

基于软件无线电的LFM测距测速实现

贾艳双, 周艳娇, 杜 军*

哈尔滨师范大学计算机科学与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年10月20日; 录用日期: 2024年11月18日; 发布日期: 2024年11月27日

摘 要

软件无线电是一种无线电通信系统,它通过软件来实现和控制无线通信功能,而不是传统的硬连线方式。本实验仿真所用到的SIMULINK在工程计算、数据分析和可视化方面进行应用。本研究目的是探索线性调频信号在SIMULINK仿真、软件无线电系统中的应用。文章首先对线性调频信号进行采样,随后进行发射,软件无线电接收的信号与原线性调频信号进行混频、和快速傅里叶变换,最后引入测距测速原理,通过信号变化和已知频谱移动信息,令仿真具有测距测速功能,测试系统的实际工作性能。

关键词

软件无线电, SIMULINK, LFM信号, 信号处理, 测距测速

Implementation of Linear Frequency Modulation Ranging and Speed Measurement Based on Software-Defined Radio

Yanshuang Jia, Yanjiao Zhou, Jun Du*

School of Computer Science and Information Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Oct. 20th, 2024; accepted: Nov. 18th, 2024; published: Nov. 27th, 2024

Abstract

Software defined radio is a wireless communication system that utilizes software to implement and

*通讯作者。

文章引用: 贾艳双, 周艳娇, 杜军. 基于软件无线电的 LFM 测距测速实现[J]. 计算机科学与应用, 2024, 14(11): 127-140.
DOI: 10.12677/csa.2024.1411222

control wireless communication functions, rather than traditional hard wired methods. The SIMULINK used in this experimental simulation is applied in engineering calculations, data analysis, and visualization. The purpose of this study is to explore the application of linear frequency modulation signals in SIMULINK simulation and software defined radio systems. This article first samples the linear frequency modulation signal, and then transmits it. The signal received by the software defined radio is mixed with the original linear frequency modulation signal and subjected to fast Fourier transform. Finally, the principle of ranging and speed measurement is introduced. Through signal changes and known spectral shift information, the simulation is equipped with ranging and speed measurement functions to test the actual performance of the system.

Keywords

Software-Defined Radio, Simulink, LFM Signal, Signal Processing, Ranging and Velocimetry

Copyright © 2024 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

近些年来,软件无线电(Software Defined Radio, SDR)技术得以飞速发展,其应用也越来越广泛[1][2]。软件无线电(SDR)以其高度的灵活性和可编程性的特点,已经成为现代雷达系统设计的关键技术。目前,基带信号处理采用常用方案是基于 FPGA/DSP 结合 PC。在便携式应用中,希望所有的基带处理基于 FPGA/DSP 中完成;绝大多数情况下,需要增强提高相关系统数字处理能力与灵活性,如果通过 FPGA/DSP 完成一部分信号处理的步骤,通过高速接口将数据传送至 PC 端,利用 PC 的计算能力来处理数字信号。使用电脑无须昂贵的高速数字信号处理器,就可以协助处理基带数字信号,可以借助已有的相关软件完成设计部分任务,使用已有的数字信号处理程序模块来节省开发时间。目前 PC 上成熟的 SDR 软件平台有 GNU Radio、Matlab、LabVIEW 等[3],它们提供了丰富的信号处理工具和库,本实验使用 Matlab 软件平台。

LFM 信号具备较好的噪声干扰、抗多径干扰的优点,因为 LFM 信号可以通过脉冲压缩技术提高信噪比。线性调频信号可以通过匹配滤波器实现脉冲压缩,这可以显著提高系统的检测性能和分辨率。LFM 信号的生成和处理相对简单,可以使用标准的数字信号处理技术进行处理。

软件无线电最早用于军事领域[4],允许雷达系统通过软件更新来适应不同的任务需求,实现多功能一体化,极大提升了雷达的作战效能和适应性。本论文旨在探讨射频调制激光雷达的信号处理技术,利用 SIMULINK 对线性调频信号进行仿真分析。研究内容包括线性调频信号的生成、发射、接收信号处理等环节。在 PC 机上进行信号控制,在基于 XCZU3EG 芯片的软件无线电进行发送接收信号,同时进行对目标测速测距的实现。

2. 基本原理

2.1. 线性调频

线性调频(LFM)信号是一种在雷达和声纳等技术中广泛应用的调制技术。其基本原理是信号的瞬时频率随时间线性变化,致使信号的相位按二次函数变化方式会随时间变化进行变化。线性调频信号的计算公式如式(1):

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j\pi K t^2) \quad (1)$$

其中, t 是时间变量, T 是频信号脉冲持续时间, K 是线性调频率, 目的是反映频率的变化率, 单位为 Hz/s。

线性调频信号的瞬时频率用相位求导如式(2)表示:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{d(\pi K t^2)}{dt} = Kt \quad (2)$$

