



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

# DSP 原理及 C 编程开发技术 小组作业

题目： 无人船多波束测深系统

组 别： 二组

小组成员： 鲁勋 付万魁 高一鸣

张鹏摇 孙一凡 王倩

邢子晗 刘澎湃

二〇二四年 四月

# 目录

第一章 定义系统功能 .....	4
1.1 系统研制目的 .....	4
1.2 系统功能实现 .....	4
1.3 标准要求 .....	4
1.4 关键指标要求 .....	5
第二章 系统指标.....	6
2.1 主要功能指标 .....	6
2.2 主要技术指标 .....	6
2.3 硬件组成 .....	7
2.4 软件组成 .....	7
第三章 系统组成.....	8
3.1 硬件框图 .....	8
3.2 系统软件组成 .....	8
3.3 系统接口 .....	9
3.4 人机界面方案 .....	9
第四章 器件选择.....	10
4.1 DSP 芯片.....	10
4.1.1 运算速度、精度以及功耗 .....	11
4.1.2 硬件资源.....	11
4.1.3 开发工具.....	12
4.1.3 价格以及技术支持等 .....	12
4.2 其他主要模块选择.....	13
4.2.1 ADC 与 DAC 芯片 .....	13
4.2.2 储存器芯片 .....	14
4.2.3 电源系统.....	15
4.2.4 通信模块.....	16
4.2.5 航行系统.....	17
4.2.6 换能器设备 .....	19

第五章 软件设计方案 .....	20
5.1 软件功能定义 .....	20
5.1.1 导航控制 .....	20
5.1.2 多波束探测 .....	21
5.1.3 通信 .....	21
5.2 软件模块划分 .....	22
5.3 软件系统结构 .....	22
5.3.1 导航规划 .....	22
5.3.2 航行控制 .....	23
5.3.3 通信结构设计 .....	23
5.3.4 多波束探测 .....	24
5.4 软件流程 .....	25
5.4.1 硬件自检 .....	25
5.4.2 导航规划流程 .....	25
5.4.3 多核调度流程 .....	26
第六章 调试方案 .....	29
6.1 硬件调试 .....	29
6.1.1 硬件静态测试 .....	29
6.1.2 上电测试 .....	29
6.1.3 PC 与 DSP 之间的 JTAG 接口通讯测试 .....	29
6.1.4 DSP 对 SDRAM、FLASH 的读写程序调试 .....	30
6.2 软件调试 .....	30
6.2.1 控制系统调试 .....	30
6.2.2 EDMA3 模块调试 .....	30
6.2.3 核间通信模块调试 .....	31
第七章 风险分析 .....	32
第八章 总结 .....	33
参考文献 .....	34

# 第一章 定义系统功能

## 1.1 系统研制目的

随着社会的发展,地理信息数据在经济发展中扮演着重要的角色,可以说地理信息数据是数字中国的基石,目前,陆地地理信息数据比较丰富,水下地形数据则相对单一,个别地区甚至是空白,因此水下测量技术的发展一直受人们的重视。

无人船多波束测深系统的目的是利用先进的技术和设备,实现对水下地形的高效、精确的测量和成像。这种系统可以通过同时发射多个声波束,覆盖更大的水域范围,并能够实时获取水深和海底地形等数据。其主要目的是提高水深测量的效率、精度和覆盖范围,从而满足海洋工程、海洋科学研究、水文测量等领域的需求。

## 1.2 系统功能实现

- (1) 多波束测量:系统能够同时发射多个声波束,并接收返回的声波信号。通过测量声波的传播时间和返回信号的强度,可以确定水下目标的距离和特性,实现对水深的测量。
- (2) 海底地形成像:通过多波束测深系统获取的数据,可以生成海底地形的高分辨率三维图像。这些图像可以显示海底的起伏、地形特征以及水下物体的分布情况,为海洋地质勘探和海洋科学研究提供重要数据支持。
- (3) 水文参数测量:除了测量水深外,多波束测深系统还可以获取水下环境的其他参数,如水温、盐度、悬浮物浓度等。这些水文参数对海洋环境监测、生态保护和资源开发具有重要意义。
- (4) 实时监测与数据传输:系统能够实时监测水深和海底地形的变化,并将测量数据实时传输至控制中心或数据处理设备。这样的实时监测功能对于海洋工程施工、航道维护等应用场景非常重要。
- (5) 自主化操作:无人船多波束测深系统通常与无人船平台集成,实现自主化的水下测量任务。系统可以通过预设航线和任务参数,自主进行测量操作,减少人工干预,提高测量效率。
- (6) 数据处理与分析:系统能够对获取的海底地形数据进行处理和分析,包括数据校正、滤波处理、地形重建等,从而提取出海底地形特征和水文信息,为后续的数据应用和科学研究提供支持。

## 1.3 标准要求

多波束测深系统应按照系统技术手册的要求进行安装。多波束换能器、姿态传感器、艏向测量仪和定位天线应与测量船保持刚性连接。

多波束换能器可根据测量船和测量项目需要选择船底或船舷安装,换能器应安装在噪声低且受气泡效应影响较小的位置,船底安装时尽可能靠近测量船中线的位置;多波束换能器的横向、纵向及艏向安装角度应满足系统安装的技术要求。

姿态传感器应尽可能安装在测量船的中心线位置,并尽可能靠近重心位置或者靠近横摇和纵摇轴的交叉点位置,安装平台要求震动较小、相对水平、稳定且和船体刚性连接,其自身坐标轴应尽可能与船体坐标轴平行。

艏向测量仪应安装在电磁干扰较小、震动较小且相对稳定的位置,安装时应使艏向测量仪的读数零点尽可能指向船艏并与测量船中线平行。定位设备的接收天线应安装在测量船的上部开阔位置,应能保证 GNSS 卫星信号的干扰最小。

安装完成后,测量多波束换能器,姿态传感器、艏向测量仪、定位天线之间的相对位置偏差,并统一到测量船坐标系。位置偏差测量误差应不大于 0.05m。

## 1.4 关键指标要求

姿态传感器包括横摇、纵摇和升沉等传感器单元,用于多波束测量船的运动姿态测量,其精度要求:

- (1) 横摇角度和纵摇角度测量误差不大于  $0.05^{\circ}$  ;
- (2) 升沉测量误差不大于 0.05m 或测量值的 5%。

艏向测量仪应采用数字艏向测量仪,如电罗经或姿态方位一体测量系统等。其艏向角度测量误差应不大于  $0.1^{\circ}$  。

声速仪包括声速剖面仪和实时表层声速仪,对使用的多波束测深系统加装表层声速仪。声速测量的误差不大于 1m/s:

定位仪采用差分全球导航卫星系统(DGNSS)。

系统控制、数据采集与处理计算机,应根据多波束测深系统的技术要求配置,并根据测量项目的需求配置数据存储设备、打印机和绘图仪等。

## 第二章 系统指标

### 2.1 主要功能指标

数据采集软件应具有以下主要功能:

- (1) 实时采集导航、姿态、艏向、水深等原始数据及相关信息;
- (2) 实时监控导航、水深、姿态、艏向、表层声速、数据存储等设备的工作状态;
- (3) 实时显示测幅水深剖面图、测幅覆盖图、航迹图、水深、定位、姿态和艏向数据更新等系统数据质量控制信息。

数据处理软件应具有以下主要功能:

- (1) 系统校准参数、换能器吃水、声速及水位等各项改正的处理;
- (2) 定位、姿态数据的删除和内插,生成航迹图;
- (3) 测深数据清理、数据编辑与数据质量标记,以及交叉和重复测线数据质量评价统计分析;
- (4) 生成的水深和导航等数据应以主流制图软件兼容的格式输出。

### 2.2 主要技术指标

- (1) 测量范围:指系统能够覆盖的水深范围,通常从几米到数百米不等。
- (2) 分辨率:指系统能够分辨的最小水深单位,通常以厘米或毫米为单位。
- (3) 测量精度:指系统测量结果与实际水深之间的偏差,通常在厘米级别或更高。
- (4) 声波频率:指系统所使用的声波频率范围,不同频率的声波适用于不同水深和地形条件。
- (5) 声束覆盖范围:指系统能够同时覆盖的水平和垂直角度范围,影响系统的测量效率和覆盖范围。
- (6) 数据采集速率:指系统能够以多快的速率采集和处理测量数据,通常以每秒钟或每分钟的数据量来衡量。
- (7) 系统重量和尺寸:指系统的物理尺寸和重量,影响系统的携带和部署方便性。
- (8) 能耗和续航能力:指系统的能源消耗和使用时间,对于长时间任务的执行至关重要。
- (9) 抗干扰能力:指系统在复杂海洋环境中抵抗外部干扰的能力,如水流、海浪等。
- (10) 数据处理能力:指系统能够进行实时数据处理和分析的能力,包括数据校正、滤波处理、地形重建等。
- (11) 通信距离和稳定性:指系统与控制中心或操作人员之间的通信距离和稳定性,影响系统的远程控制和监测能力。
- (12) 环境适应性:指系统在不同水域和气象条件下的适应能力,包括温度、湿度、盐度等环境因素

$$y(p) = \sum_{k=1}^K w_k \cdot x(p + p_k + \Delta p_k) \cdot \Delta m_k \quad (1)$$

## 2.3 硬件组成

多波束测深仪;GNSS 定位系统;表面声速仪;声速剖面仪;姿态仪;罗经;潮位仪;显控软件(声呐工作控制软件);导航采集软件(记录声呐和辅助传感器数据);后处理软件。

## 2.4 软件组成

数据采集软件，数据处理软件。

## 第三章 系统组成

### 3.1 硬件框图



图 3.1 硬件设备示意图

### 3.2 系统软件组成

- (1) 实测量控制软件:用于控制多波束测深系统的操作,包括声波发射和接收、数据采集、测量参数设置等。这个软件通常运行在系统的控制单元上,负责与硬件设备进行通信和协调。
- (2) 数据处理与分析软件:用于对采集到的测量数据进行处理和分析,包括数据校正、滤波处理、地形重建、水文参数计算等。这个软件通常具有图形化用户界面,方便用户查看和分析处理后的数据。
- (3) 航行路径规划软件:用于规划无人船的航行路径,确保系统能够覆盖指定的测量区域。这个软件通常与多波束测深系统集成,能够实现航行路径的自动生成或手动编辑。
- (4) 远程监控与管理软件:用于远程监控系统的运行状态和测量进度,以及远程控制系



