度为 -5°C 、 15°C 和 35°C 时，气压在 $560 \sim 1010 \text{ hPa}$ 范围内高度的变化率，如图1所示。如在 960 hPa 处，温度分别为 -5°C 、 15°C 和 35°C 时气压每减少 1 hPa ，高度分别上升 8.5 m 、 8.8 m 和 9.1 m 。

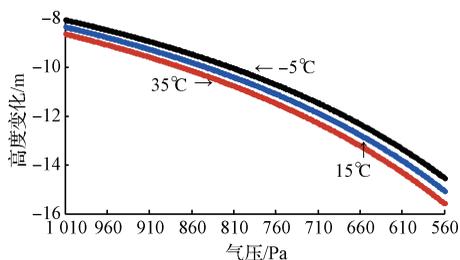


图1 不同温度条件下，高度随气压的变化率

为满足车载的需求，城市道路设计时速最高为 80 km/h ，为实现每移动 5 m 定位一次，气压测高仪的输出频率应大于 4 Hz ；高程精度应小于 2 m ，可以区分车辆位于高架桥的垂直位置。

为使气压测高仪的输出的达到 m 级的分辨率，在 $0 \sim 1.5 \text{ km}$ 高度范围内，气压的测量分辨率应优于 0.1 Pa 。此时温度每变化 1°C ，对输出高度的影响为 0.016 m ，影响较小。

3 气压测高仪的实现

3.1 硬件实现

本文设计的气压测高仪硬件部分主要由传感器模块、控制模块、通信模块、电源模块和其他外围电路组成。系统的总体结构示意图如图2所示。

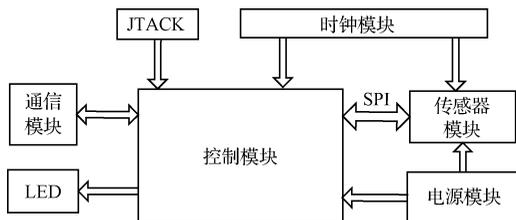


图2 气压测高仪系统结构示意图

在系统中，电源模块向传感器模块和控制模块提供 3.3 V 直流输入；时钟模块分别向传感器模块和控制模块提供 32.768 kHz 和 8 MHz 的时钟驱动；控制模块通过 SPI 串行外设接口向传感器模块发送指令；传感器模块接收到指令并返回测量数据；测量数据由控制模块接收并处理，经通信模块输出。

传感器模块对系统的总体性能起关键性作用。本文选择了瑞士 Intersema 公司生产的 MS5534C 气压传感器。它是一款压阻式压力传感器，并集成有 ADC 接口的 SMD 混合集成电路，其采用先进的 ADC 模数转换 IC 电路，可提供 16 位的压力和温度数字输出。该传感器压力测量范围为 $10 \sim 1100 \text{ hPa}$ 、分辨率为 0.1 hPa ，温度的测量范围为 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 、分辨率为 0.1°C ，可以使测量的高度分辨率优于 1 m 。另外，传感器有 6 个软件校准系数，压力绝对精度为 $\pm 1.5 \text{ hPa}$ ，相对精度为 $\pm 0.5 \text{ hPa}$ ，并且无需再接其他外围模块，接口简单、电路连接方便、尺寸小，可以在 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 环境中应用。

控制模块是采用 ST 公司基于 ARM® Cortex-M3 的 32 位微控制器 STM32F103ZET6，该处理器是一款扩展性强、性价比非常高的芯片，具有 64 KB SRAM 、5 个串口、1 个 USB 接口以及 112 个通用 IO 口。充分利用 STM32 集成的片内资源，可使得传感器的软硬件设计大大简化，系统可靠性极大提高。还使得后期导航电文处理和拓展实验更加方便。

通信模块采用 RS-232 接口与上位机或者导航设备进行通信。电源模块中供电接口使用 MiniUSB，可以使用计算机 USB 接口为系统供电，通过三端低压差稳压芯片 AMS1117 输出所需电压。复位键可以对系统进行手动复位。两个 LED 灯可以用来指示程序状态。

