

文章编号: 1671-0576(2022)03-0049-06

ARM 处理器在测高雷达中的应用

刘宏宇^{1,2,3}, 黄 啸^{1,2,3}, 倪 亮^{1,2,3}, 陈建炜^{1,2,3}

(1. 上海无线电设备研究所, 上海 201109; 2. 上海目标识别与环境感知工程技术研究中心, 上海 201109; 3. 中国航天科技集团有限公司交通感知雷达技术研发中心, 上海 201109)

摘 要: 基于 ARM 处理器设计并实现了一种体积小、重量轻、集成度高的测高雷达。雷达包括微波和信号处理两部分, 通过控制微波收发组件, 雷达产生探测目标所需要的发射信号, 并对接收到的目标回波信号进行处理, 实现对地面、海面相对高度的实时探测, 并在海面探测条件下实时计算出海浪高度。经实验验证, 雷达能够稳定工作, 测高精度满足要求, 具有一定的工程应用前景。

关键词: ARM; 测高雷达; 信号处理

中图分类号: TN953^{+.2}

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0576.2022.03.009

Application of ARM Processor in Altimetry Radar

LIU Hongyu^{1,2,3}, HUANG Xiao^{1,2,3}, NI Liang^{1,2,3}, CHEN Jianwei^{1,2,3}

(1. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Target Identification and Environment Perception, Shanghai 201109, China; 3. Traffic Perception Radar Technology Research & Development Center of CASC, Shanghai 201109, China)

Abstract: An altimetry radar with small volume, light weight and high integration is designed and implemented on the basis of ARM processor. The radar mainly includes microwave and signal processing. By controlling the microwave transceiver module, the radar generates the transmitting signal to detect the target and processes the received target echo signal. The relative heights of the ground and sea surface can be detected in real time. The wave height can be calculated in real time under the condition of sea surface detection. The experimental results show that the radar can work stably, and the altimetry results can meet the accuracy requirements. It has a certain engineering application prospect.

Key words: ARM; altimetry radar; signal processing

0 引言

测高雷达作为一种探测距离地面、海面相对高度的装置,必须能够实时给出高度信息,并保证测量结果的准确性。常见的测高雷达多基于数字信号处理器(DSP)实现。DSP虽然在数字信号处理方面具有优势,但其实现控制功能的能力较弱,有时需要结合现场可编程门阵列(FPGA)等其他芯片来实现,导致雷达设计的复杂度增加。

ARM 处理器作为一种常用的嵌入式处理器,因具有高性能、低功耗、低成本、芯片类型丰富、第三方支持广泛等特点而受到广大用户的青睐。ARM 处理器包含非常丰富的外设,能在各个领域的不同应用场景中完成精确的控制功能^[1]。相比于 FPGA、DSP 等处理器,ARM 处理器能大大降低系统设计复杂度,提高系统集成度。STM32 系列的 ARM 处理器内部集成了硬件浮点运算单元(FPU),支持多种 DSP 指令集,能够实现快速傅里叶变换(FFT)等数字运算。此外该处理器还集成了一整套专门用于软件开发的函数库,用户只需调用上层函数即可实现相应功能,并不需要进行复杂的寄存器操作,大大降低了软件的开发难度,节省了开发时间^[2]。目前 ARM 处理器已经广泛应用于各种嵌入式系统。

本文设计了一种基于 ARM 处理器 STM32F407ZGT6 的测高雷达,实现对地面、海面相对高度的测量以及海面测高时对海浪高度的计算,并通过机载挂飞和造波池实验,验证该雷达的连续跟踪测高能力和海浪高度计算的准确性。

1 测高雷达组成

基于 ARM 的测高雷达通过微波组件发射信号,并对雷达接收的目标回波信号进行放大、滤波、自动增益控制(AGC)等处理,经模数转换器(ADC)采样,通过 ARM 处理器运算处理后得到高度信息。测高雷达组成如图 1 所示。

图 1 中 ARM 处理器为雷达信号处理器的核心。通过 RS422 串口与控制系统通信,接收控制系统的控制指令,并将测高结果和遥测信息传递给控制系统。通过串行外设接口(SPI)配置微波