统的操作和参数设置。这个软件通常运行在控制中心或操作人员的计算机上，通过网络连接与多波束测深系统进行通信。

- (5) 地图绘制与数据展示软件:用于将测量数据与地图数据进行叠加和展示，生成海底地形图或水文参数分布图等。这个软件通常具有图形化界面，能够直观地展示测量结果。
- (6) 数据库管理软件:用于管理和存储大量的测量数据，包括数据的存储、检索、备份等功能。这个软件通常与数据处理软件集成，能够实现数据的自动化管理和归档。

### 3.3 系统接口

声呐收集声波信息后将数据传输进数据采集模块，数据采集模块根据实际情况进行数据缓冲和数据模式转换，之后采用 SPI 接口协议为 TMS320C6678 提供测深数据。

在 TMS320C6678 进行主控操作后，利用 LCD 显示屏、按键或触摸屏显示测深数据、系统状态等信息，用于操控系统运行参数。

此外，如果要与地面站或其他无人船通信，因为 TMS320C6678 通常具有以太网接口，可以通过网络连接到个人电脑或计算机。这种连接方式可以用于远程数据传输、远程控制和远程调试。

许多 ADC 芯片支持串行接口通信，如 SPI（串行外围接口）、UART（通用异步收发传输）等。TMS320C6678 可以通过其片上的串行接口模块（如 SPI 模块）与这些 ADC 芯片进行通信，以接收转换后的数字信号数据。

### 3.4 人机界面方案

把 GPS 和惯性导航系统（IMU）分别放到 TMS320C6678 对应的接口上，通过 ADC 芯片将连续信号转换为数字信号，先放到 DSP 缓冲区，经过算法计算将结果通过串口返回到电脑端，最终在电脑屏幕上观察到水深以及所对应的位置。

## 第四章 器件选择

### 4.1 DSP 芯片

无人测量船用于获取航道、水声和水下地貌等数据信息，它搭载多波束测深系统，处理大量的实时声纳信号；它还需对电机等机械组件进行控制，依据设定好的航线自主完成测量作业；同时还需要有即时通信的功能，通过网络连接岸端控制系统，实现通信控制、状态监控、数据上传等任务。而 DSP 芯片是实现这些功能的核心所在，根据本系统信号处理、控制以及通信任务的需求，出于运算速度、运算资源以及相关硬件资源等角度考虑，本设计选取了 TI 公司的 TMS320C6678 芯片为核心，图 4.1 是该芯片结构的示意图。它是一种基于 C66x 核的多核处理器，C66x 的基本结构和 C64 相同，但内核的原始计算能力提升了 4 倍，拥有 8 个可并行计算的处理器，有很强的运算能力，可以很好满足系统的需求，下面将从不同角度详细介绍该芯片。

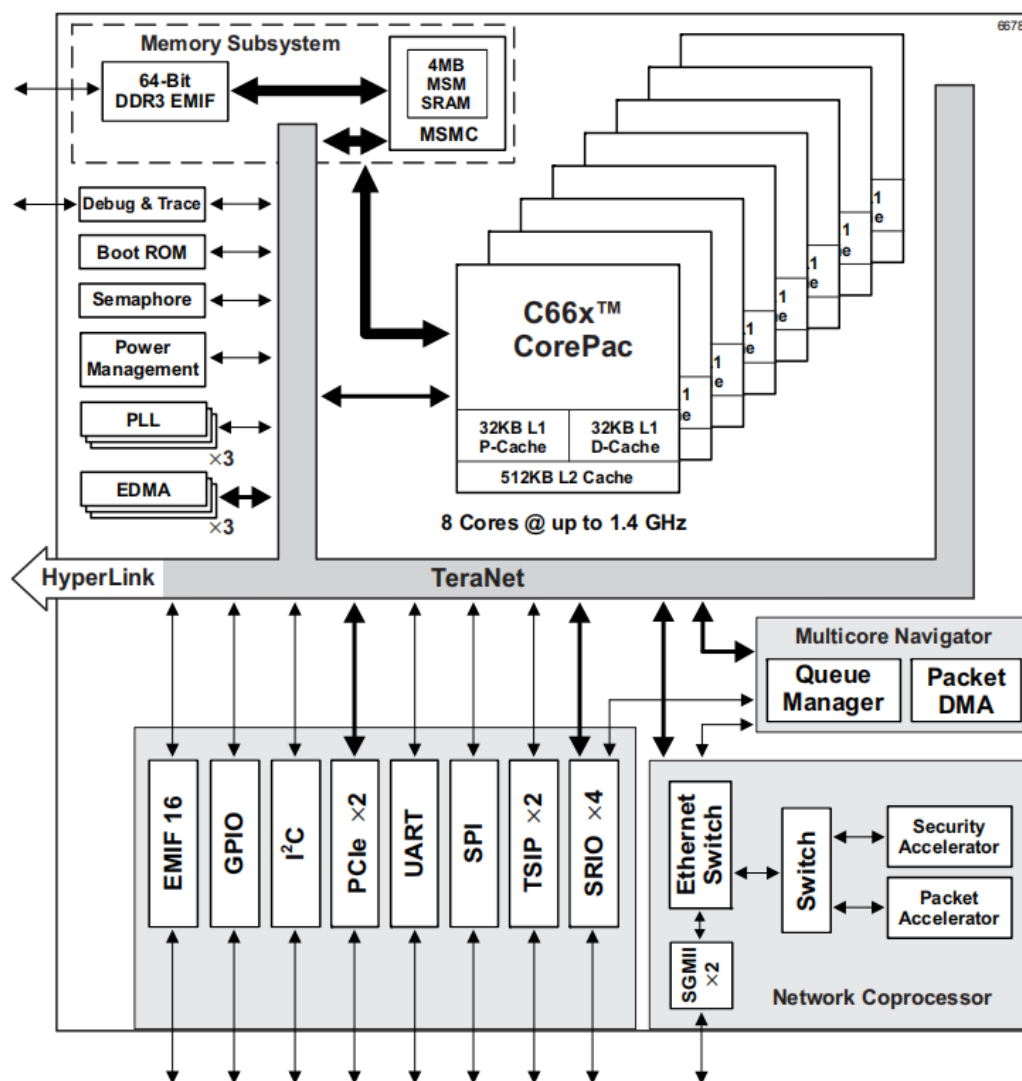


图 4.1 TMS320C6678 结构示意图

### 4.1.1 运算速度、精度以及功耗

TMS320C6678 采用了 40nm 的制造工艺，在片上集成了 8 个主频最高可达 1.4GHz 的内核，单核浮点运算能力为 22.4 GFLOPS，而定点运算能力则可达 44.8 GMACS，而其多核运算在理论上可达到 358.4GMAC 或 179.2GFLOP 的处理能力。在保证极强的运算能力的同时，功耗也较低，在最高频率操作下，芯片的最大功耗在 10W 左右。文献[1]在 75℃，主频 1.0GHz 的条件下对该芯片的功耗与供电进行了测试，如下图所示：

序号	电源名称	电压值(V)	电流 (A)	功率 (W)
1	CVDD	0.96	7.63	7.33
2	CVDD1,VDDT1-3	1.0	1.96	1.96
3	DVDD18,AVDD1-2	1.8	0.25	0.45
4	DVDD15,VDDR1-4	1.5	0.5	0.75
5	VREFSSTL	0.75	0.3	0.225

图 4.2 单片 DSP 的供电需求

在应用时，多核并行是提升处理速度的重要方法，TMS320C6678 基于 TI 的 keystone 多核架构，方便实现多核间的相互协调与工作。该架构为核间的信息传递提供了三种方法：共享内存空间、信号量和 IPC 中断<sup>[2]</sup>。文献[1]中也对 TMS320C6678 做 FFT 运算能力进行了评估和分析，其中不同核心条件下做 FFT 所需要的时间如图 4.3 所示：

FFT Size	TMS320C6678 1GHz,DDR-1333MHz 做 FFT 需要的时间 (ms)			
	1 CORE	2 CORES	4 CORES	8 CORES
32K	0.915	0.478	0.278	0.198
64K	1.857	0.922	0.508	0.315
128K	4.100	2.004	1.060	0.641
256K	8.795	4.323	2.228	1.186

图 4.3 TMS320C6678 做 FFT 所需要的时间

### 4.1.2 硬件资源

TMS320C6678 内部集成了丰富的片上存储器资源，其中每个 C66x 内核都拥有 32KBytes 的 L1 程序缓存、512KBytes 的 L2 缓存和 32KBytes 的 L1 数据缓存，另外包含 4MB 的多核共享存储器。同时，它还支持 64bit 宽度的 DDR3 存储器接口以实现扩展拓展资源。

TMS320C6678 还具有 EMIF16、SPI、I2C、UART 等的拓展接口，极大方便了与外设的通信和连接。同时还具有丰富的高速外设接口，支持 1×、2×、4×模式的 SRIO 接口，

2×模式的 PCIe 接口，芯片之间通过 HyperLink 接口互联，支持千兆以太网 GbE 等接口，具备大带宽数据传输能力。

TMS320C6678 集成 3 个 EDMA 控制器，EDMA 可以高效地在内存、外设和处理器之间传输数据，而无需 CPU 的直接介入，极大提高数据处理的速度和系统的响应能力。

### 4.1.3 开发工具

TI 公司为 DSP 芯片的开发提供了一系列全面的硬件和软件开发工具，可以极大提升效率，简化开发流程。Code Composer Studio(CCS)是 TI 所提供的一个集成开发环境(IDE)，它结合了编译器、调试器和模拟器，提供了一个用于代码开发、调试和优化的完整环境。为开发 TI 的相关处理器提供极大的便利。除此以外，Multiple Core Software Development Kit(MCSDK) 是 TI 公司提供的多核软件开发包，主要包括实时操作系统 SYS/BIOS、芯片支持开发包、处理器核间通信 IPC 开发包、网络协议栈等组件。如 IPC 开发包的应用可以方便完成核间的通信以实现高速的并行计算，图 4.4 为 IPC 开发包所提供的 Message Q 核间通信方式的示意图<sup>[3]</sup>。



