

# 基于Qt平台的ISAR成像系统软件设计与实现

吴佳伟<sup>1</sup>, 徐 杨<sup>2</sup>

<sup>1</sup>上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

<sup>2</sup>上海理工大学健康科学与工程学院, 上海

收稿日期: 2023年2月22日; 录用日期: 2023年4月6日; 发布日期: 2023年4月13日

## 摘 要

针对传统基于Labview的逆合成孔径雷达(ISAR)成像系统数据传输的低实时性与相对繁琐的操作流程, 设计了一种基于Qt平台的ISAR成像系统软件, 该系统使用Qt软件集成成像系统控制端。首先上位机根据伺服电机通信协议通过串口端发送电机控制指令用于生成ISAR转台实验场景, 接着利用用户数据报协议(UDP)将控制信号发送给中控板卡, 板卡根据指令控制驱动源发射雷达射频信号, 经过混频后得到中频信号, 板卡采集中频信号并通过传输控制协议(TCP)将数据传输给上位机, 最后调用距离多普勒(RD)成像算法处理数据得到ISAR图像。实验结果表明, 该系统拥有更快且稳定的数据传输性能, 成像具有强实时性, 且由于其控制端的高集成性, 系统软件架构清晰并易于操作。

## 关键词

逆合成孔径雷达, Qt, 用户数据报协议, 传输控制协议, 距离多普勒成像算法

# Design and Implementation of ISAR Imaging System Software Based on Qt Platform

Jiawei Wu<sup>1</sup>, Yang Xu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

<sup>2</sup>School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Feb. 22<sup>nd</sup>, 2023; accepted: Apr. 6<sup>th</sup>, 2023; published: Apr. 13<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In view of the low real-time data transmission and relatively tedious operation process of the traditional inverse synthetic aperture radar (ISAR) imaging system based on Labview, an ISAR imaging system software based on Qt platform is designed. The system uses Qt software to integrate

the control terminal of the imaging system. First, the upper computer sends motor control instructions through the serial port according to the servo motor communication protocol to generate the ISAR turntable experiment scene. Then, the control signal is sent to the central control board card by using the user datagram protocol (UDP). The board card controls the driving source to transmit radar RF signals according to the command controls, and gets the IF signal after the mixing of the radar transceiver module. The board collects IF signal and transmits the data to the upper computer through transmission control protocol (TCP). Finally, it calls the distance Doppler (RD) imaging algorithm to process the data and get ISAR image. The experimental results show that the system has faster and stable data transmission performance, and imaging has strong real-time. Moreover, the system software architecture is clear and easy to operate because of the high integration of the control terminal.

## Keywords

Inverse Synthetic Aperture Radar, Qt, User Datagram Protocol, Transmission Control Protocol, Range Doppler Imaging Algorithm

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

逆合成孔径雷达(ISAR)具有全天时、全天候、远作用距离与高分辨成像等优势,在空间目标观测与识别领域发挥着日益重要的作用[1][2]。与光学成像相比,该不可比拟的独特优势使其在防空反导、空间碎片成像、民航管制等军事和民用领域发挥越来越重要的作用[3]。

目前,对于 ISAR 成像系统使用的实验平台,一般采用 Labview 作为主控[4],矢量网络分析仪采集数据并通过网口传输保存,数据分析使用 Matlab 软件。这种方式的优点是搭建平台思路比较清晰,实现相对容易。但其缺点也很明显,网口传输数据较慢,无法实现实时性处理,用 Labview 实现数据分析和成像算法实现相对困难且操作繁琐。因此针对 ISAR 成像系统的构建实际需要考虑高速数据传输、数据处理实时性并且确保所有操作通过同一平台控制实现。本文利用 Qt 为平台,搭建统一的图形用户界面(GUI)控制端,将伺服电机控制,发射信号配置以及数据传输处理到算法实现最终成像集成于一个系统软件。结合实际工程表明,ISAR 转台成像系统关键指标距离向方位向分辨率符合理论预期,且相较于传统成像系统操作便捷,架构清晰,算法易于实现,能够即时成像,满足了实际场景下的 ISAR 二维成像需求。