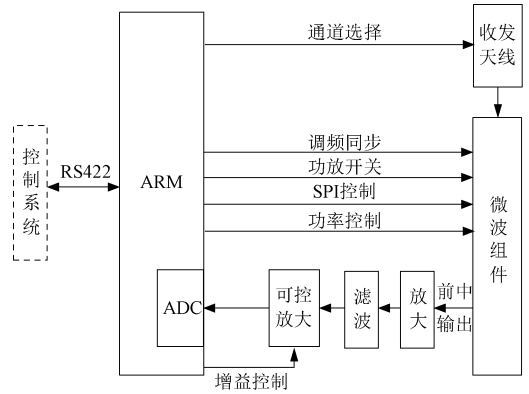


图 1 基于 ARM 处理器的测高雷达组成

组件控制参数,使其产生特定频率和带宽的线性调频信号。调频同步和功放开关信号用于实现微波组件信号发射和关闭的控制,并生成系统工作、信号处理的时序。功率控制信号用于实现测高雷达距离地面、海面不同高度时发射功率的自适应调节。收发天线具有宽波束和窄波束两种工作模式,可通过通道选择进行更改。

2 测高雷达硬件设计

基于 ARM 处理器的测高雷达的硬件电路主要由 ARM 处理器和其他外围电路组成。ARM 处理器主要完成微波组件控制、控制系统通信、天线通道选择和回波信号采集处理等功能。其他外围电路包括电源模块、时钟电路、串口通信电路、滤波电路、自动增益控制电路等。其中电源模块为微波组件和 ARM 处理器提供电压;时钟电路为 ARM 处理器提供稳定的外部时钟源;串口通信电路实现 ARM 处理器和控制系统的 RS422 通信;滤波电路滤除电路中产生的噪声以及回波信号中由杂波引起的干扰;自动增益控制电路实现对回波信号强度的自适应调节,使其始终保持在合适的范围。

2.1 ARM 处理器

本文选用 ST 公司的高集成度 32 位 ARM 处理器 STM32F407ZGT6。该处理器采用 ARM CortexTM-M4F 架构,工作频率最高可达 168 MHz。集成了 1 MB 的片上闪存(Flash)、192 kB 的片上静态随机存取存储器(SRAM)、114 个输入输出(I/O)接口、3 个 12 位的 ADC、

17个定时器、6个通用同步/异步串行接收/发送器(USART)及3个SPI。主要应用在低功耗、低成本条件下,并能取得较高的性能^[3]。

ARM处理器资源配置情况如图2所示。ARM处理器通过专用的电源接口(VDD)和外部电源模块相连,获得ARM处理器工作时所需要的稳定电压。通过时钟接口(CLK)和外部时钟电路相连,接收经时钟电路分频后的具有高稳定性和准确性的50 MHz外部时钟,随后经过芯片内部的时钟处理电路,为各个外设提供工作时钟。通过一路SPI与微波组件相连,对微波组件进行配置,产生满足要求的线性调频信号。分别通过一路I/O接口控制调频同步和功放开关信号,产生工作时序。通过一路UART与串口通信电路(RS422)相连,经RS422串口芯片完成与控制系统的双向通信。通过一路ADC与滤波电路的输出相连,完成对滤波后中频回波信号的采集。通过一路I/O接口与收发天线相连,完成天线宽、窄波束模式的选择。通过3路I/O接口完成对微波组件发射功率的控制。通过3路I/O接口连接外围自动增益控制电路实现对回波强度的自适应调节。

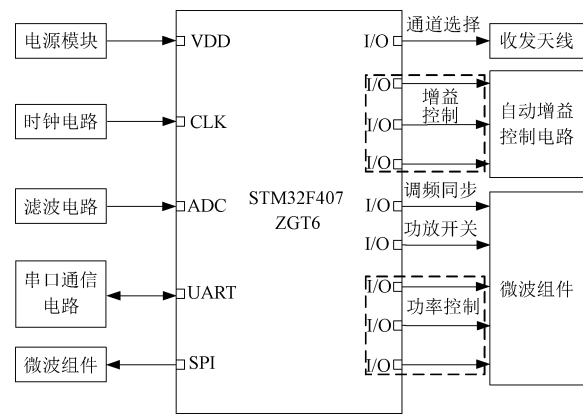


图2 ARM处理器资源配置框图

2.2 外围电路

(1) 电源模块

电源模块为测高雷达系统提供电压,主要将控制系统提供的+28 V电压转换为+8, +5, -5 V等3种不同的电压。其中+8 V电压主要用于微波组件,+5 V和-5 V电压用于ARM处理器和其他电路。

(2) 时钟电路

ARM处理器在时钟的驱动下,进行时序逻辑处理,时钟的稳定性和准确性对ARM处理器的工作性能起到至关重要的作用。STM32F4系列处理器集成了内部时钟源,同时支持外接时钟源。为了提高时钟的稳定性和抗干扰能力,采用外接时钟源(CD54HC74F)^[4],缩短时钟信号的边沿变化时间,对外部输入的50 MHz时钟进行分频,得到稳定的25 MHz时钟供ARM处理器使用。