其中, t 变量说明频率是时间的线性函数, 其斜率为 K (单位 Hz/s)。

2.2. 测距测速

首先接收到的回波信号与最初的发射信号进行混频, 生成一个中频(IF)信号, 得到差频信号, 该差频信号的频率是回波信号与最初的发射信号的差值, 且频率差值反映了目标的相对运动。通过 FFT (快速傅里叶变换) 将时域信号转换到频域, 对信号的频率成分进行分析。如果目标物体正在进行移动, 接收器接收到的回波信号其频率会因为多普勒效应而发生变化。混频后, 这个频率变化会转化为中频信号的频率变化, 从而去进行测量目标的速度。其次需要测量中频信号的时间延迟, 可以计算目标的距离。

测距公式: 假设接收器接收到的回波信号与发射信号之间的时间延迟为 τ , 则所检测目标的距离 R 可以通过式(3)公式计算:

$$R = \frac{c\tau}{2} \quad (3)$$

其中, c 是光速 3×10^8 m/s。

测速公式: 如果目标相对于雷达有径向速度, 则中频信号将会受到多普勒频移效应的影响[5]。若所测目标有径向速度 v , 则产生多普勒频移 f_d 。根据式(4)计算公式可获得多普勒频移 f_d :

$$f_d = \frac{2vf_0}{c} \quad (4)$$

其中, f_0 是信号的中心频率。

距离分辨率: 距离分辨率 ΔR 与信号带宽 B 有关, 根据下述式(5)表达式可计算:

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (5)$$

速度分辨率: 速度分辨率 ΔV 受系统参数影响, 根据下述式(6)表达式可计算:

$$\Delta v = \frac{\Delta f}{2B} \quad (6)$$

其中, Δf 是频率分辨率。

3. 系统设计

3.1. 系统设计目标

在 SIMULINK 仿真中进行设计, 发送线性调频信号(chirp), 同时需要对线性调频信号频谱进行观察, 从而获取相应的频谱信息。在接收模块 ADALM-Pluto Radio Receiver 中返回的信号与原来发射信号结合在一起进行混频操作, 获取中频信号后通过 FFT 处理将其转换到频域, 并对信号的包络进行平方处理, 从而可以有效地观察和分析频谱, 提取所需的信息, 后续相关操作得到频差, 进而为得出速度和距离进行铺垫。

3.2. 信号设计

3.2.1. 信号发射模块设计

首先产生线性调频信号，通过 Rate Transition 对其进行数字化采样，按照奈奎斯特采样定理，确保所有相关信息在频谱分析中得以准确保留和体现。采样频率必须满足 $f_s \geq 2f_{\max}$ ，确保了采样频率足够高，以捕捉信号中的所有频率成分，避免出现混叠情况。随后，通过 Buffer，Raised Cosine Transmit Filter 模块将信号发送到 ADALM-Pluto Radio Transmitter。同时 Spectrum Analyze 也显示线性调频信号对应频谱。发射模块设计仿真如图 1 所示、初始线性调频频谱如图 2 所示。然而未添加 ADALM-Pluto Radio Transmitter 模块初始线性调频频谱亦和图 2 一样。