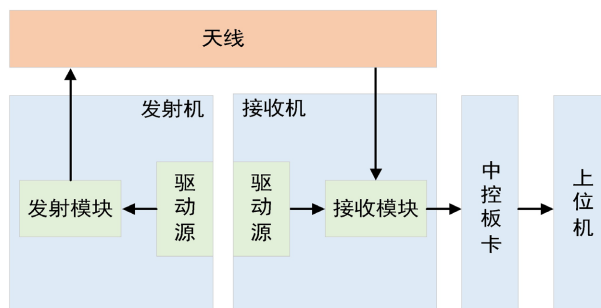
## 2. 系统硬件介绍

### 2.1. 整体架构

雷达系统主要由发射机、接收机、天线、中控板卡、上位机组成[5]。图 1 为 ISAR 成像系统设计图。成像系统运行流程如下:驱动源为发射模块提供射频信号,经过倍频后通过天线发出雷达信号,接收模块接收到雷达回波,与驱动源提供的本振信号混频后输出中频信号,中控板卡采集输出信号后将数据传输给上位机,上位机处理数据后获得最终 ISAR 图像。

### 2.2. 雷达发射机

本文的成像系统采用的是主振放大式发射机[6],由宽带调频驱动源产生一个输出频率很稳定,但是输出信号功率比较低的信号,后面利用发射模块对此信号进行逐级放大,输出大功率的脉冲。



**Figure 1.** Diagram of the ISAR imaging system design  
**图 1.** ISAR 成像系统设计框图

宽带调频驱动源主要是产生  $19.25\text{ G} \pm 500\text{ MHz}$  频综信号, 同时具备多种扫频功能, 实现输出多路频综信号和扫频信号。图 2 为驱动源实物图。

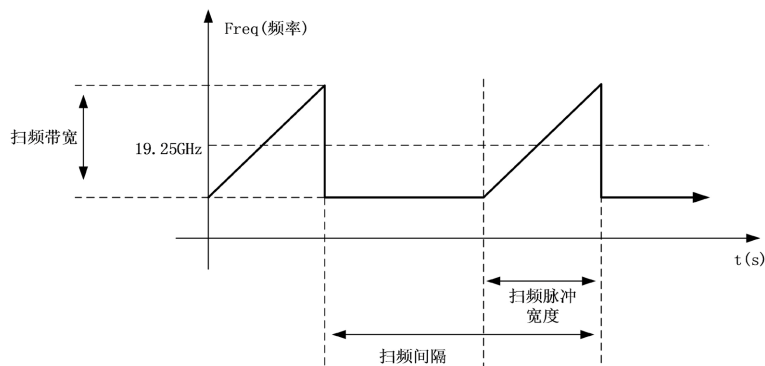
驱动源工作模式有两种:

1) 点频模式: 工作模式选择点频模式, 驱动源默认输出点频  $19.25\text{ GHz}$ 。该模式下, 扫频参数设置栏将不可设置。频率字即需要输出的频点, 以  $\text{kHz}$  为单位。LO 工作状态代表相应的工作状态, 绿色即代表打开, 灰色代表关闭。参考基频切换直接选择即可。设置完后点击参数设置即可, 右方状态栏将新增两行数据。若新增一行数据, 则通信异常, 切换到正确的 COM 口即可正常通信。

2) 扫频模式: 工作模式选择扫频模式, 扫频中心频率为  $19.25\text{ GHz}$ 。扫频参数设置选择相应的状态即可。设置完后点击参数设置, 配合扫频触发信号, 驱动源检测触发信号为高时即响应当前指令。图 3 为扫频模式示意图。



**Figure 2.** Diagram of the drive source  
**图 2.** 驱动源实物图



**Figure 3.** Diagram of the sweep mode  
**图 3.** 扫频模式示意图

而本文 ISAR 成像系统的工作模式为扫频模式, 载频为 19.25 GHz, 带宽为 500 MHz, 脉宽为 50  $\mu$ s, 脉冲重复频率为 1000 Hz, 参考基频为 50 MHz。

构成雷达发射机的另一部分则是发射模块。图 4(a)为发射模块实物图。其中端口 1 为射频输入端口, 端口 2 为射频输出端口, 射频信号经过发射模块四倍频后通过天线将信号发出。

### 2.3. 雷达接收机

ISAR 转台成像系统选择零中频接收机方式[7], 图 4(b)为接收模块实物图。其中端口 1 为本振输入端口, 端口 2 为射频输入端口, 端口 3 为中频输出端口。本振信号首先经过二倍频后的信号通过带通滤波器与放大器, 再进行二倍频, 随后通过低通滤波器与放大器后输出四倍频后信号, 最后与接收到的回波信号混频输出中频信号。图 5 为接收模块原理图。