图 4.4 Message Q 核间通信

### 4.1.3 价格以及技术支持等

TMS320C6678 是一款较为成熟的芯片，它已被广泛的应用于各行各业，如通信基站、医疗成像、高性能计算等，这些应用证明了其高性能、高可靠性和稳定性，同时 TI 提供了多种技术支持，丰富的技术文档，包括了数据手册、用户指南、应用报告等方面，也可在其在线社区论坛 E2E 上寻找相应的技术帮助。同时它的供货较为稳定，在官网上可以查到相关的价格与库存，如图 4.5 所示。

订购和质量					
器件型号 ↓↑	购买	Ti.com 库存 ↓↑	数量   价格 (USD) ↓↑	包装数量   包装 ↓↑	封装   引脚 ↓↑
				选择 ▼	选择 ▼
TMS320C6678ACYP ✓ 正在供货	<input type="text" value="请输入数量"/> 添加到购物车	2,141	1ku   US\$185.613 ▼	44   JEDEC TRAY (5+1)	FCBGA (CYP)   841
TMS320C6678ACYP25 ✓ 正在供货	<input type="text" value="请输入数量"/> 添加到购物车	572	1ku   US\$232.016 ▼	44   JEDEC TRAY (5+1)	FCBGA (CYP)   841
TMS320C6678ACYP4 ✓ 正在供货	<input type="text" value="请输入数量"/> 添加到购物车	34	1ku   US\$371.226 ▼	44   JEDEC TRAY (5+1)	FCBGA (CYP)   841
TMS320C6678ACYP4 ✓ 正在供货	<input type="text" value="请输入数量"/> 添加到购物车	112	1ku   US\$232.016 ▼	44   JEDEC TRAY (5+1)	FCBGA (CYP)   841

图 4.5 TMS320C6678 的供货与价格

## 4.2 其他主要模块选择

### 4.2.1 ADC 与 DAC 芯片

在无人测量船进行测量的过程中，芯片需要通过 DAC 驱动发射换能器，并通过 ADC 采集接收换能器的模拟信号，为满足系统要求，本设计选择了 AD7606 与 AD5547 作为发射机与接收机电路的核心芯片。

AD7606 是由 ADI 公司生产的高精度模数转换器(ADC)，16 位精度，8 个独立模拟输入通道，支持多通道同时高速采样，最高采样速率可达 200kSPS，它支持 SPI 接口，图 4.6 是 AD7606 的原理图。而 AD5547 同样由 ADI 公司生产，是一款 16 位精度，双通道数模转换器(DAC)，支持串行数字接口，便于和 DSP 系统进行连接。

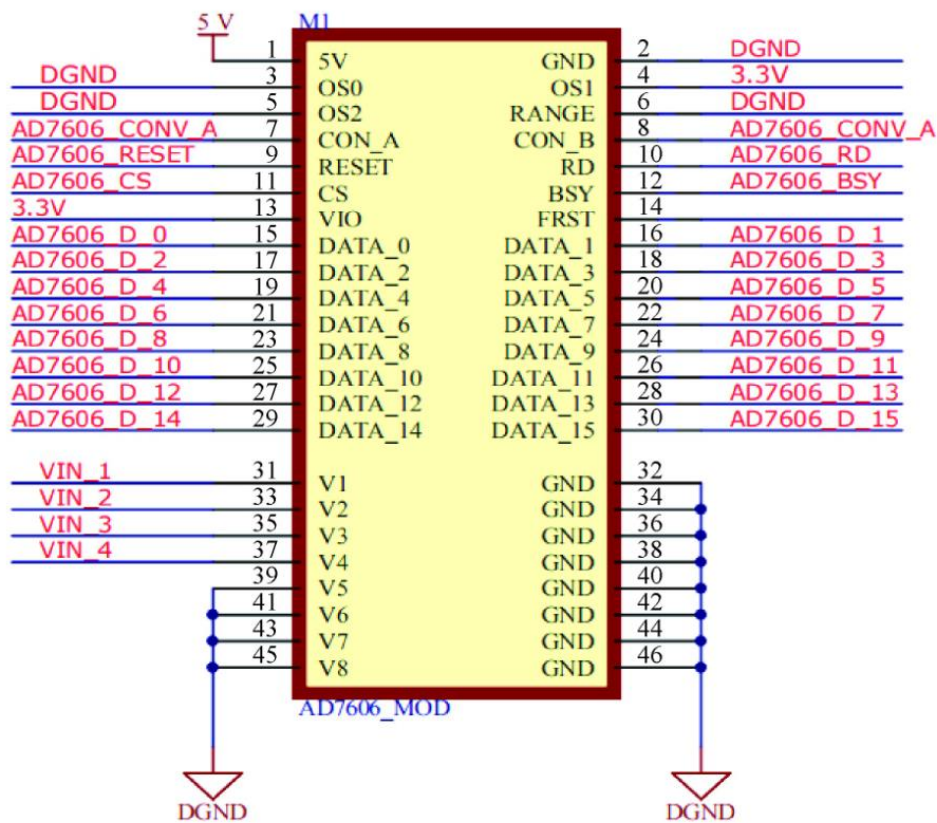


图 4.6 AD7606 原理图

#### 4.2.2 存储器芯片

在无人测量船系统工作过程中，需要对信号处理中产生的数据进行缓存，DSP 本身的运行程序也要在上电时进行加载，为满足系统的需求，DSP 芯片外围应包含 DDR3 存储芯片与 SPI FLASH 存储芯片。

DDR3 芯片选用镁光公司的 MT41K256M16 型号 DDR3 芯片，单片位宽为 16bit，电压兼容 1.35V、1.5V。而 C6678 芯片支持 64bit，电压标准为 1.5V，地址空间 2048M，可将 4 片相应的芯片拼接而成，最终 DDR3 存储器与 DSP 的连接如图 4.7 所示。而闪存芯片可选择英飞凌的 S25FL128S 芯片，它可以提供 16M Byte 的存储空间，接口支持标准 SPI、双 SPI 和四 SPI 操作模式，同时还有低功耗模式，具有可靠性和耐用性，可以满足需求。

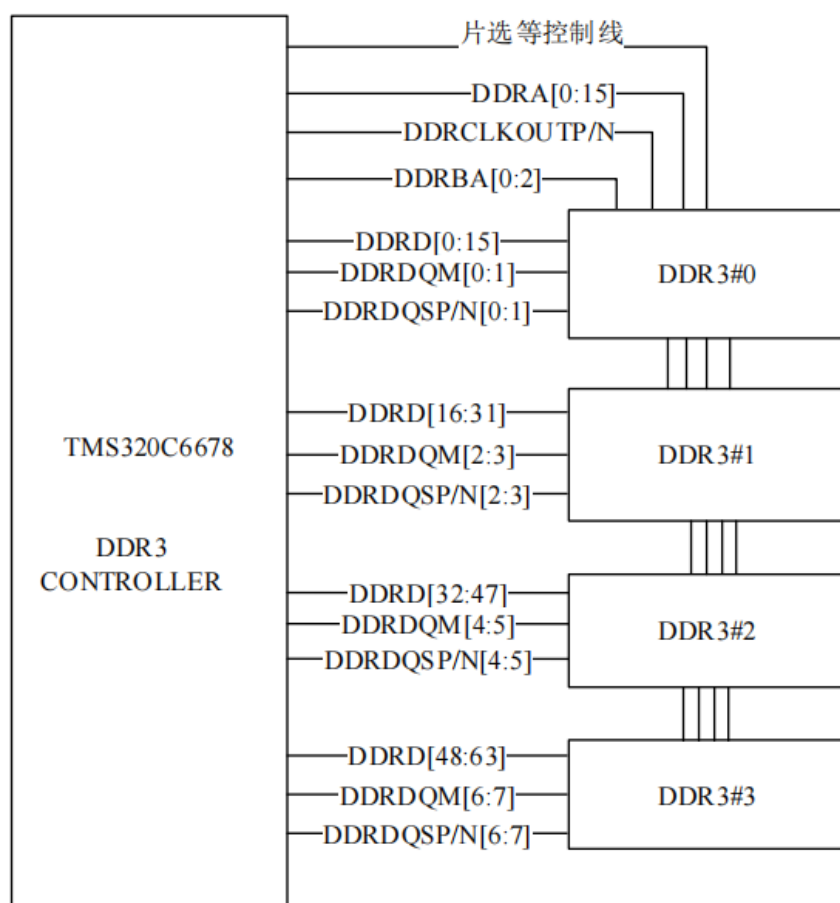


图 4.7 DDR3 存储器与 DSP 芯片连接图

### 4.2.3 电源系统

无人船控制系统的供电选用了 6S 锂电池，其具有放电能力强、输出电压稳定、使用寿命长等优点<sup>[4]</sup>，能够为无人船系统提供稳定的电力来源。为更好满足系统电力需求，还选取了 ALLPOWERS 的 AP-SP-027-BLA-NEW PET 层压多晶硅太阳能板，其 DC 电压为 18V，功率 100W，实物图如图 4.8 所示。



图 4.8 太阳能板实物图



为了监视保护电池组，本设计选择的电源管理系统(BMS)模块为恩智浦公司的 RDDRONE-BMS772 模块，它能够进行精确的电池充电库计数和电池温度测量，通过 CAN 总线与无人船主控模块通信，充电时有源电池平衡、漏电流低的深度睡眠模式等特性。

6S 锂电池的电压变换范围较大，其电压范围变换较大，不能直接给 DSP 等控制模块供电，还需辅助电源模块。本设计的控制系统中特别是 DSP 芯片功耗要求较大，且有 1V、1.8V 等不同的供电电压需求，而其余芯片也有 3.3V 等电压的供电需求，綜上要求，本设计选择了美信半导体公司的 MAX8686，是一款高性能、同步整流型降压转换器，内置高效能 MOSFET，减少了外部组件的需求。它的工作电压范围为 4.5V 至 20V，可产生 0.7V 至 5.5V 可调输出电压，且可提供高达 25A 的电流，图 4.9 是 MAX8686 的典型应用电路图。