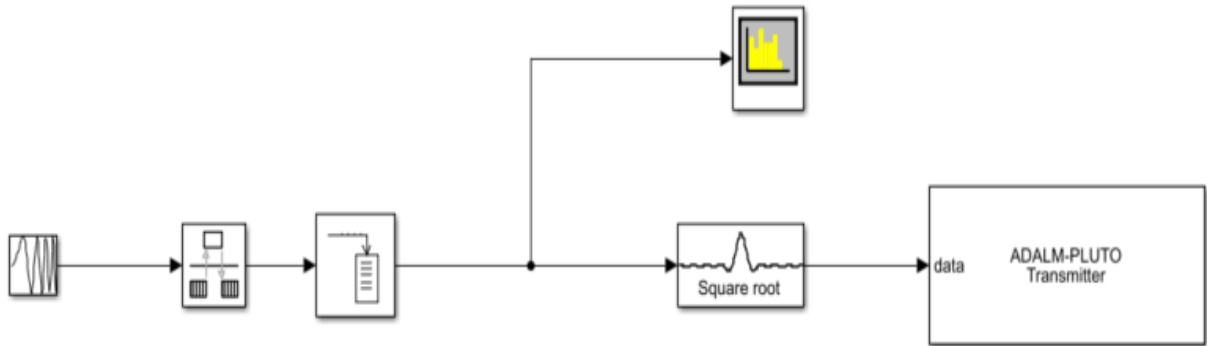


Figure 1. Launch module design simulation

图 1. 发射模块设计仿真

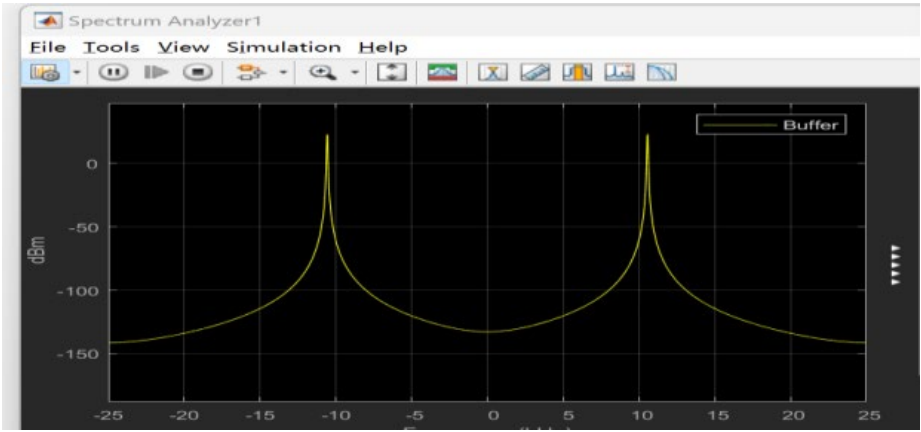


Figure 2. Initial LFM spectrum

图 2. 初始线性调频频谱

3.2.2. 处理模块设计

信号接收模块设计：ADALM-Pluto Radio Receiver 接收线性调频信号，通过 Raised Cosine Receive Filter 模块，初始的线性调频信号和获取的回波信号混频，生成中频信号。其中混频是一种信号处理技术，通常用于将高频信号转换为较低频率的信号，以便于处理和分析，从而产生一个频率为两者频率差的信号。通过混频这一模块后，将高频信号转换为比较低频率的信号，这使得信号更容易进行分析处理，与此同时，后续实验也与混频后获取的多普勒频移信息相关。为进一步的信号处理和分析提供了清晰的频谱图，采用 FFT 处理把时域信息变换成频域信息，获取所需频率信号，便于进

一步分析多普勒运算得出信号速度和距离信息。在雷达系统中，这有助于确定目标的距离和速度。对信号包络进行平方，可以用于进一步的信号处理，如多普勒频移的检测和测量。如图 3 所示为未添加 ADALM-Pluto Radio Receiver 模块初始中频信号、图 4 为仿真中频信号。二者信号变化如下两图所示。