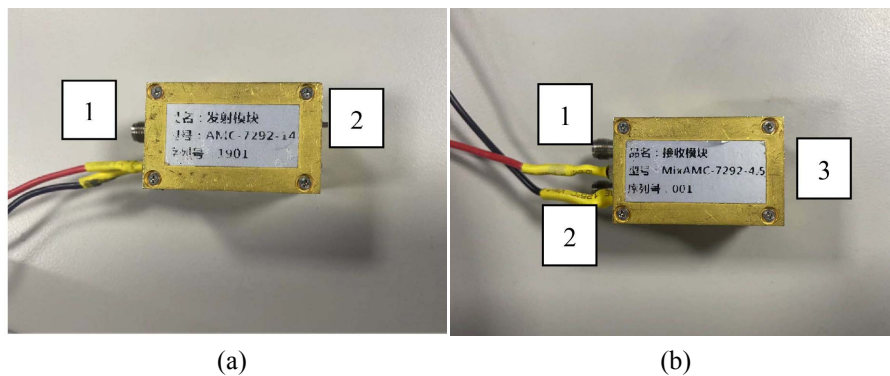


Figure 4. (a) Diagram of the transmitting module; (b) Diagram of the receiving module  
图 4. (a) 发射模块实物图; (b) 接收模块实物图

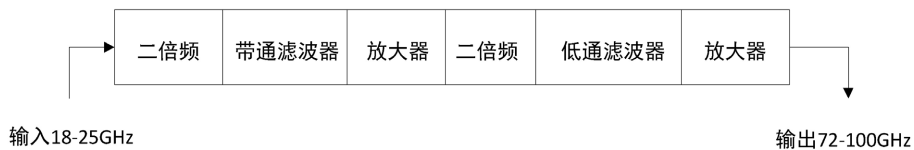


Figure 5. Schematic diagram of the receiving module  
图 5. 接收模块原理图

### 2.4. 中控板卡

针对 ISAR 成像分辨率和采集数据速率要求较高的问题, 设计了一种基于 FPGA 的高速中控板卡[8], 图 6 为中控板卡实物图。其中 1 端口为触发信号端口, 当需要驱动源发送扫频信号时, 该端口会发送一段高电平信号触发驱动源扫频功能。2 端口为中频输入端口, 处理雷达接收到的中频信号, 对其进行高速采集。3 端口为上位机通信端口, 上位机通过 UDP 协议发送指令给中控板卡, 控制其触发信号功能, 采集到的信息再通过 TCP 协议传送到上位机端。

## 3. 软件设计

### 3.1. 整体架构

ISAR 成像系统软件是依托 Qt 平台建立的, 将电机控制、信号配置、数据传输、数据采集、算法实现集于一体。系统软件运行流程如下: 上位机发出控制指令给予伺服电机, 伺服电机根据指令按一定速

度转动, 当旋转指令发送时, 同步发送一个触发指令给中控板卡, 中控板卡收到指令后会给驱动源发出高电平信号, 驱动源收到触发信号后会给收发模块提供扫频信号, 接收模块收到回波信号后与本振信号进行混频得到中频信号, 中控板卡将中频信号通过 TCP 协议传输给上位机, 最后调用 RD 成像算法得到 ISAR 图像。图 7 为 ISAR 成像系统控制软件设计图。



Figure 6. Diagram of the central control board card  
图 6. 中控板卡实物图

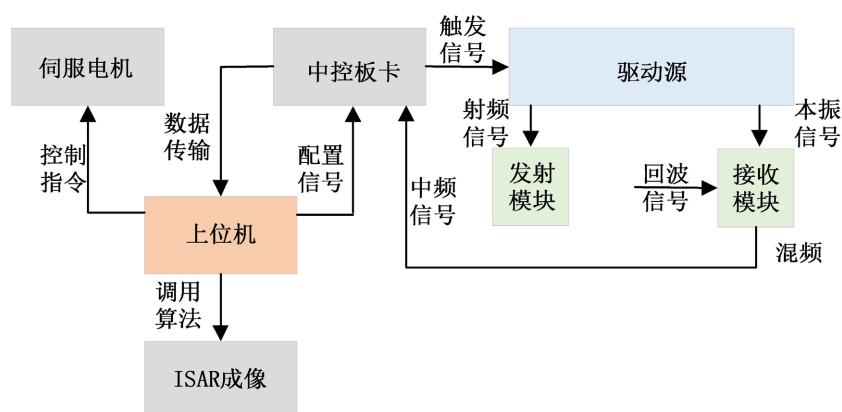


Figure 7. Diagram of the ISAR system control software design  
图 7. ISAR 系统控制软件设计图

### 3.2. GUI 软件设计

图形用户界面(GUI)是指计算机使用者通过计算机图形方式操作计算机并显示部分操作过程和结果的人机交互界面[9]。GUI 程序是基于消息驱动模型的可执行程序, 程序的执行取决于和用户的交互, 即用户操作图形界面, 程序响应用户操作。GUI 程序在执行后, 如果用户没有操作退出动作, 程序不会主动退出, 而是停留在固定循环中等待用户操作的消息, 接收并根据消息执行相应操作。消息处理模型如图 8 所示。