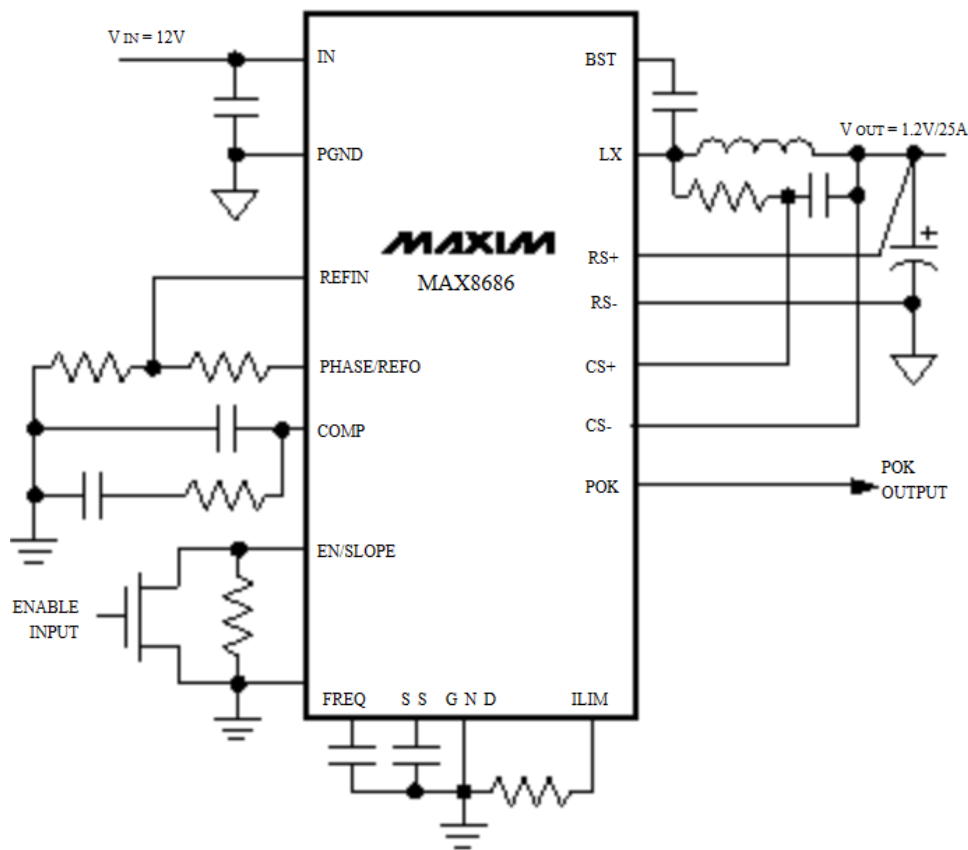


图 4.9 MAX8686 典型电路图

#### 4.2.4 通信模块

在无人测量船自主航行中，需要不断感知周围的环境，获取经纬度数据，本设计的定位系统基于 Tau\_1308 模块，是一款基于 HD9301 GNSS 芯片开发而成的多系统 RTK(Real-time kinematic)模块，由华大北斗公司生产，可实现厘米级定位。它支持了包括北斗卫星导航系统、全球定位系统在内的所有导航卫星民用系统，遵循协议 NMEA-0183，当搜索到信号时，即可进行数据输出<sup>[5]</sup>，其模块的示意图如图 4.10 所示。





图 4.10 TAU1308 模块

为了实现在远程平台对无人船的监控，还需设计相关的 LTE 通信电路，本系统选择了 SIM7600CE 模组，如图 4.11 所示，它是 SIMCom 公司提供的一款多频段 LTE-FDD 模块。该模组输入电压的范围为 3.4V~4.2V，峰值电流为 2.5A，具备高速 USB2.0 和 UART 等接口，易于集成到各种系统中。该模组内置多种协议栈如 TCP、HTTP 等，支持 PPP 和 PAP 等网络协议，其速度可达上行 50Mbps 和 150Mbps 下行，适合需要高速数据传输的应用。插入必须的 SIM 卡后便可成功组网，实现远程通信。



图 4.11 SIM7600CE 模块实物图

#### 4.2.5 航行系统

对于无人船系统而言，需要对其加减速、左右转向或旋转等动作进行控制，以实现正常航行功能，而执行的终点便在于水下推进器模块。本设计的无人船推进装置采用螺旋桨式推进装置，具有构造简单、重量轻、效率高等优势，非常适用于小型无人船<sup>[6]</sup>，其主要包括了四组推进器，其中控制最重要的部分是无刷电机与无刷电调。本设计所选用的电机为

TSUKASA 的 TG-609C-BM-5-HA 电机，如图 4.12 所示。它是 24V 无刷电机，额定转速可达 3270r/min，额定电流为 1475mA，扭矩约为 78Nm，而电调是好盈电调的 OuicRun WP8BL150，具有出色的防水性能。



图 4.12 电机实物图

在航行过程中，除了利用 GNSS 信号进行导航，还需要惯性传感器为无人船控制系统的稳定性、准确性航行提供了必要数据。IMU 惯性测量单元是控制环节不可缺少的一环，本系统采用 ICM-42688-P 芯片作为惯性传感器单元，该芯片是集成了三轴陀螺仪与三轴加速度计的六轴 IMU 传感器。它的允许输入电压范围为 1.71V-3.6V，支持 IIC 通信方式，其典型应用电路如图 4.13 所示

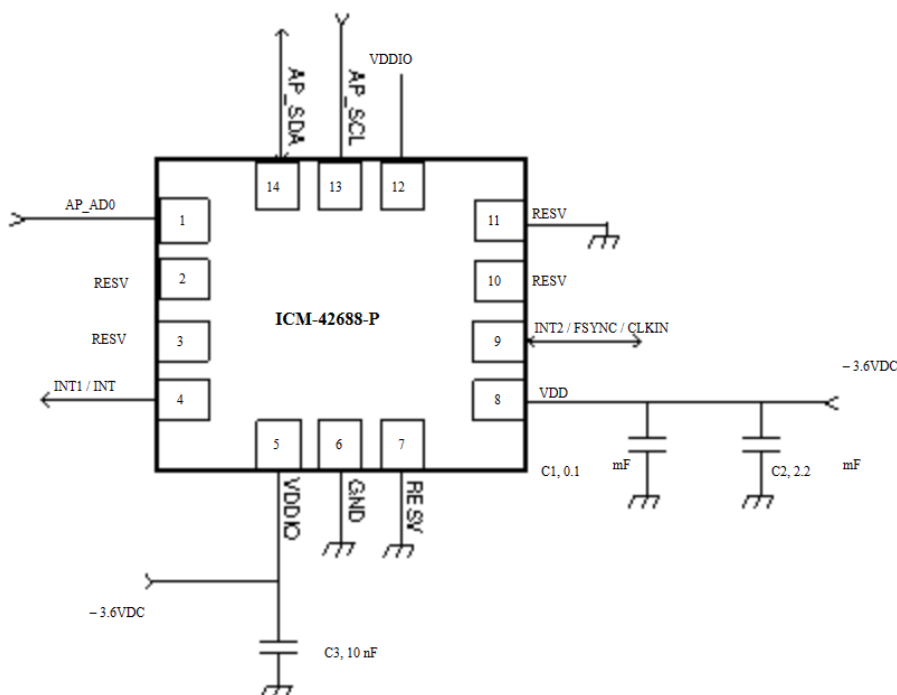


图 4.13 ICM-42688-p 典型应用电路

#### 4.2.6 换能器设备

本系统的多波束测深系统以换能器设备为核心，本系统中选择 DYW-33 水声换能器，其实物图如图 4.14 所示。它的工作频率为 33KHz，半功率角为  $38^{\circ}$ ，在淡水中耐压 100m，量程在 3~500m，可以用于水下测距仪等设计中。



图 4.14 DYW-33 换能器实物图

## 第五章 软件设计方案

### 5.1 软件功能定义

无人测量船应具备自主行驶并感知周围环境信息的功能。因此应该包括导航控制、多波束探测、通信三个方面功能。通信功能涵盖了传感器模块间的通信、远程监管软件的控制指令传输、路点任务下达以及远程更新等功能。导航控制部分，负责航行任务下发至推进器输出动力的主要流程设计。多波束探测部分利用声纳传感器采集水下环境数据，通过多波束探测算法生成水下地形图或目标图像。

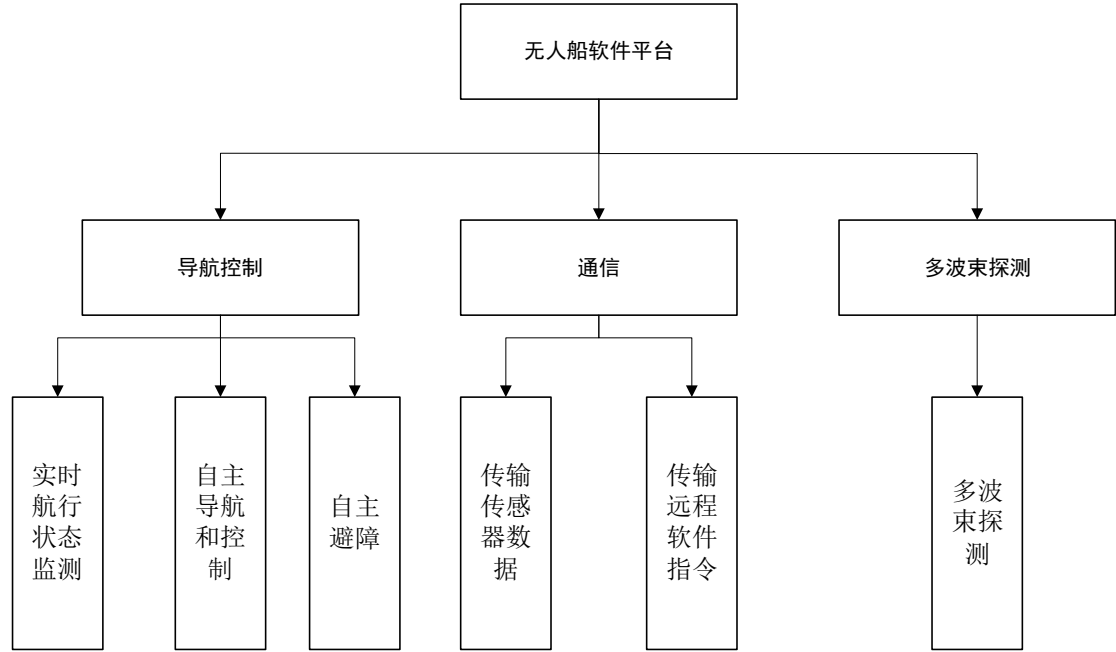


图 5.1 软件功能图

#### 5.1.1 导航控制

导航控制功能是无人测量船系统中至关重要的一部分，它负责确保船舶能够按照预定的航线安全地航行，并根据任务要求自主地进行航向和速度的调整。具体功能要求如下：

1. 实时航行状态监测：航行状态包括位置检测、航速测量、方向测量。利用全球导航卫星系统（GNSS）获取船舶在水平面上的经纬度坐标，并根据获取到的定位坐标计算航速。利用惯性导航系统（IMU）可以提供船舶的姿态信息，包括航速、航向、俯仰和横滚角度等信息。