时钟模块采用 8 MHz 晶振为 STM32 提供外部时钟驱动和采用 32.768 kHz 晶振为 MS5534C 提供时钟驱动。系统硬件示意如图3所示。

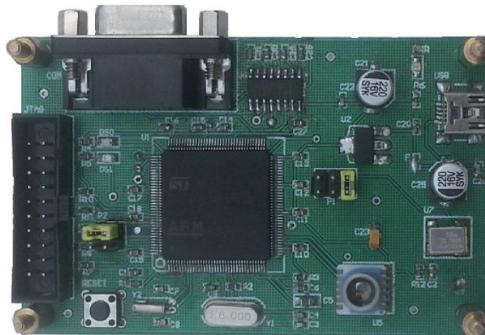


图3 气压测高仪硬件示意

3.2 软件实现

软件设计采用模块化设计方法，主要包括系统初始化子程序、传感器数据读取子程序、温度和气压计算子程序、

高度计算子程序、串口通信子程序等。程序流程如图4所示。

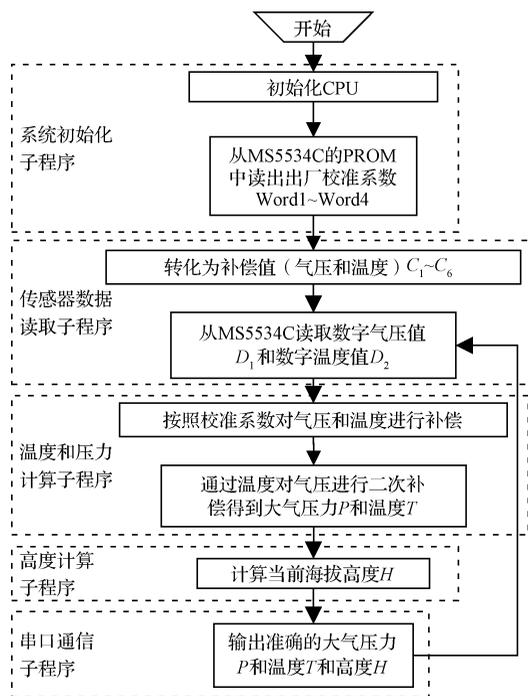


图4 气压测高仪的软件流程

首先对 CPU 进行初始化,包括时钟使能,UART 的波特率、校验位、字长等设置,SPI 的通信方式、工作模式的时钟相位等配置,LED 和延时函数的初始化。CPU 然后从 MS5534C 的 PROM 中读取校准系数 Word1 ~ Word4,并转化为压力补偿值和温度补偿值 $C_1 \sim C_6$ 。待上述工作完成后进入主循环程序;CPU 依次从 MS5534C 中读取数字压力值 D_1 和数字温度值 D_2 ,再按照校准系数对温度和压力进行补偿,得到实际的压力值 P 和温度值 T ;然后通过温度对压力进行二阶补偿;输出精确的压力值和大气温度值。进行下一次循环。

本文设计的气压测高仪的最高输出频率为 8 Hz,以载体移动速度为 80 km/h 时为例,载体每移动 2.8 m,高度信息就可以更新一次,满足车载定位需求。

4 静态实验测试与结果分析

为了验证气压测高仪的性能,本文设计了两个实验:与气象站对比实验和互比实验。

4.1 与气象站对比实验

将气压高度计放置于 ZQZ-A 自动气象站相同位置与环境下,进行现场数据采集获得的气压和温度进行数据对比。ZQZ-A 自动气象站是一款全天候、全自动化运行的中小尺度自动气象站,其测量温度和气压的准确度分别为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 和 $\pm 0.3\text{ hPa}$,分辨率分别为 0.1°C 和 0.1 hPa 。如图 5 所示为 2015 年 9 月 7 日至 9 月 8 日 32 h 内,气压测高仪与气象站的温度和气压值的偏差。如图 6 所示为

根据式(1),以气象站作为参考点,解算气压测高仪相对于气象站的高度。

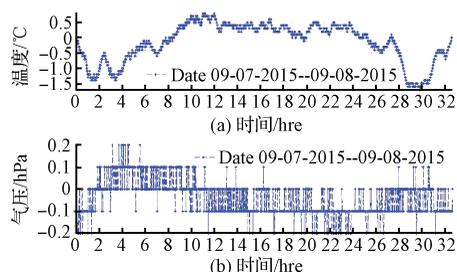


图5 气压测高仪与气象站的温度和气压的偏差

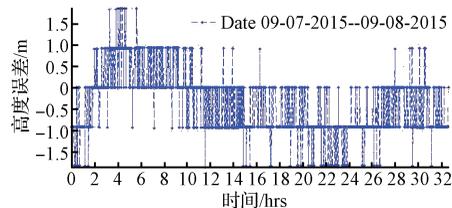


图6 气象站与气压测高仪之间的相对高度

为了更清晰地反映计算高度的特点,利用数理统计中的均方根值对计算结果进行分析。均方根值反应了数据的离散程度,其定义为:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N x_n^2} \quad (3)$$

式中: X_1, X_2, \dots, X_n 为在此处气象站数据和气压测高仪数据之间的差值。

如表 1 所示为温度的偏差和气压的偏差,以及解算出的相对高度。在 32 h 内气压的差在 $\pm 0.2\text{ hPa}$ 之内波动,其最大误差为 0.2 hPa ,所造成的高度误差为 1.8 m 。