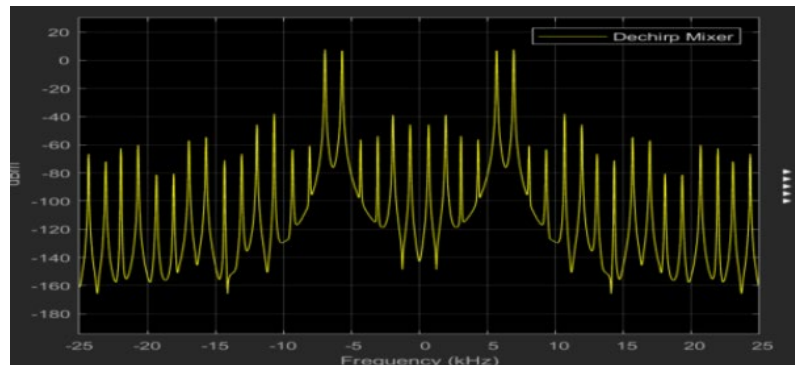


Figure 3. Initial intermediate frequency signal without adding sending module

图 3. 未添加发送模块初始中频信号

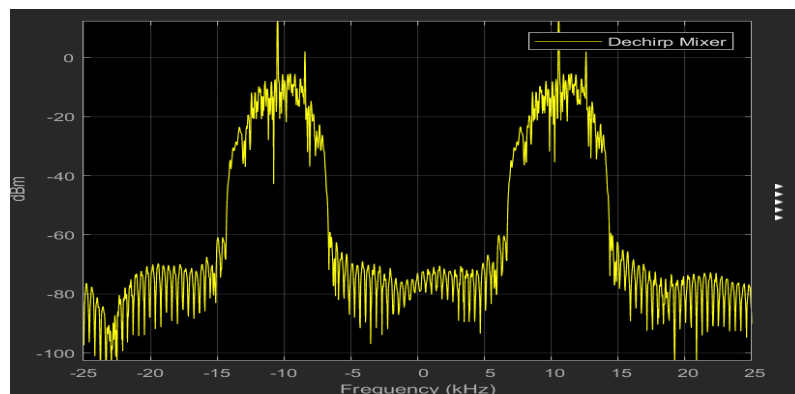


Figure 4. Initial intermediate frequency signal

图 4. 初始中频信号

如图 5 所示为未与软件无线电进行连接仿真。SIMULINK 仿真通过测距测速原理得出本实验相对速度距离。

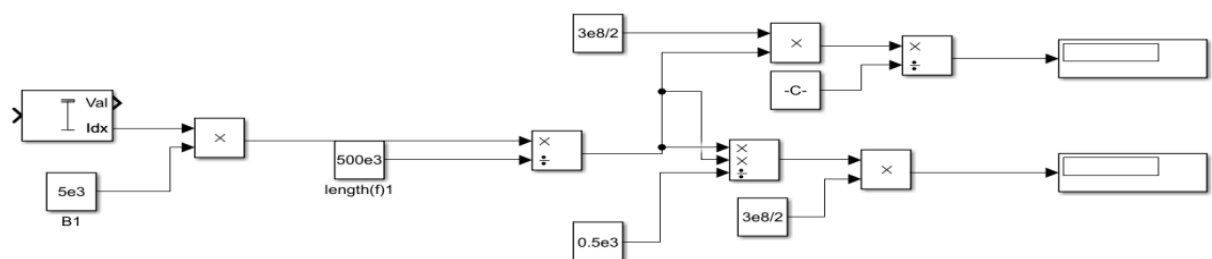


Figure 5. Simulation of speed and distance information

图 5. 速度、距离信息仿真

如图 6 所示，为本实验整体仿真图。

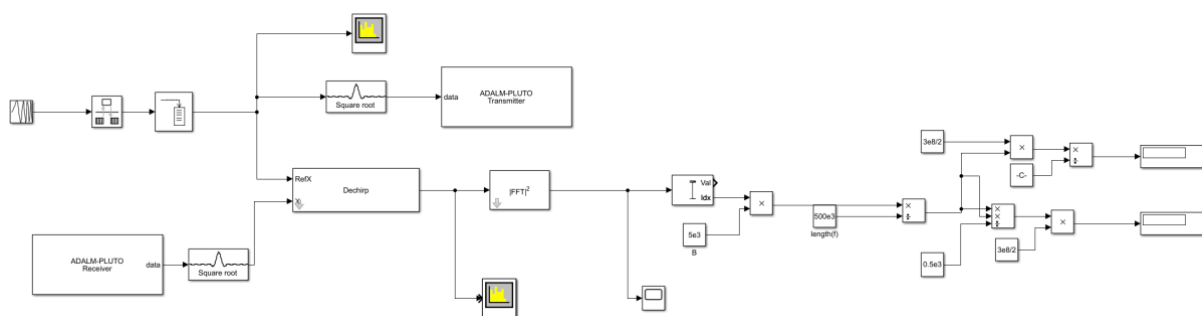


Figure 6. Overall simulation diagram

图 6. 整体仿真图

4. 技术平台及其设备

4.1. 仿真平台-SIMULINK

```
> Simulink
> Aerospace Blockset
> Audio System Toolbox
> Automated Driving System Toolbox
> Communications System Toolbox
> Communications System Toolbox HDL Support
> Communications System Toolbox Support Package for ADALM-PLUTO Radio
> Computer Vision System Toolbox
> Control System Toolbox
> Data Acquisition Toolbox
> DSP System Toolbox
> DSP System Toolbox HDL Support
> Embedded Coder
> Fuzzy Logic Toolbox
> HDL Coder
> HDL Verifier
> Image Acquisition Toolbox
> Instrument Control Toolbox
> LTE HDL Toolbox
> Model Predictive Control Toolbox
> Neural Network Toolbox
> OPC Toolbox
> Phased Array System Toolbox
> Powertrain Blockset
> Report Generator
> RF Blockset
> Robotics System Toolbox
> Robust Control Toolbox
> SimEvents
> Simscape
> Simulink 3D Animation
> Simulink Coder
> Simulink Control Design
> Simulink Design Optimization
> Simulink Design Verifier
> Simulink Desktop Real-Time
> Simulink Extras
> Simulink Real-Time
> Simulink Requirements
> Simulink Test
> Stateflow
> System Identification Toolbox
> Vehicle Dynamics Blockset
> Vehicle Network Toolbox
> Vision HDL Toolbox
> Recently Used
```

Figure 7. Module library

图 7. 模块库

SIMULINK 是 MATLAB 的附加工具箱，是能够动态系统建模、仿真和设计的可视化方法。与 MATLAB 的文本编程方式不同，能够动态系统建模、仿真和设计的可视化方法。与 MATLAB 的文本编

程方式不同, SIMULINK 采用基于图形的用户界面, 允许用户通过拖放预先构建的模块来创建系统模型, 而无需深入了解每个模块的内部实现细节。在 SIMULINK 中, 用户主要关注于模型的搭建和仿真过程, 这些模块根据功能被组织成不同的库, 用户只需理解每个模块需要的输入、输出, 了解基础功能。在本实验中, SIMULINK 可以与基于 XCZU3EG 芯片的软件无线电硬件结合使用, 实现信号处理和系统仿真, 验证算法和系统性能进而进行仿真与分析。