(3) 串口通信电路

串口通信电路用于实现ARM处理器与控制系统的双向通信。ADM2682串口通信芯片是一款完全集成的信号与电源隔离的数据收发器,具有±15 kV静电保护,适用于多点传输的高速通信。通过配置全双工的RS422串口通信电路实现与控制系统的高速实时双向通信。

(4) 滤波电路

滤波电路分为低通滤波和高通滤波两部分。目标回波信号进入雷达,经过放大后,先进行高通滤波,滤除由地物等杂波引起的低频信号,减小地物杂波的干扰。再对高通滤波后的信号进行自动增益控制,将信号幅度控制在一个合适的范围后进行低通滤波,以减小信号被放大后的高频毛刺引起的干扰。

(5) 自动增益控制电路

为了避免雷达接收到的目标回波信号经滤波处理后,信号过大饱和或过小难以检测的问题,需要控制回波信号的幅度在一定范围内自适应调节。使用可变增益放大器AD603AR对回波信号的幅度进行调整,实现信号增益在(-1~+41) dB范围内变化,满足测高雷达的工作需求。

3 测高雷达软件设计

3.1 软件设计流程

测高雷达软件的开发环境为Keil5.27,在开发环境中移植ARM处理器专用的函数库来加快开发进程。软件的主要功能为通过控制ARM处理器、外围电路及微波组件实现对地面、海面高度的测量及海浪高度的计算,软件设计流程如图3所示。

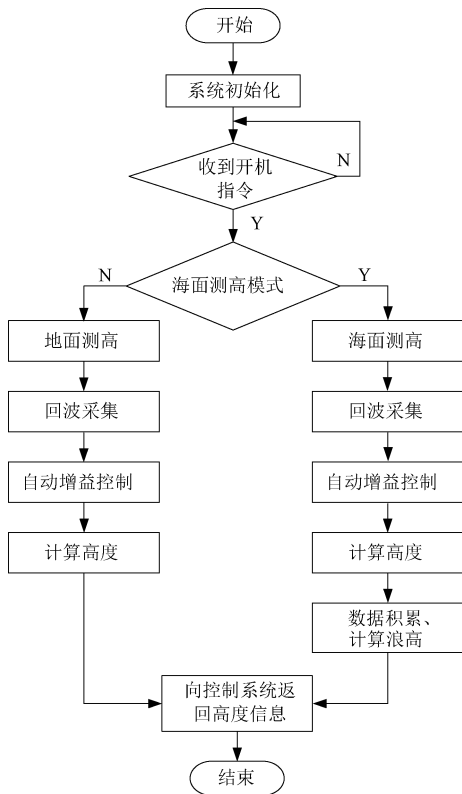


图 3 软件设计流程图

测高雷达上电后,首先进行雷达的初始化,主要包括时钟、ADC、串口、SPI 及 I/O 接口的初始化。然后开启与控制系统的通信,接收来自控制系统的开机指令和测高模式控制指令。在不同的测高模式下完成回波信号采集,并根据信号强度进行自动增益控制。对采集的信号进行 FFT 等运算,得出高度值,在海面测高模式下还要进行高度数据的积累,计算得到浪高值。最后将获得的高度数据和浪高数据返回给控制系统。

3.2 回波信号采集

回波信号采集是进行信号处理的基础。采用 ARM 处理器内部自带的 ADC,对其进行配置后完成对回波信号的采集。目标回波信号经滤波之后的频率为(15~850)kHz,因此配置 ADC 的采样率为 2 Msps,以满足奈奎斯特采样率的要求。同时为了提高采样精度,配置 ADC 的采样位数为 12 位,由于采样速率较快,开启 ADC 采样结果的直接存储器访问(DMA)传输,将采样后的数据直接搬到内存中供后续处理使用。

3.3 自动增益控制

自动增益控制通过改变和自动增益控制电路相连的 3 个 I/O 接口的高低电平来实现。3 个接口的不同高低电平组合,可以控制自动增益控制电路产生不同范围的增益变化。在实际工作过程中,当回波信号的强度超过设定的最高门限时,将 AGC 的自动调节数量减小一级以实现信号的衰减;当回波信号的强度小于设定的最低门限时,将 AGC 的自动调节数量增大一级以实现信号的增强。为了避免 AGC 自动调节过于灵敏,当信号强度连续 8 次超过范围时才对其进行调节,否则不调节。