图 9 为本系统设计的 GUI 界面, 左下角通信协议部分为伺服电机通信标准, 电机串口部分作用是开关串口, 电机基础控制部分是给予电机使能与紧急停止, TCP 部分设置了 IP 地址与串口, 用于数据传输, 参数设置部分是为了设置 ISAR 成像系统所需转台参数, 旋转/升降控制部分是用于伺服电机运行方式切换, 而采集/成像部分则是用于处理上位机得到的数据, 最终在图像部分形成 ISAR 图像。

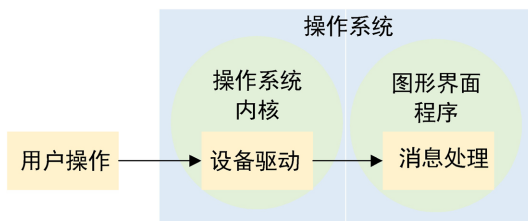


Figure 8. Diagram of the GUI message processing model  
图 8. GUI 消息处理模型图

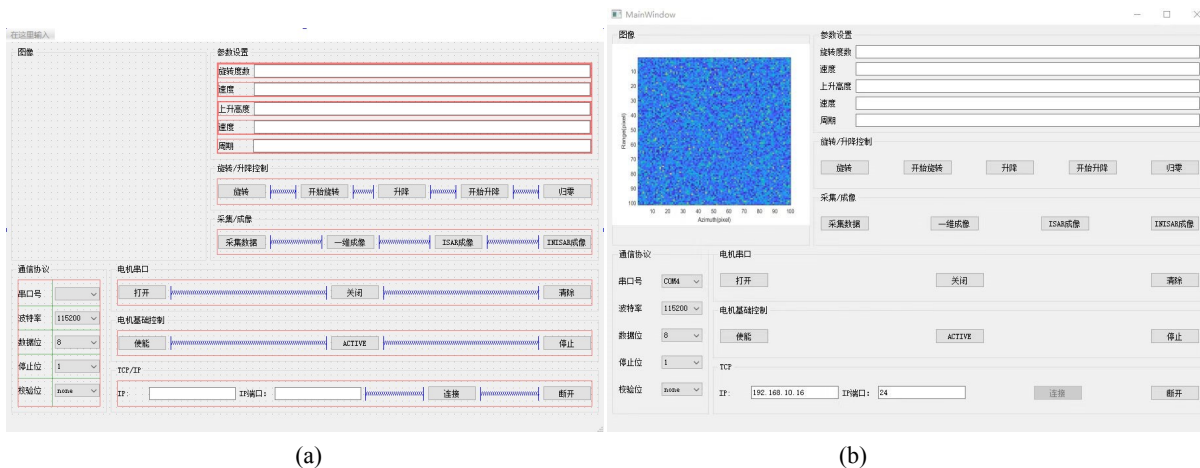
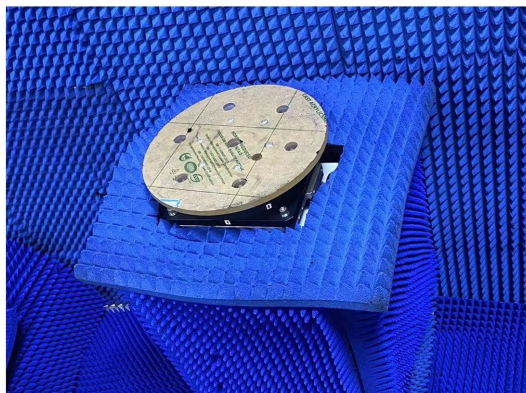


Figure 9. (a) Diagram of the GUI prototype interface; (b) Diagram of the ISAR imaging system GUI interface  
图 9. (a) GUI 原型界面图; (b) ISAR 成像系统 GUI 界面图