SIMULINK 内部模型提供了许多强大的功能, 因其以下特质使其成为系统建模与仿真方面的首选工具之一。SIMULINK 的图形化显示功能极其强大, 用户可以通过拖拽模块和连线来直观地构建系统模型, 为实验性图形化显示提供了强有力的支持, 使得用户能够直观、实时地监控和分析仿真数据。这种层次化的结构不仅有助于组织和管理大型模型, 还使得每个子系统可以独立开发和测试, 提高了模型的可维护性和可扩展性。SIMULINK 拥有丰富的模块库, 涵盖了从基本算术运算到复杂的控制系统和信号处理算法的各种功能模块。此外, 用户还可以创建自定义模块, 并将其添加到模块库中, 进一步扩展 SIMULINK 的功能。本文调用了多个模块库进行仿真, 包括 SIMULINK、Communications System Toolbox Support Package for ADALM-PLUTO Radio。模块库如图 7 所示。

4.2. XCZU3EG 芯片软件无线电

4.2.1. AD9361

AD9361 是一款为 3G 和 4G 基站设计的高度集成和高性能的射频收发器, 它具有广泛的应用适应性。这款设备将射频前端和灵活的模拟 - 数字混合信号基带集成在一个芯片上, 并内嵌了频率合成器, 提供了一个可由数字处理器配置的接口, 从而简化了设计过程。AD9361 芯片发射器和接收器的工作频率范围涵盖了大部分常用通信频段, 具有优秀的集成性能和通用性能, AD9361 收发通道支持的带宽为 200 kHz~56 MHz, 并且具有较强的可编程性, 可以根据具体工程配置芯片的工作频点和通道带宽[6] [7]。

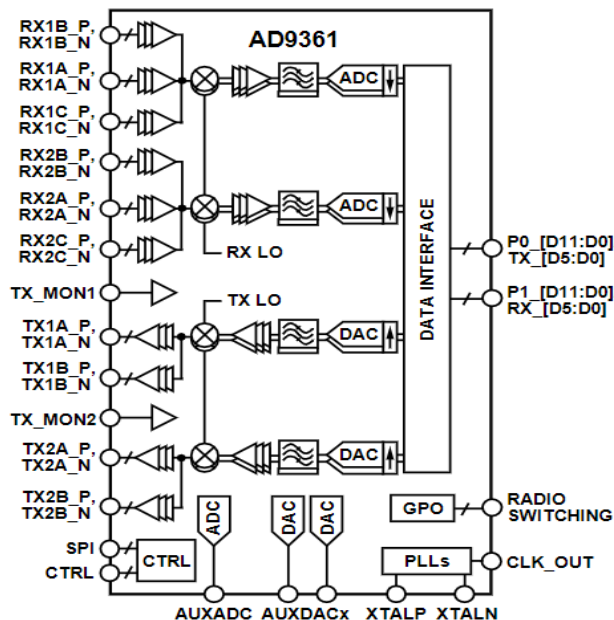


Figure 8. AD9361 functional block diagram

图 8. AD9361 功能框图

AD9361 包含 2 个发射和接收通道[8], 允许用户同时接收来自不同频率或不同来源的信号, 每个接

收器可以独立处理信号，具有独立的直接变频特性，提高了系统的灵活性和多任务处理能力。该芯片为了能够自动调整接受信号的增益、适应不同信号强度和環境变化，分别配备独立的自动增益控制(AGC)应用于不同的接受子系统，具有手动增益控制功能，可对发射通道的发射衰减和接收通道的接收增益进行调节[9]。AD9361 不同的接收通道都独立配备了两个高动态范围模数转换器(ADC)接收到的同相(I)和正交(Q)模拟信号首先被转换为数字格式，信号经过数字抽取滤波器进行降采样和初步滤波，减少数据量并去除不必要的高频成分。然后，信号经过具有 128 个抽头的 FIR 滤波器进行进一步的滤波处理，以实现更精细的频域控制和优化信号质量。最终，这些信号以设定的采样频率转换成 12 位的数字输出信号。