3.4 高度计算

回波信号采集之后,通过对回波信号的处理,进行高度的计算,流程如图 4 所示。

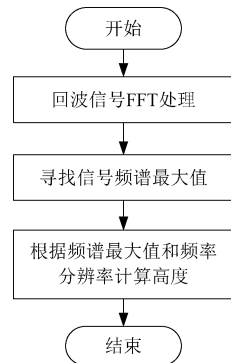


图 4 高度计算流程图

首先对回波信号进行 FFT 运算。FFT 运算是整个回波信号处理的核心,信号经 FFT 运算后得到信号频谱,目标距测高雷达的距离可由频谱进行计算得出。通过寻找回波信号频谱中能量最强的频率即频谱的最大值,确定目标回波在频谱中的位置 n ,通过线性调频信号的带宽和脉宽,确定单位频率分辨率大小的频率对应的距离 d ,则高度 h 的计算公式^[5]为

$$h = nd \quad (1)$$

在进行 FFT 运算时,对前 4 个测量周期内的回波信号取平均来保证测量结果的稳定性,后续的信号经过滑窗处理后再进行此操作。

3.5 浪高计算

在进行海面测高时,需要对海面进行精细化

探测,实时计算海浪的高度。海浪高度通过对测量高度数据的积累与运算得到,根据高度测量周期,首先积累 500 个高度数据(约 5 s),以覆盖一个完整的波浪,通过提取高度的变化信息,得到有效浪高^[6]

$$h_{\text{eff}} = 4 \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (h_i - \bar{h})^2} \quad (2)$$

其中

$$\bar{h} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \quad (3)$$

式中: N 为积累的浪高个数; h_i 为第 i 次测量得到的浪高; \bar{h} 为平均浪高。

4 实验验证

通过机载挂飞和造波池实验,分别验证测高雷达的连续跟踪测高性能以及海浪高度测量的准确性。

机载挂飞实验时,将测高雷达安装在实验运输机上,测量爬升阶段飞机对地面的相对高度,并和飞机上搭载的全球定位系统(GPS)输出高度进行同步对比。机载挂飞实验地面测高结果如图 5 所示。

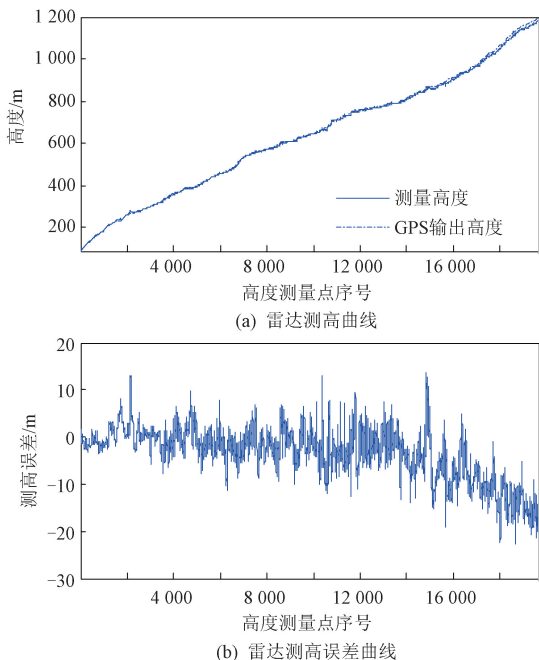


图5 机载挂飞实验地面测高结果

由图 5 可知,测高雷达在(0~1 200)m 的高

度范围内工作正常,能连续跟踪测量高度。与 GPS 的输出高度相比,测高雷达的平均测量误差为 12.9 m,误差均方根为 16.3 m,满足测量精度要求。

造波池实验场景如图 6 所示。将测高雷达固定在塔吊的吊钩上,并连接测试仪、电源等设备,然后将测高雷达置于造波池正上方某一固定高度处,对其下方造波池内的人造浪进行测量。造波池可根据需求模拟(1~3)级海情的正弦谱浪或 PM 谱浪。