### 3.3. 串口通信设计

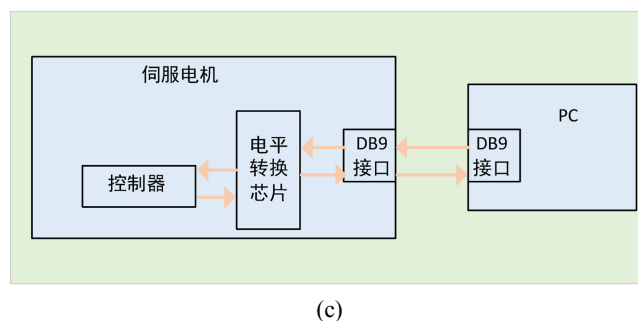
串口是显控设备与信号处理板之间通信的主要接口，也是显控设备与其他设备、设备与设备之间的协议数据帧通信传输的重要接口。串口通信[10]是一种设备间非常常用的串行通讯方式，因为它简单、便捷，因此本系统采用 RS-232 电平标准的异步串口进行通信，起到控制伺服电机的作用。图 10(a)为伺服电机实物图，为防止杂波影响成像结果，在电机及其周围覆盖了吸波材料。图 10(b)为九针串口实物图，其针脚的功能如表 1 所示。串口配通信配置参数如下：波特率为 115,200 bps，数据位为 8 bits，无需校验位，结束位为 1，停止位为 1 bit，字符使用 ASCII 编码。RS-232 协议连接图如图 10(c)所示。



(a)



(b)



**Figure 10.** (a) Diagram of the servomotor; (b) Diagram of the nine-pin serial port; (c) Diagram of the RS-232 protocol connection

**图 10.** (a) 伺服电机实物图; (b) 九针串口实物图; (c) RS-232 协议连接图

**Table 1.** Function of the nine-pin serial port pin

**表 1.** 九针串口针脚功能

针脚名	功能
TXD	串口数据输出
RXD	串口数据输入
RTS	发送数据请求
CTS	清除发送
DSR	数据发送就绪
DCD	数据载波检测
DTR	数据终端就绪
GND	地线
RI	铃声指示

### 3.4. 数据传输设计

UDP 用户数据报协议是非连接的协议, 传输数据之前源端和终端不建立连接, 当它想传送时就简单地抓取来自应用程序的数据, 并尽可能快地把它扔到网络上[11][12]。由于本系统设定中控板卡当收到一组 16 进制数时发送触发信号, 数据量较小且对传输效率有一定要求, 所以选择 UDP 进行传输, UDP 协议流程如图 11 所示。本传输系统由于 UDP 无连接特性, 减少了开销和发送数据之前的时延。且由于 UDP 没有拥塞控制, 应用层能够更好的控制要发送的数据和发送时间, 网络中的拥塞控制也不会影响主机的发送速率。又因为系统发送指令间隔较长, 不易造成数据丢失, 较好的避开了 UDP 的短板, 系统在该处使用 UDP 传输数据是较为合适的。

本系统在传输最终成像数据时, 需要确保数据传输准确性, 且由于数据量较大, 所以需要选择可靠性更好的 TCP 协议[13]。TCP 之所以能保持可靠性, 主要是通过以下 6 个手段: 校验和, 确认应答, 超时重传, 流量控制, 拥塞控制以及丢弃重复数据。TCP 通信必须先建立 TCP 连接, 通信端分为客户端和服务端, 本系统中服务器端为中控板卡, 客户端为上位机, 图 12(a)为 TCP 通信示意图。服务端通过监听某个端口来监听是否有客户端连接到来, 如果有连接到来, 则建立新的 socket 连接; 客户端通过 ip 和 port 连接服务端, 当成功建立连接之后, 就可进行数据的收发。图 12(b)为 TCP 协议流程图。