AD9361 整体框图如图 8 所示。

此外，此实验所涉及原理图如图 9 所示。

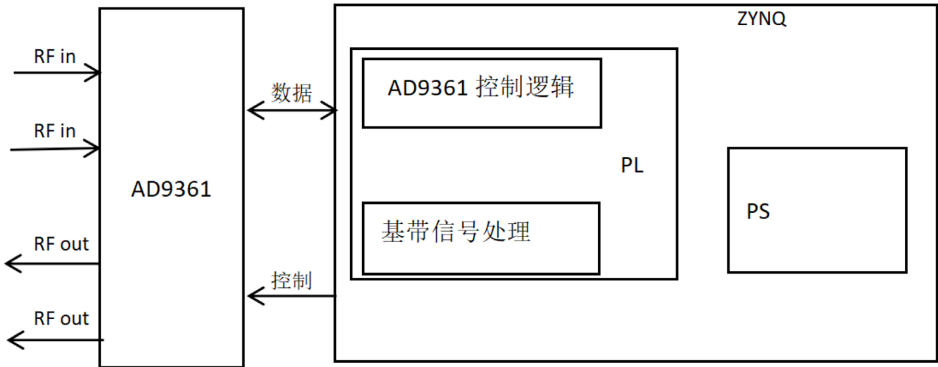


Figure 9. Experimental block diagram
图 9. 实验框图

4.2.2. 接收器

接收器负责射频信号的接收，并将射频信号转换成基带处理器可使用数字信号[10]，供基带处理器(BBP)处理使用，供基带处理器(BBP)处理使用。该设备设计有两个具备独立操作功能的接收通道，在信号接收方面，不同的接收通道的独立功能使系统能够同时处理多个信号源，提供灵活的信号接入能力。而 MIMO 兼容性则允许系统在多输入多输出通信系统中发挥作用，同时这些通道还能共用一个统一的频率合成器进行信号处理。图 10 为信号接收通道框图。

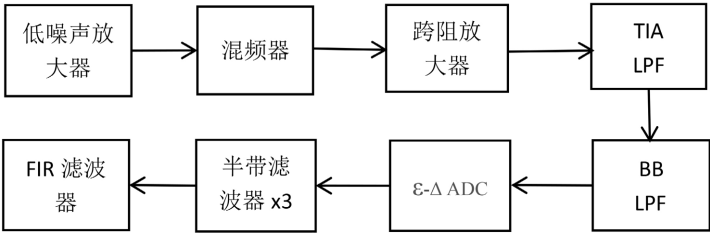


Figure 10. Block diagram of one signal receiving channel in the chip
图 10. 片内一路信号接收通道框图

AD9361 的每个接收通道配备了三个可输入信号的端口，这些端口能够被联合至信号链路中，使得该设备适合用于分集接收系统，系统设计支持不同数量的天线输入，使得用户可以同时接收来自不同方向或频率的信号。该系统具备直接变频特性，允许将接收到的射频信号直接转换到基带频率。此外该接收器组件配备低噪声放大器(LNA)，用于放大接收到的信号并最小化噪声，以确保信号的清晰度和质量；匹

配相内(I)和正交(Q)放大器则对信号进行进一步的放大和处理;混频器的作用是将接收到的射频信号下变频到中频或基带频率,使得信号处理更加简便。经过频带整形滤波器处理后的信号被分解为基带 I/Q 两路信号,便于数字化处理和分析。此外,系统还支持连接外部低噪声放大器,提供了高度的灵活性。用户可以根据具体的需求和应用场景,选择适合的外部 LNA,以优化信号接收性能。这种可定制的设计允许系统在不同环境和条件下达到最佳的接收效果。

系统配备了预设增益索引表,这一表格用于合理分配增益,以确保系统在不同条件下能够实现最佳的性能。预设增益索引表提供了精确的增益配置方案,使得系统能够在各种工作环境中维持高效的信号处理。此外,系统提供了灵活的增益控制模式,配备了自我校准和 AGC 系统,可使接收信号在多种温度,环境下维持高性能[11]。用户可以选择使用内部自动增益控制(AGC)功能,该功能提供快速或慢速两种模式,以适应不同的信号条件和动态变化。也可以选择手动增益控制模式,根据实际需求自行调整增益,以实现更精确的控制。每个接收通道配备了接收信号强度指示(RSSI)功能,能够独立地测量和显示接收到的信号强度。系统还具备直流失调跟踪功能,能够实时监测和调整直流失调。此外,系统配备了自我校准电路,用于自动执行自我校准过程。

接收器部分还包括了 12 位的 sigma-delta ($\Sigma\Delta$)模数转换器(ADC),ADC 具备自主调节的采样率,可以有效地形成和处理数字化信号数据流。采用数字抽取滤波器从输入信号中选择性地抽取样本来降低采样率,其次配备 128 抽头有限冲击响应(FIR)滤波器进行额外的信号抽取和过滤,进一步优化信号质量,以及提供灵活的采样率调整功能,系统能够高效地管理和优化信号数据流,满足各种复杂的信号处理需求。

4.2.3. 发射器

发射器部分采用双通道结构设计,每个通道都可以独立工作并且每个通道的数字处理模块包括了所有必需的组件,以实现高效的信号处理和发射。模拟信号处理模块和射频(RF)模块,并且这两个通道共享一个通用频率合成器。从基带处理器(BBP)接收的数字信号首先通过一个 128 抽头的有限脉冲响应(FIR)滤波器进行处理,该滤波器是具备自定义的可编程特性。信号通过插值滤波器,系统能够在保持信号质量的同时调整数据速率,从而满足不同应用场景中的数据处理需求。12 位 DAC 提供了高分辨率的信号转换能力,使得输出信号更加精确和稳定。用户可以根据实际需要调整 DAC 的采样率,以实现输出信号速率的精确控制,以适应不同的信号处理需求。I 和 Q 信号路径最终被送入 RF 模块进行上变频处理,完成信号的发射过程。设备内部的发射通道结构通常在图 11 中详细展示。