2. 自主导航和船舶控制：包含自主导航，航向、航速控制。自主导航指无人船可以利用船舶位置和方向信息，结合预设的导航目标或路线规划，实现船舶的自主导航。自主导航通过内置的导航算法，如 PID 控制器、模糊控制器或者模型预测控制器等，对船舶进行航迹控制。

船舶航向控制则是根据导航算法生成的控制指令，通过控制舵机转角，自主调整船舶

的航向角度，使其朝向预定的导航目标或沿着规划的航线航行。船舶的速度可以通过调节推进器的推进力来实现。

3.自主避障：无人船的自主避障功能是确保船只能够在航行过程中避开障碍物或危险区域，保证航行的安全性和稳定性。系统通过激光雷达实时感知和识别周围环境，包括障碍物、其他船只等。并能够准确检测和跟踪周围的障碍物构建环境模型，根据环境模型进行路径规划，选择安全、有效的航行路径，避开障碍物和危险区域。

### 5.1.2 多波束探测

为了测得井深，本系统通过生成多个波束来进行探测，考虑到计算的简便性，以均匀线阵为例。如图 5-1 所示，共有  $M$  个阵元，对  $M$  个阵元加权求和即可得到最后形成的波束，其中  $W_1, W_2, \dots, W_M$  为权值，用来增强某个方向的信号，从而形成需要的波束。

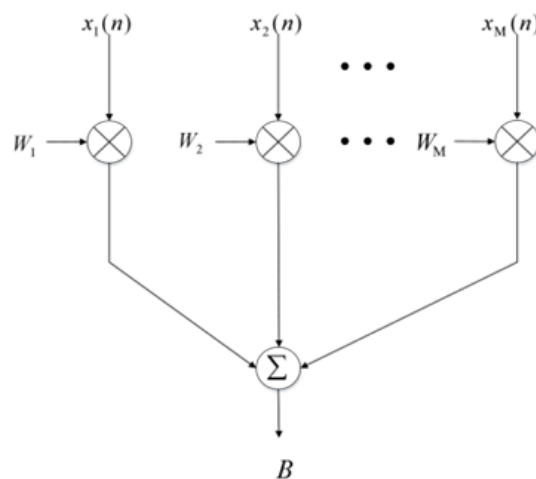


图 5.2 波束形成

### 5.1.3 通信

通信功能在无人船系统中扮演着至关重要的角色，它不仅限于传感器模块之间的通信，而且涵盖了一系列关键的功能。

1.传输各传感器模块获取的数据。这些传感器数据包括无人船行驶探测过程中的环境信息、位置数据、目标检测结果等。利用实时的通信保证系统能够实时了解周围环境并做出相应决策。

2.远程监管软件的控制指令传输任务，远程监管软件通过向无人船发送指令来实现对其行为的控制和调整，例如改变航向、调整速度等。此外，通信功能还负责路点任务的下达，即将预先规划好的航行路线信息传输给无人船，以指导其在水域中执行任务。

## 5.2 软件模块划分

软件模块主要包含：导航及控制模块、通信模块和多波束探测模块。

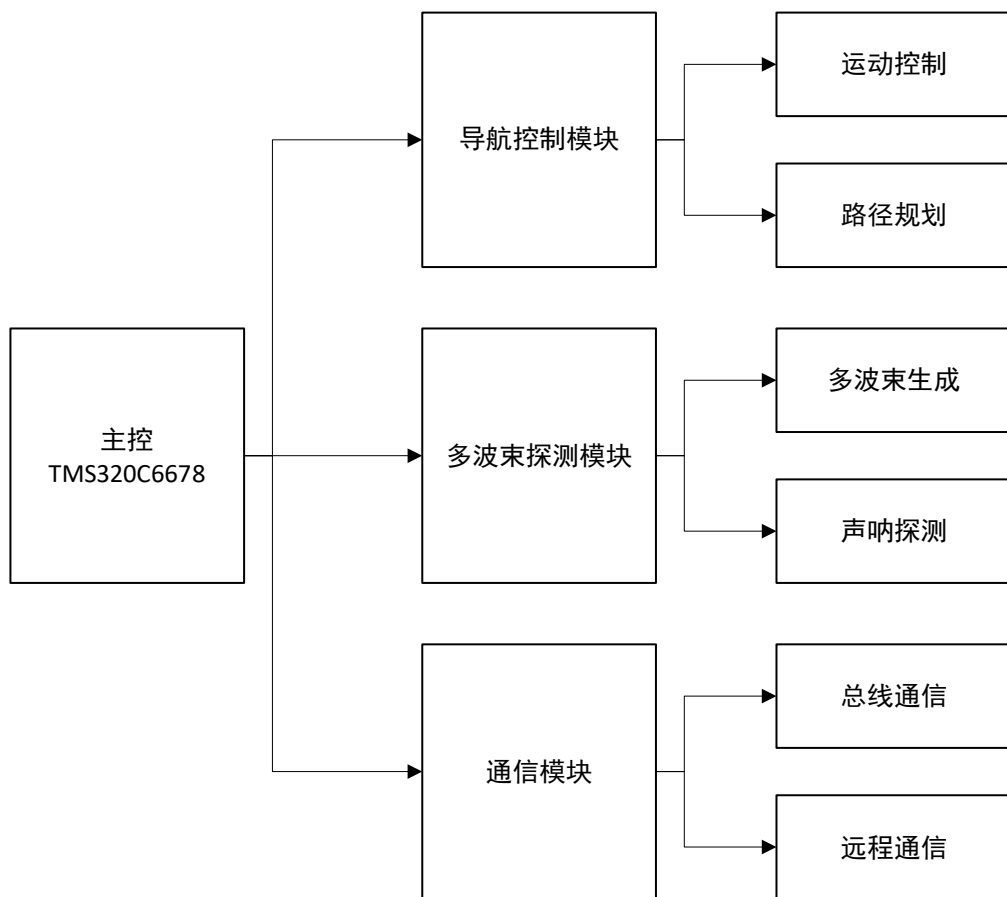


图 5.3 软件模块图

## 5.3 软件系统结构

### 5.3.1 导航规划

A\*算法是一种常用的启发式搜索算法，用于解决图或网络中的最短路径问题。在无人船的自主导航中，可以使用 A 算法来规划船只的航行路径，以实现安全、高效地避障和到达目标地点。具体而言，首先，将目标水域划分为网格，并将网格节点视为 A\*算法中的节点。然后根据节点之间的连接关系建立图。接下来，计算启发式函数估计的代价，并根据 A 算法搜索最佳路径。最后，对搜索到的路径进行优化和调整，得到无人船应该遵循的航行路径。故无人船航行的路径点是由一个个目标点所组成的，故作业执行过程就是目标点到达与更新的过程；当返航时将目标点更新至人为设置的特殊点；需要悬停时则将目标点设为当前坐标。

### 5.3.2 航行控制

通信功能在无人船系统中扮演着至关重要的角色，它不仅限于传感器模块之间的通信，而且涵盖了一系列关键的功能。

无人船行驶时任务可以分解为距离控制与航向控制。首先，位置控制器根据目标位置和当前位置计算距离误差，并据此确定速度目标值，然后将其传递给速度控制器。速度控制器获取当前自身速度信息，并将其与速度目标值进行比较，以计算速度误差。接着，姿态角控制器获取航向目标值和从 IMU 得到的自身的 YAW 角信息，并通过模糊 PID 控制器处理姿态角误差，得出两轮电机的转速差，以调整船只的姿态。其速度目标值的计算过程所示：

$$V_{ref} = K_{p1} \cdot Sat(x_{ref} - x) + K_{d1} \cdot \frac{d(Sat(x_{ref} - x))}{dt}$$

式中， $K_{p1}$ 、 $K_{i1}$ 、 $K_{d1}$  分别为控制系数， $x$  为自身坐标， $x_{ref}$  为目标点坐标。 $Sat(x)$  为饱和函数，当误差过小时，相当于去除比例和微分控制仅使用积分控制。

模糊航向控制器由模糊控制部分和航向 PID 控制器部分组成。航向 PID 控制器类似于速度控制器，其航向目标值是由模糊控制得到的。当前航向值是通过结合 IMU 和 MAG 得到的。另一方面，速度控制器的速度目标值是由位置控制器获取的，而当前速度是通过 GPS 获得的。这两者分别计算后，混合控制信号将用于电机控制。

$$U = K_{p1} \cdot (x_{ref} - x) + K_{i1} \cdot \left( \int x_{ref} - x \right) + K_{d1} \cdot \frac{d(Sat(x_{ref} - x))}{dt}$$