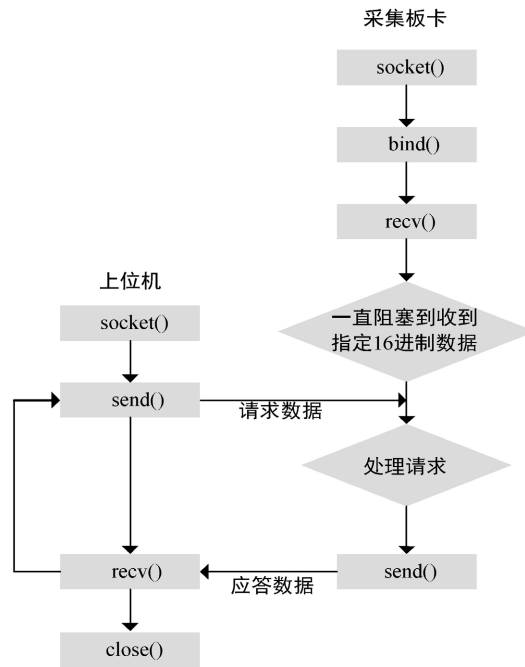


Figure 11. Diagram of the UDP protocol flow  
图 11. UDP 协议流程图

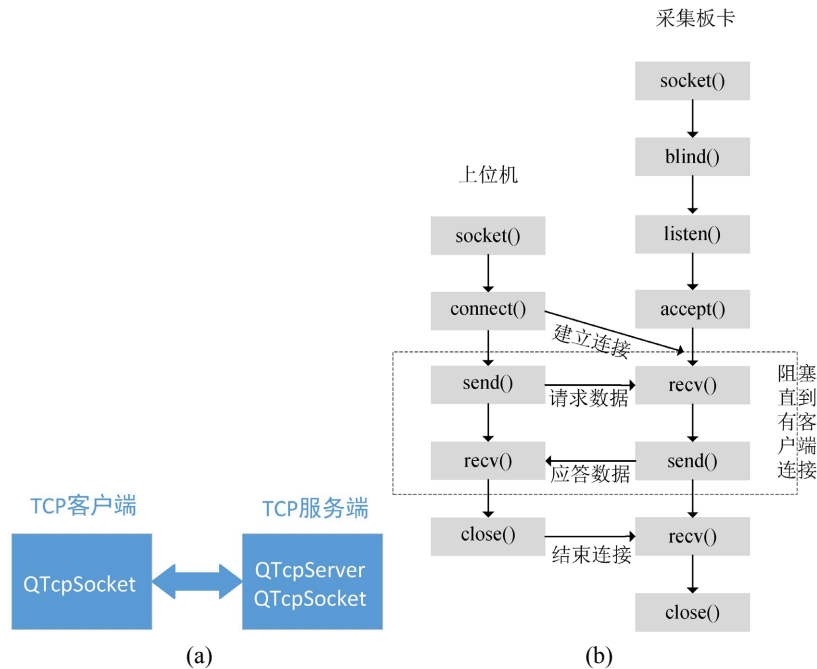


Figure 12. (a) Diagram of the TCP communication; (b) Diagram of the TCP protocol flow  
图 12. (a) TCP 通信示意图; (b) TCP 协议流程图

### 3.5. 算法实现设计

ISAR 成像系统的核心就是成像算法，而算法实现难易程度直接决定了成像系统软件的性能。Qt 和其他语言混编[14] [15]通用方法有两种，第一种是将其他语言通过编译生成相应的动态库，以调用动态库



的方式实现 C/C++ 和其他语言的混编；第二种是对于解释性语言，如 MATLAB、Python，还可以通过后台开启解释器的方式，直接使用相关的脚本语言。由于调用动态库的方式效率相对更高，在本系统软件中采用此方式来实现算法，算法实现流程如图 13 所示。首先在 Matlab 中选择 C++ 编译语言，再选择与 Qt 中一致的 MinGW64 Compiler 编译器对算法进行编译，随后将算法程序以函数的方式进行封装。接下来将生成的 \*.dll、\*.lib 和 \*.h 文件移动到 debug 目录下，添加对应环境变量，在项目根目录中添加外部库，最后在初始化算法函数即可调用。

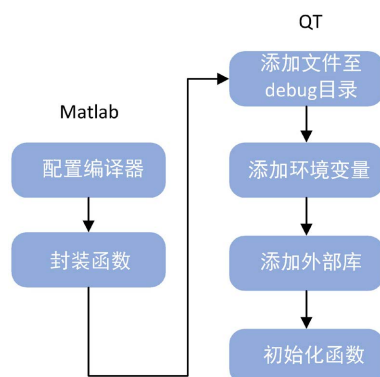


Figure 13. Diagram of the algorithm implementation flow

图 13. 算法实现流程图

#### 4. 系统测试

为了验证 ISAR 成像系统软件的可靠性，本章准备测试伺服电机运动状态、数据传输的准确性以及最终成像结果来验证其性能。

首先测试了在使用串口通信发送控制指令的准确性。通过上位机对伺服电机运动参数进行配置。通过模拟参数指令，旋转 20 度，如图 14 所示，可以看到旋转角度与设置角度相一致，表明串口通信正确可靠。

接着测试了 UDP 通信发送的指令准确性。以网络调试助手为服务器，上位机为客户端建立通信连接，通过上位机对网络调试助手发送指令进行测试。上位机通过系统软件模拟发送数据 FF80000412345678850100，可以看到最终网络调试助手接收到的数据与模拟数据一致，如图 15 所示，说明数据传输稳定性与正确性。