表1 气压测高仪与气象站的温度和气压的偏差

	均值	标准差	均方根	最大值	最小值
温度/ $^\circ\text{C}$	-0.15	0.63	0.65	0.8	-1.70
气压/hPa	-0.04	0.08	0.09	0.2	-0.20
高度/m	-0.36	0.72	0.81	1.85	-1.84

4.2 互比实验

使用两个相同的气压测高仪,放置于相同的位置和环境下分别进行数据的采集,如图 7 所示为 2015 年 9 月 7 日至 9 月 8 日 32 小时内采集到的温度和大气压力之间的偏差。其数据的统计特性如表 2 所示。

表2 两个气压测高仪的温度和气压偏差

	均值	标准差	均方根	最大值	最小值
温度/ $^\circ\text{C}$	-0.002	0.08	0.08	0.2	-0.4
气压/hPa	-0.06	0.06	0.08	0.2	-0.1
高度/m	0.54	0.51	0.74	1.8	-0.9

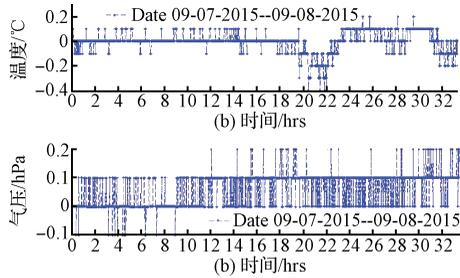


图7 两个气压测高仪之间的温度和气压偏差

气压测量高度的偏差不仅包括传感器自身误差、设备通风等因素造成的温度与气压的误差,也包括参考点绝对高度的误差。天气的剧烈变化对气压测高仪也有一定的影响,当气压和气温相对变化较快,高度的测量精度略有降低。因为实验条件有限,未能在高海拔地区进行测量。

5 结论

本文使用 MS5534C 数字压阻式压力传感器,设计了一种基于 STM32F103 控制器的气压测高仪,分别从软硬件角度出发,介绍了测高仪的实现方法,高精度地实现了大气压力与高度的转换。高度的测量能达到了 m 级分辨率,最高输出频率为 8 Hz,满足车载定位需求。

参考文献

- [1] 孙健. GPS 和高精度气压高度表的组合导航定位技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [2] 高兴宝,葛化敏,陈康奇. 基于 STM32 的便携式气压高度计设计[J]. 科技信息,2012(31):189-190,174.
- [3] 余德文,李锦云,李斐. 基于 STM32 的高精度车载气压高度表设计[J]. 传感器与微系统,2014,33(10):58-60.
- [4] 王志刚,唐飞,王晓浩,等. 基于 MS5534B 的气压高度计系统的设计[J]. 微纳电子技术,2008,45(6):351-355.

- [5] 郭勇,姜学东. 基于 MSP430 单片机的气象数据采集系统[J]. 国外电子测量技术,2007,26(10):43-46.
- [6] 龚凌霄,叶芝慧,冯奇. 基于 STM32 的北斗/RFID 组合定位系统设计[J]. 电子测量技术,2014,37(4):82-88.
- [7] 辜新宇,郭际,施韶华,等. 多通道精密时间间隔测量系统的研制[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(1):69-75.
- [8] 郝振海,黄圣国. 高精度气压高度表的研制[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(1):134-138.
- [9] 高善清,魏新亮. 气压测高误差分析及修正[J]. 电子测量技术,2012,35(9):60-63.
- [10] 吴思远,马建仓. 基于 GPS 及气压传感器定位仪的设计[J]. 西北大学学报:自然科学版,2012(4):577-580,584.
- [11] 潘银松,丁建军,黄宇坤,等. 一种小型无人机飞行控制系统的研究与设计[J]. 电子测量技术,2013,36(2):100-103.
- [12] 解伟. 基于 STM32 的自动气象站控制模块设计[J]. 电子测量技术,2014,37(7):107-110.
- [14] 田海燕,赖春强,贺思桥. 基于 MS5534C 的数字气压计设计[J]. 兵工自动化,2012(9):86-88.
- [15] 竺明超. 嵌入式气压高度表辅助 GPS 定位装置的设计和实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.

作者简介

李博,男,1989 年出生,博士研究生,主要研究方向为多信息源融合导航方法。

E-mail: lbeer1831@163.com

李孝辉,男,1974 年出生,研究员,博士生导师,主要研究方向为高精度时间频率测量控制方法与技术。

E-mail: xiaohui@ntsc.ac.cn