式中， $U$  为电机控制量， $x$  为无人船自身当前速度或航向， $x_{ref}$  为目标速度值。

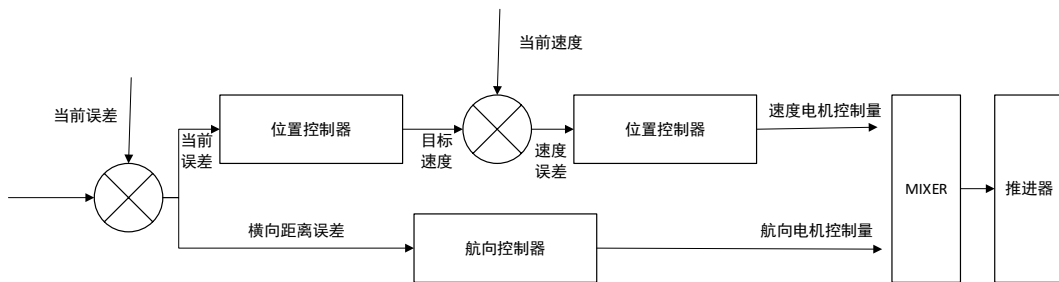


图 5.4 PID 控制图

### 5.3.3 通信结构设计

无人船的控制系统通信链路采用了多种通信方式，主要包括 CAN 通信、USART 通信、SPI 通信和 IIC 通信。这些通信方式使得各个模块能够高效地传递信息，从而实现系统各项功能。具体而言，惯性测量单元和地磁模块通过 IIC 通信与 DSP 通信，用于获取无人船的航向信息。GNSS 模块通过串口与 DSP 通信，用于更新无人船的姿态、位置等运行状态信息。闪存芯片通过 SPI 与 DSP 通信，负责记录关键数据，如路点任务、编号和版本号。

BMS 通过 CAN1 与 DSP 通信，负责监控电池储能单元内各电池运行状态，保障储能单元安全可靠运行。4G 模组和蓝牙模块通过串口与 DSP 通信，使得无人船能够实现远程监管和操控。这些通信方式的有效组合保证了无人船控制系统的正常运行和远程控制。

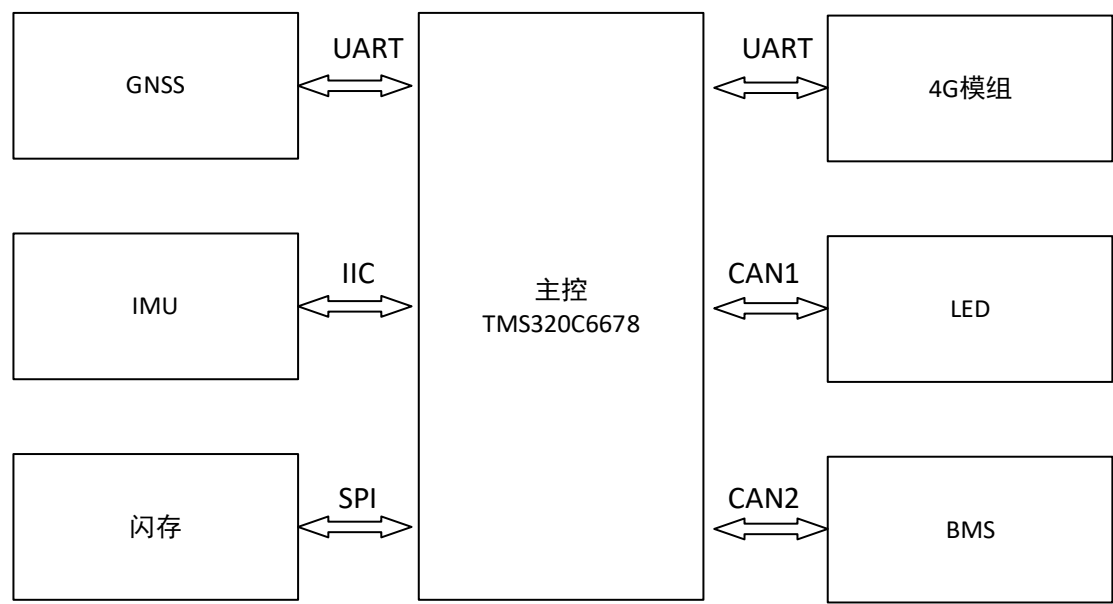


图 5.5 通信结构图

5.3.4 多波束探测

多波束形成计算量较大，为了节省计算时间成本，这就需要我们使用并行计算。而 TMS320C6678 的多核结构恰好满足了我们这一要求。具体的并行计算模型如下图所示：将波束的数据存储在共享存储部分，首先进行串行部分程序，在串行部分程序执行完毕，进入并行部分前，首先要把共享存储器中的数据分配给各核心的本地存储器，之后，各核心进行运算，核间互连，把计算结果保存在本地存储器中。当平行段执行完毕，转至下一串行段时，资料会由本地存储器汇总至共享存储器。



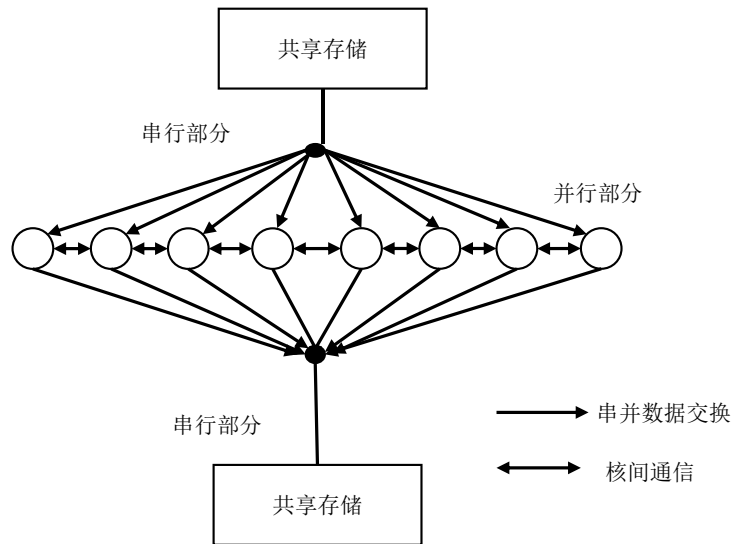


图 5.6 并行处理时效果图

将程序映射到多核处理平台上的第一步就是要首先确认出任务的并行性，选择一种较为合适的处理模型。本文中的并行处理模型采用的是 **master-slave** 主从模型。主核安排不同的线程，期间通过发送消息和接收消息的方式来管理其它核。

## 5.4 软件流程

通信无人船的工作流程主要分为三个部分，分别是硬件自检、路径设定、开始探测。

### 5.4.1 硬件自检

在打开无人船电源开关后，DSP 以及各个传感器进入启动状态，LED 红灯闪烁，系统进入自检模式，此时系统会校验各传感器的状态，并读取传感器的数值。接着对传感器数值进行校验，如果取值正常，则 LED 绿灯常亮，表明此时硬件设备已就绪。

### 5.4.2 导航规划流程

多波束形成计算量较大，为了节省计算时间成本，这就需要我们使用并行计算。而 TMS320C6678 的多核结构恰好满足了

自主航行系统通过接收 GNSS 和惯性导航数据实时确定船舶的位置和航向，并通过传感器对周围环境进行感知和识别，以实现自主航行。到达目标位置后，作业系统开始工作，通过传感器对目标进行识别和定位，并进行相应的作业操作。如果系统为非手动控制模式，无人船将使用 A\*算法自动规划路径。导航具体实现步骤如下：

1. 地图建模：将航行区域建模为图或网络，节点表示航行区域中的位置，边表示节点

之间的连接关系。每个节点包括其位置坐标和与之相邻的节点信息。节点之间的连接关系可以根据航行区域的地形特征和障碍物信息确定。

2. 启发式函数：定义启发式函数（**heuristic function**），用于估计从当前节点到目标节点的代价。启发式函数通常采用曼哈顿距离、欧几里得距离或切比雪夫距离等作为估计值，以便快速搜索到最佳路径。由于无人船存在着惯性大、时滞大的缺陷,故还应该尽量减少航向的变化，因此还应在代价函数中加上航向变化的代价。

3. 节点评估与选择：对每个候选节点进行评估，计算从起始节点到该节点的实际代价（通常为路径长度）和启发式函数估计的代价之和，即：

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

选择具有最小  $f$  值的节点作为下一步的探索对象。

4. 路径搜索：

使用优先队列或最小堆等数据结构来存储候选节点，并根据其  $f$  值进行排序。从起始节点开始，按照 A\* 算法的搜索策略，不断扩展搜索范围，直到找到目标节点或搜索完整个图。在扩展节点时，考虑节点的相邻节点，并计算它们的  $f$  值。如果目标节点在相邻节点中，则搜索结束，找到了最佳路径。

5. 路径重构：一旦找到了目标节点，可以回溯搜索路径，并从目标节点一直追溯到起始节点，得到最终的最短路径。这些节点构成了无人船应该遵循的航行路径，可以通过这些节点的坐标来指导船只的航行行为。

### 5.4.3 多核调度流程

多波束形成计算量较大，为了节省计算时间成本，这就需要我们使用并行计算。而 TMS320C6678 的多核结构恰好满足了

(1) 准备阶段

- 多个核同步
- 清理寄存器

(2) 执行任务：

- 判断核的 ID
- 如果为主核 ID，则执行 `deconv_master`
- 如果为其它核（`slave cores`），则执行 `deconv_slave`

具体处理步骤如图所示。

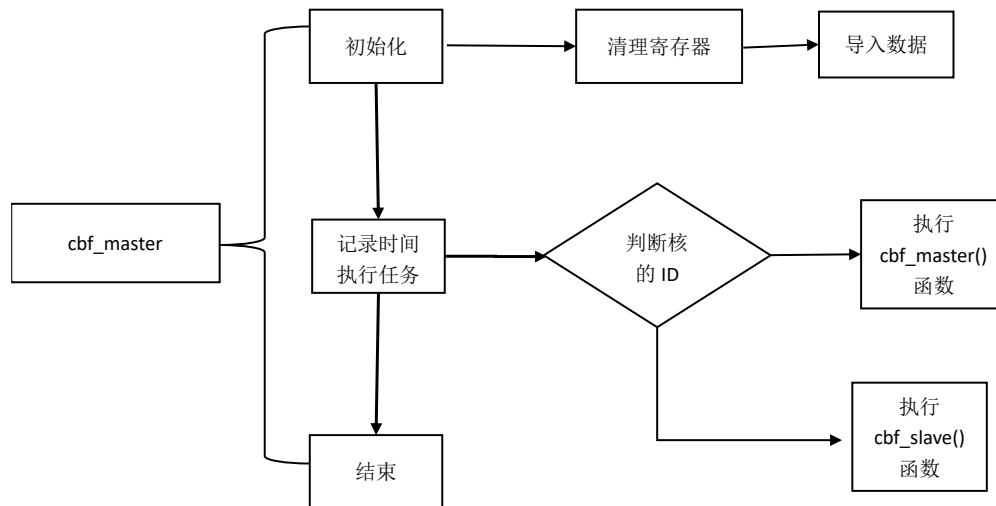


图 5.7 main 函数流程图

### 1. cbf\_master 函数:

- (1) 初始化参数:
- (2) 向 slave-cores 发送同步的消息
- (3) 等待 slave-cores 送回消息
- (4) 开始执行:
  - 开始计时
  - 向 slave cores 发出求和计算的指令
  - 开始执行加权求和计算
  - 收到 slave cores 进行完计算的指令
  - 计时结束