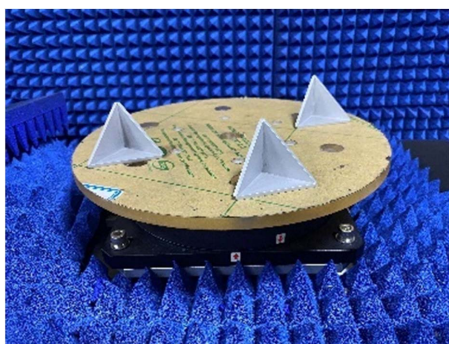


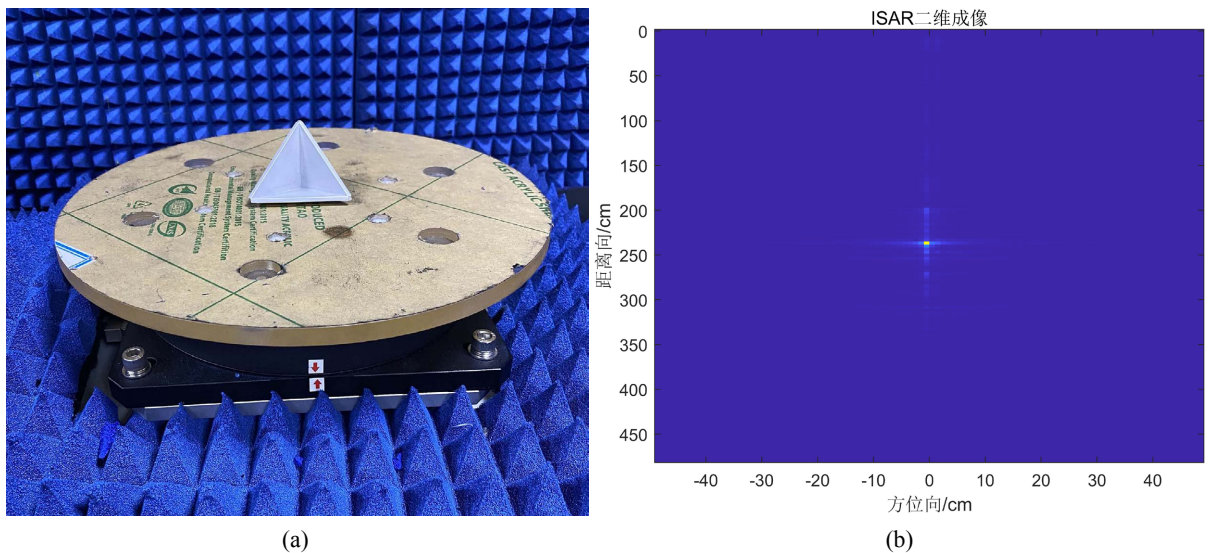
Figure 14. Diagram of the motor rotation angle

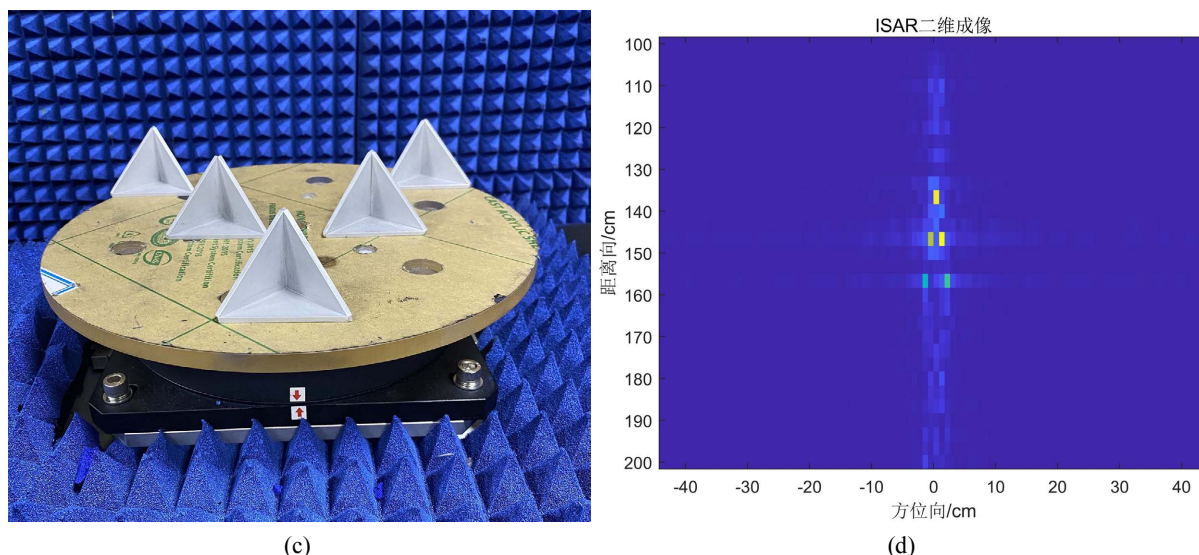
图 14. 电机旋转角度图



Figure 15. Diagram of the data received by the network debugging assistant  
图 15. 网络调试助手接收数据图