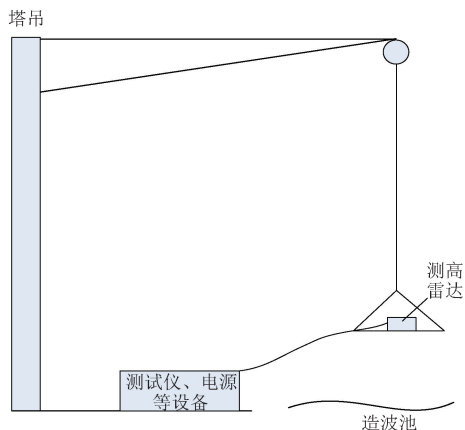


图6 造波池实验示意图

将测高雷达置于造波池正上方 15.5 m 高度处,并模拟 3 级正弦谱浪进行测量,得到的测量高度和浪高如图 7 所示。

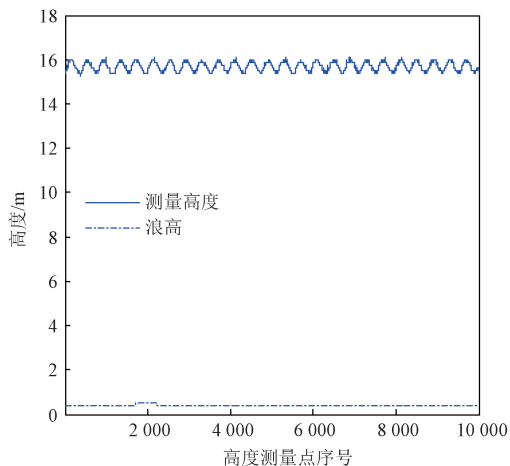


图7 3级正弦谱浪条件下的高度和浪高测量结果

由图 7 可以看出,测高雷达测得的高度值呈正弦波形式变化,与模拟的 3 级正弦谱浪相吻合,得到的浪高大多为 0.4 m。由于造浪池区域受限,接触到池壁的浪涌反弹后与后续浪涌对冲,形

成一个瞬时的浪峰,偶尔能测到 0.5 m 的浪高,按照海浪高度的划分等级,属于 3 级海情的浪高范围。

5 结束语

基于 STM32 系列 ARM 处理器实现的测高雷达具有集成度高、体积小、重量轻的特点。通过机载挂飞和造波池实验,验证了该雷达具有良好的连续跟踪测高性能,可实现海浪高度的精准测量,具有很好的工程应用前景。

参考文献

[1] 胡振国. 基于 ARM 的嵌入式软硬件系统设计与

(上接第 29 页)

4 结论

本文通过建立激光引信弹目交会模型,在脱靶量、脱靶方位角、飞行速度、光束夹角和光束覆盖角固定,攻击偏角与飞行落角在一定范围内随机取值的条件下,对激光引信光束探测距离进行了统计分析。统计分析得到的最远探测距离与根据激光引信探测几何关系计算得到的目标最远特征点探测距离一致。统计结果表明:目标尺寸为 $8\text{ m} \times 6\text{ m} \times 6\text{ m}$ 、脱靶量最大为 8 m 时,激光引信的距离探测能力不小于 18 m;在脱靶量为 8 m、脱靶方位角为 0° 时,有效探测光束的宽度最宽,为 70° 。因此在该弹目交会条件下,激光引信光束覆盖角应不小于 70° ,才能尽可能提高目标探测概率。

参考文献

[1] 张正辉,杨明,许士文. 激光引信光束布局方式的选择与分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 700-704.

实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2010.

[2] 尚书阳,徐志祥,张海,等. 基于 ARM 的嵌入式轴承健康监测系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2021(1): 58-62.

[3] 程成,李涂. 基于 ARM 潜油电泵多参数移动监测系统[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(1): 34-36.

[4] 周国娟,龙绪明. 基于 ARM 处理器的供电监测装置设计[J]. 电测与仪表, 2019, 56(20): 103-107.

[5] 邱菁,黄继伟,陈阿辉,等. 高精度调频连续波雷达测距算法的研究[J]. 微型机与应用, 2017, 36(9): 22-24, 27.

[6] 张阳,张凤元,张波,等. 北斗反射信号海风海浪探测系统软件设计[J]. 测控技术, 2015, 34(11): 103-106.

[2] 魏斌,郑链,王克勇,等. 用于近距离目标探测的激光引信技术[J]. 激光杂志, 2005, 26(6): 10-12.

[3] 诸德放,张真,王文强. 空地反辐射导弹激光近炸引信目标识别方法[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(3): 75-78.

[4] 韩超,邓甲昊,高静,等. 激光引信目标探测与识别仿真软件的设计[J]. 北京理工大学学报, 2015, 35(2): 149-153, 158.

[5] 张伟,李玉钊,汪哲思,等. 激光引信距离测量统计分布特性研究[J]. 制导与引信, 2018, 39(3): 6-9.

[6] 陈杉杉,张合,徐孝彬. 脉冲激光引信探测平面目标的回波特性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(6): 1095-1102.

[7] 刘文钊,桂延宁,董卫斌,等. 基于目标回波点面积特征的信号处理方法[J]. 探测与控制学报, 2013, 35(3): 74-79.

[8] AMANN M C, BOSCH T, LESCURE M, et al. Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement[J]. Optical Engineering, 2001, 40(1): 10-19.

[9] 李合新,张京国,高宠. 激光引信脉冲宽度对目标回波的影响研究[J]. 航空兵器, 2011(3): 52-55.