具体的流程图如图 5-3 所示:

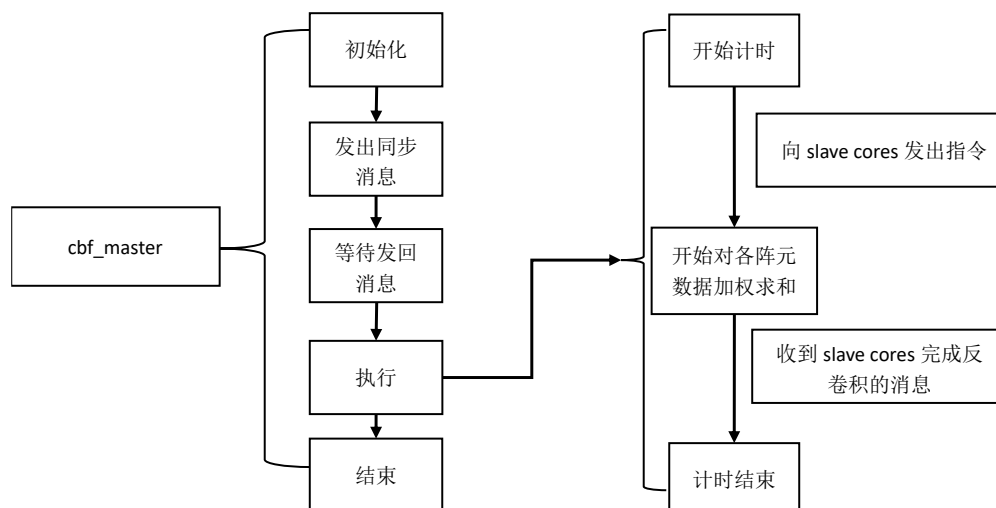


图 5.8 cbf\_master 函数流程图

## 2. cbf\_slave 函数:

初始化参数:

- 判断消息内容
- 主核传递的消息是 *CBF\_DO\_NOTHING* 时, 返回主核 idle 的消息
- 主核传递消息为 *CBF\_PROCESS* 时, 开始进行波束形成
- 主核传递消息为 *CBF\_EXIT* 时, slave cores 退出
- *cbf\_master*

具体的流程图如图 5-4 所示:

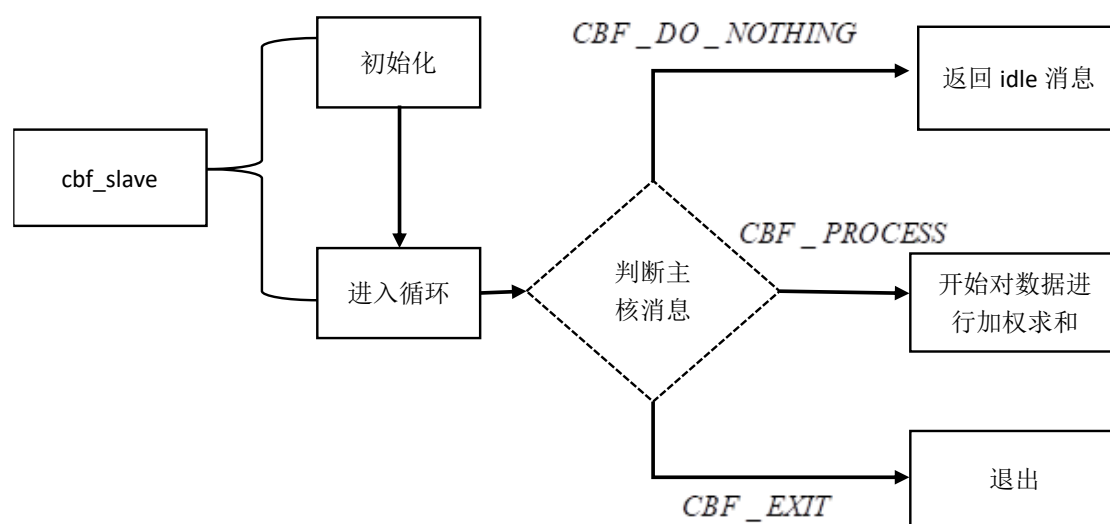


图 5.9 cbf\_slave 函数流程图

## 第六章 调试方案

系统的调试由两部分组成，分为硬件调试和软件调试。可以借助 JTAG 实时硬件仿真器和 CCS 软件进行调试。通过 JTAG 接口仿真器可以对系统进行调试首先进行硬件调试，在电路板电路连接无误，加电可正常工作的情况进行软件调试，最后对系统整体调试，以验证系统的功能是否得以实现。

### 6.1 硬件调试

#### 6.1.1 硬件静态测试

硬件静态测试的目的是：在通电之前，尽可能排除电路板中的短路故障，尤其是电源的短路故障。它主要包括以下测试项目：高速 DSP 编解码器试验板上各个电源端子和地之间的电阻：板上布线密集区域相邻但又不应该短路的布线之间的电阻等。若上述阻值很小，就有可能发生了短路，需要仔细查找原因并排除，才能进行下一步的调试工作。

DSP 系统的硬件调试是一个非常繁琐的过程。在调试任何一个硬件系统时，首要问题是确认系统电源、地和复位信号正确。

电路板焊接完成后很有可能存在短路和虚焊的情况。如果此时直接通电很有可能造成芯片的烧毁。因此必须用万用表仔细检察每一个芯片和元件管脚连接是否正常。在确认电路板元器件焊接无误后，才能到检查系统电源的步骤。系统电源的常见错误通常包括输出电压过大或太小，需要仔细核对各种元器件性能，尤其是反馈电阻值是否正确。

#### 6.1.2 上电测试

排除了短路问题之后，可以对试验板进行加电调试。输入端加上 +5V，判断各输出端是否正常。同时应注意系统中有无器件过热情况，如果有的话，可能是相应的器件损坏或电路中有短路，需要处理后再加电。

本系统的内核电压 1.4V，接口电压 3.3V，接入 5V 线性电源后，采用示波器观察电源转换芯片的输出信号，实际测量值与标准值接近并且电路板的电源指示灯亮起，表明系统电源一切正常。

#### 6.1.3 PC 与 DSP 之间的 JTAG 接口通讯测试

PC 通过 DSP 硬件仿真器 JTAG 接口，实现与高速 DSP 编解码器试验板的通讯。如果 CCS 的设置和目标板自身没有故障，则应实现该通讯；否则应对二者进行检查，以排除故障。

结合仿真器和仿真软件可以访问内部所有存储器资源，包括片内寄存器和所有的存储器，从而提供了一个实时的硬件仿真和调试环境。CCS 代码调试器是一种针对标准的 TMS320 调试接口的 DSP 芯片集成开发环境 IDE。CCS 开发工具给开发者提供了十分方便的软件开发平台。因此，硬件系统调试的一个关

键问题就是调试 JTAG 接口能否正常进入 CCS 软件开发环境,它为系统之后的软件调试起到关键作用。首先通过下载电缆和仿真器的连接上接口,然后调试软件,检测设备工作是否正常。

#### 6.1.4 DSP 对 SDRAM、FLASH 的读写程序调试

SDRAM 是高速 DSP 器件的外部数据存储器,必须保证 DSP 器件能对其进行正确读写。读写不正常的可能原因有:(1)EMIF 全局控制寄存器以及 CE 控制寄存器的设置不正确;(2)硬件设计有问题等。

FLASH 器件是高速 DSP 系统的程序存储器,本设计中,系统目录程序代码是由 PC 经 DSP 硬件仿真器、目标板上的 DSP 器件下载到 FLASH 中的。因此实现通过高速 DSP 器件对 FLASH 存储器的读写十分关键。DSP 不能对 FLASH 正常读写,可能的原因是 EMIF 全局控制寄存器以及 CE 控制寄存器的设置不正或硬件设计有问题等。

### 6.2 软件调试

#### 6.2.1 控制系统调试

建立无人船实验模型,首先建立 XOY 平面,设当前时刻为  $t$ ,则当前时刻无人船的位置、速度、加速度分别为  $p(t)$ ,  $v(t)$ ,  $a(t)$ 。在任意时刻内均可将无人船的运动分解为沿 X 轴和 Y 轴的直线运动,则沿 X 轴和 Y 轴的位移、速度、加速度分别为  $P_x(t)$ 、 $v_x(t)$ 、 $a_x(t)$ 、 $P_y(t)$ 、 $v_y(t)$ 、 $a_y(t)$ 。设  $t-1$  时刻与  $t$  时刻的时间间隔为  $t$ ,根据运动学方程,建立在  $\delta t$  时间内无人船沿 X、Y 轴的运动模型:

$$\begin{aligned}P_x(t) &= P_x(t-1) + v_x(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}a_x(t-1)\Delta t^2 \\v_x(t) &= v_x(t-1) + a_x(t-1)\Delta t \\P_y(t) &= P_y(t-1) + v_y(t-1)\Delta t + \frac{1}{2}a_y(t-1)\Delta t^2 \\v_y(t) &= v_y(t-1) + a_y(t-1)\Delta t\end{aligned}$$