最后测试 TCP 协议数据传输，中控板卡获得雷达输出的中频信号并将数据传输到上位机，代入 RD 算法进行成像，最终成像结果的质量即可判断系统数据传输准确性。ISAR 转台成像系统基础参数如下：载频信号为 77 GHz，带宽为 2 GHz，脉宽为 50  $\mu$ s。本系统将单点目标、多点目标作为成像目标，最终成像结果如图 16 所示，不同成像目标最终得到的结果都很清晰。表 2 为点目标质量分析结果，满足方位向、距离向分辨率理论值预期，峰值旁瓣比与积分旁瓣比也呈现出较好的成像效果。从结果分析，证明了 TCP 数据传输的准确性。





**Figure 16.** (a) Diagram of the single point target; (b) Diagram of the single point target imaging result; (c) Diagram of the multipoint target; (d) Diagram of the multipoint target imaging result

**图 16.** (a) 单点目标图; (b) 单点目标成像结果图; (c) 多点目标图; (d) 多点目标成像结果图

**Table 2.** Imaging quality analysis of the single point target

**表 2.** 单点目标成像质量分析

	距离向	方位向
分辨率(m)	0.0699	0.0223
积分旁瓣比	-23.9743	-26.8981
峰值旁瓣比	-13.3493	-11.0716

## 5. 结论

本文设计了基于 Qt 平台的 ISAR 成像系统软件。主要介绍了系统软件使用的成像算法原理, 描述了 GUI 界面的设计, 介绍了系统软件中设计的串口通信、数据传输以及算法实现的方法。接着通过测试验证了串口通信、数据传输的准确性, 并通过最终得到的 ISAR 成像结果证明了系统软件的可靠性与正确性, 满足了实际场景下的 ISAR 二维成像需求。

## 参考文献

- [1] Liu, L., Zhou, F., Bai, X.R., *et al.* (2016) Joint Cross-Range Scaling and 3D Geometry Reconstruction of ISAR Targets Based on Factorization Method. *IEEE Transactions on Image Processing*, **25**, 1740-1750. <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2526905>
- [2] Luo, Y., *et al.* (2014) Three-Dimensional Precession Feature Extraction of Space Targets. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, **50**, 1313-1329. <https://doi.org/10.1109/TAES.2014.110545>
- [3] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 2-6.
- [4] 许侠, 刘海霞, 殷勇. 基于 LabVIEW 的毫米波成像系统控制软件的实现[J]. 现代电子技术, 2013, 36(3): 112-114.
- [5] 张晓东, 李想. 基于 C++语言的雷达系统组件化建模与仿真[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(11): 187-191.
- [6] 任丽晔. 多普勒雷达微波发射单元设计[J]. 长春大学学报, 2008, 18(12): 16-18.
- [7] 段鹏辉. 零中频接收机系统级设计与仿真[J]. 空间电子技术, 2015, 12(2): 41-44+77.
- [8] 王晓彬, 马戎, 李乐尧, 等. 基于 FPGA 的高速信号中控制板卡卡的设计[J]. 测控技术, 2011, 30(6): 25-28.

- [9] 王晓辉, 聂小华, 常亮. 基于 Qt 的专用有限元软件 GUI 模块的设计与开发[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(1): 21-26+65.
- [10] Tian, Y. and Xu, Z. (2019) Research and Implementation on Serial Communication Based on Qt. 2019 *International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA)*, Xi'an, 27-29 September 2019, 13-17. <https://doi.org/10.1109/ICCNEA.2019.00013>
- [11] Li, H., Zhao, Y. and Wu, R. (2021) Optimal Design of UDP Protocol in Embedded Real-Time OS. 2021 *13th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*, Yanji, 15-18 October 2021, 180-184. <https://doi.org/10.1109/ICAIT52638.2021.9702066>
- [12] Li, T., Zhu, W., Xu, J. and Cheng, Y. (2012) The Analysis and Implementation of UDP-Based Cross-Platform Data Transmission. 2012 *2nd International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, Yichang, 21-23 April 2012, 628-630. <https://doi.org/10.1109/CECNet.2012.6201752>
- [13] 师永林. 一种基于 TCP/IP 协议的通信数据传输方式[J]. 网络安全技术与应用, 2021, 251(11): 2-3.
- [14] 吴阳勇, 郭凯, 王树友. Qt 与 MATLAB 混合编程设计雷达信号验证软件[J]. 电子测量技术, 2020, 43(22): 13-18.
- [15] 周珊珊, 朱桐, 胡杨. 基于 Qt 与 MATLAB 的混合编程技术[J]. 电子产品世界, 2016, 23(10): 57-60.