控制系统的调试主要是测试无人船循迹能力,包括静态误差、响应速度等。首先对于静态误差,在 X 轴、Y 轴上设置匀速直线的模型作为设定好直线路径,在行驶过程中施加扰动,来测试稳态误差,航行中的航线偏离能否通过自动调整航向回到规定路径中。

对于响应速度,在此基础上设计一段连续随机变化的航向角信息作为给定的期望航向角,其中包含了大范围和小范围内的航向角动态突变,测试系统响应的速度以及无超调量。

#### 6.2.2 EDMA3 模块调试

无人测量船应具备自主行驶并感知周围环境信息的功能。因此应该包括导航控制、多波束探测、通信三个方面功能。通信功能涵盖

在工程中实现 EDMA3 模块，需要进行以下操作：

- (1) 在工程中添加头文件，可以在头文件或者需要实现 EDMA3 模块的.c 文件中加入 `#include<ti/csl/csl_edma3.h>`和`#include<ti/csl/csl_edma3Aux.h>`;
- (2) 在工程中添加头文件路径，在 CCS 开发软件中找到 `properties->Build->C6000Compiler->Include Options` 中的 `Add dir to #include search path` 框，添加所需头文件的路径，编辑器在编译头文件时会从这个路径中寻找文件。
- (3) 在工程中添加函数库和寻找路径，CCS 开发软件中找到 `properties->Build->C6000 Linker->File Search Path` 中的 `Include library file or command files as input` 框和 `Add <dir>to library search path` 框，在框中分别添加小端函数库和函数库的路径。TI 提供了两种模式下的 EDMA3 函数库，其中后缀名为 `.ae66` 的为小端模式下的 EDMA3 函数库，后缀名为 `.ae66e` 的为小端模式下的 EDMA3 函数库。本工程中选择的是小端模式，所以需要添加 EDMA3 小端模式下的两个函数库：`edma3_ild_drv.ae66`、`edma3_ild_rm.ae66`。
- (4) 在工程的使用到 EDMA3 模块的文件中开辟缓存。如果想要得到二级缓存中的全局地址，可以使用 EDMA3 库函数中的函数 `signed char*getGlobalAddr(signed charaddr)`

### 6.2.3 核间通信模块调试

在核间通信过程当中，各核之间主要是利用 MessageQ 来传递消息，任务开始时，主核 core0 向其它核 core1~core7 发送消息，消息分别为：等待计算、执行计算或退出，接着其它核打开接受消息队列，接受主核发出的消息。

在调试中，点击 Build 完成工程编译并生成.out 可执行文件，之后点击 Debug 将可执行文件下载到 DSP 板卡中。在 CCS Debug 界面中，对 7 个核进行 Group cores，之后便可以开始进行 7 个核的联调。在开始调试前，在 core0~core6 的主函数 main 中跳过 [pc\_strat()] 函数设置断电，并在 core0~core6 的主程序最后一行设置断点防止程序跑飞。

## 第七章 风险分析

无人船多波束测深系统是一种集成了先进数字信号处理技术的海洋测绘设备，主要用于获取水下地形的精确数据。在设计该系统时，需要考虑多种潜在风险，并采取相应的措施以确保系统的可靠性和安全性。以下是针对无人船多波束测深系统的风险分析：

### 1、技术风险

- (1) 数据精度风险：多波束测深系统的精度可能受到多种因素的影响，如传感器质量、数据处理算法的准确性等。需要选择高质量的传感器，并开发或采用成熟的数据处理算法。
- (2) 系统集成风险：系统由多个子系统组成，如导航、通信、能源管理等，任何子系统的故障都可能影响整个系统的运行。应进行严格的集成测试，并设计冗余系统以提高可靠性。
- (3) 数据存储风险：如果系统的存储器容量设计不足，可能无法保存所有采集到的数据，尤其是在高分辨率和大量数据采集的情况下。这可能导致重要数据的丢失，影响测深结果的完整性和准确性。存储器的读写速度如果无法满足数据采集的速度要求，可能会导致数据丢失或系统延迟。特别是在多波束测深过程中，数据流通常是连续且高速的，对存储器性能要求较高。

### 2、环境风险

- (1) 天气和海况风险：恶劣的天气和海况可能影响无人船的稳定性和测量精度。需要实时监测环境条件，并根据情况调整作业计划或采取保护措施。
- (2) 水下障碍物风险：水下可能存在的障碍物可能对无人船造成物理损伤。应利用避障技术和声呐系统进行障碍物探测和规避。

### 3、安全风险

- (1) 航行安全风险：无人船在航行过程中可能与其它船只发生碰撞。需要设计有效的避障策略，并遵守相关的航行规则。
- (2) 数据安全风险：系统收集的数据可能面临黑客攻击或未经授权的访问。应采取加密和安全认证措施保护数据安全。

### 4、操作风险

- (1) 用户操作错误风险：操作人员可能由于不熟悉系统或操作失误导致系统故障。需要提供详细的操作手册和培训，确保操作人员具备必要的技能。
- (2) 维护和故障诊断风险：系统可能因维护不当或故障诊断不及时而导致性能下降。应建立定期维护计划，并提供有效的故障诊断工具和支持。



## 第八章 总结

在本设计方案中,我们提出了一种基于 TMS320C6678 DSP 的无人船多波束测深系统。

在硬件的选择上,我们选择了 TMS320C6678 芯片,为系统提供了强大的计算能力和低功耗的优势。其 40nm 制造工艺和高达 1.4GHz 的主频,使得单核浮点运算能力达到 22.4 GFLOPS,定点运算能力则可达 44.8 GMACS。多核运算理论上可达 358.4 GMAC 或 179.2 GFLOP,最大功耗仅为 10W 左右。同时 AD7606 和 AD5547 的使用保证了信号采集和发射的高精度和稳定性。外围的 DDR3 存储芯片与 SPI FLASH 存储芯片为 DSP 程序的加载和信号处理数据的缓存提供了支持。6S 锂电池和 ALLPOWERS 的太阳能板的选用则是为无人船系统提供了长期稳定的电力来源,并选用恩智浦公司的 RDDRONE-BMS772 模块,具备精确的电池充电库计数和电池温度测量功能。此外,我们还选用了基于 HD9301 GNSS 芯片开发的多系统 RTK 模块、SIMCom 公司的多频段 LTE-FDD 模块 SIM7600CE 模组、基于 ICM-42688-P 芯片并集成三轴陀螺仪与三轴加速度计的六轴 IMU 传感器、DYW-33 水声换能器等硬件设备。在硬件的设计上我们不仅考虑了系统的高性能需求,同时也兼顾了能效和成本效益,同时具备更高的性能和可靠性,将有助于提升系统的整体效率和操作的安全性,为海洋测绘作业提供强有力的技术支持。

该系统由六个主要软件组成,包括实测量控制软件、数据处理与分析软件、航行路径规划软件、远程监控与管理软件、地图绘制与数据展示软件以及数据库管理软件。这些软件共同工作,确保了系统的高效运行和数据的准确处理。进一步的,我们给出了无人测量船的导航控制、多波束探测和通信功能的详细设计。

对于导航控制,无人测量船的导航控制系统是确保安全航行的核心,包括实时航行状态监测、自主导航和船舶控制以及自主避障。我们采用采用 A\*算法进行导航规划,将目标水域划分为网格,计算最佳路径,并对路径进行优化,确保无人船能够高效避障和到达目标地点。同时我们利用 GNSS 和 IMU 系统,获取精确的位置、速度和姿态信息,通过 PID、模糊控制器、模型预测控制器进行航迹控制。自主避障功能通过激光雷达感知周围环境,实时规划安全航行路径。而对于多波束探测和通信,探测功能通过声纳传感器采集水下环境数据,利用均匀线阵和加权求和方法形成波束,增强特定方向的信号,从而生成精确的水下地形图或目标图像;通信系统则负责传输传感器数据、远程监管软件的控制指令、路点任务下达和远程更新,控制系统的通信链路包括 CAN、USART、SPI 和 IIC 通信,确保各模块间高效信息传递,而 TMS320C6678 的多核结构支持并行计算,提高多波束形成的计算效率。这些功能确保无人船能够实时响应环境变化和远程指令,执行预定任务。综合以上设计,无人测量船将具备高度自主的导航控制能力,精确的多波束探测性能和可靠的通信系统,能够在复杂水域中执行测绘任务,提高海洋测绘的效率和安全性。

同时,我们还给出了包括多核调度流程在内的较为完整的软件工作流程和系统调试方案,提高了设计方案的可行性与应用价值,而在实际的应用中,这些流程将有助于提高无人船的性能和安全性。

## 参考文献

- [1] 何刚. 基于 TMS320C6678 的 32 核 DSP 阵列处理板设计及实现[D].电子科技大学,2017.
- [2] 张钰. 基于 DSP 的被动声纳波束形成系统设计实现[D].南京理工大学,2017.
- [3] 周加谊, 李中, 杨波. 基于多核 TMS320C6678 的数据处理与存储系统设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30 (17): 19-22+27.
- [4] 王瞳. 水田除草双轮式无人船的系统设计与实现[D].南京信息工程大学,2024.DOI:10.27248/d.cnki.gnjqc.2023.000752.
- [5] 周康. 基于物联网的最优路径规划水质监测无人船系统设计[D].江苏大学,2023.DOI:10.27170/d.cnki.gjsuu.2023.000606.
- [6] 冯鹏伟. 小型全向无人船运动控制系统的设计与实现 [D]. 长沙理工大学,2024.DOI:10.26985/d.cnki.gcsjc.2022.001099.
- [7] 武岳. 基于多 DSP 的硬件平台设计与调试[D].电子科技大学,2008.
- [8] 于龙沾, 安振庄. 硬件平台设计 [J]. 电子测量技术, 2005(01):21-22.DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005.01.012.
- [9] 尹菲. 基于高速 DSP 的雷达数据处理通用平台设计[D].电子科技大学,2007.
- [10] 赵保成,徐健,徐坚,等.基于无人船的多波束系统水下地形测量应用[J].地理空间信息,2023,21(09):65-68.
- [11] 符传愉. 多波束测深系统在无人艇中的应用与研究 [D]. 海南大学,2024.DOI:10.27073/d.cnki.ghadu.2023.000261.