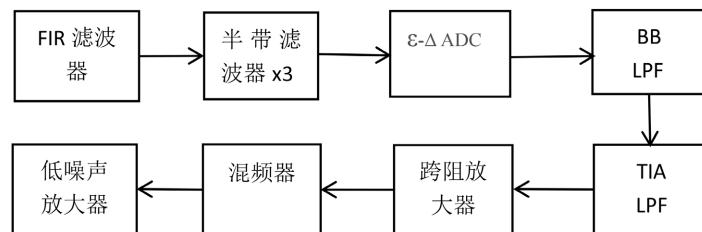


Figure 11. Block diagram of one signal transmission channel within the film
图 11. 片内一路信号发射通道框图

在模拟基带信号的转换过程中, I 和 Q 信号首先通过滤波器进行处理,目的是消除由于采样而产生的假象信号。之后,基带 I/Q 信号通过上变频混频器合并调制到载波频率上,以生成最终的调制信号。在发送之前,合并后的信号还会经过模拟滤波器进一步进行频率整形,以优化信号质量,然后才传递到输出放大器。每个发射通道都具备宽范围的精细可调衰减功能。各个通道配置内置的自我校准电路,并实时自动调整,目的是确保信号具有准确性和稳定性。为了保证激励器的输出信号可以实时监控,配置单

独的 TX 监视器模块, 未被使用的接收通道提供了一个独立的通道确保信号, 反馈给基带处理器(BBP), 用于信号的监控和分析。值得注意的是, TX 监控器功能仅在时分双工(TDD)模式下, 且接收器处于空闲状态时才可用。

5. 硬件测试与实验结果

5.1. PLUTO 连接

SIMULINK 需要安装 SDR 数据发射接收的子模块如图 12 所示:

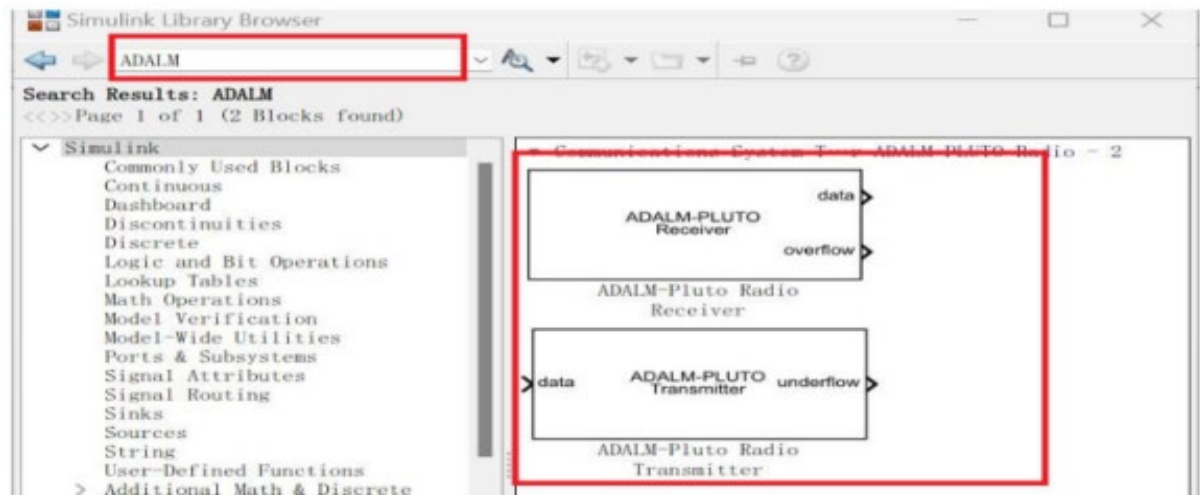


Figure 12. Data sending and receiving submodule
图 12. 数据收发子模块

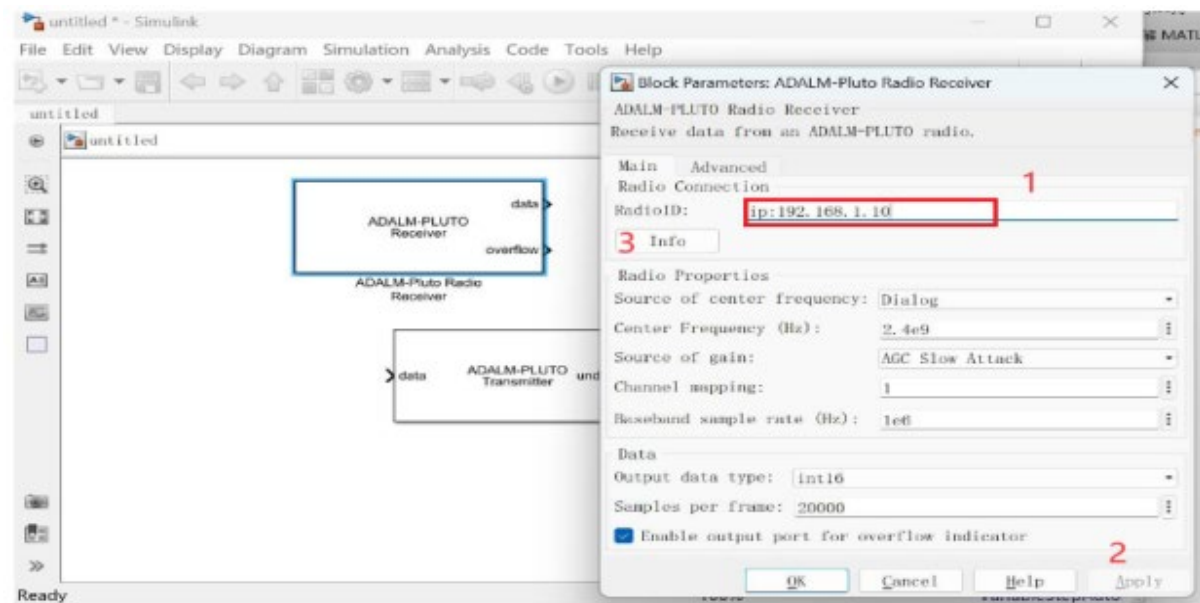


Figure 13. Configure IP address
图 13. 配置 IP

配置好以太网, 保证 ZUSDR 能够和电脑通信。配置好后, 我们在 ADLM-PLUTO 配置界面将 Radio

ID 改为 ip:192.168.1.10 (自行配置)。弹出如下信息,表明已经识别到软件无线电硬件。Matlab 的 SIMULINK 的 ZUSDR 开发环境就搭建结束。配置信息如图 13 和图 14 所示。

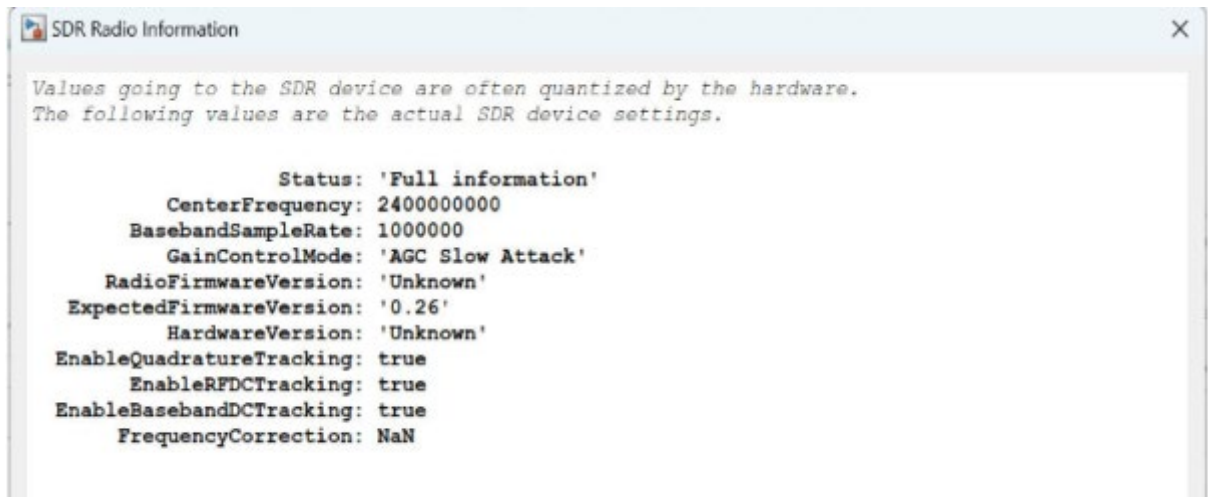


Figure 14. Software defined radio identification successful

图 14. 识别软件无线电成功

5.2. 结果展示

PC 机连接软件无线电前后进行实验, 仿真线性调频频谱也都随之向两侧移动如图 15、图 16 所示。

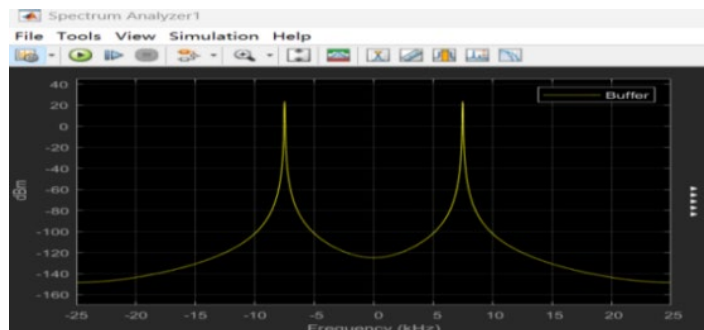


Figure 15. Simulation of linear frequency modulation spectrum with ADALM-Pluto Radio Transmitter Module

图 15. ADALM-Pluto Radio Transmitter 模块仿真线性调频频谱

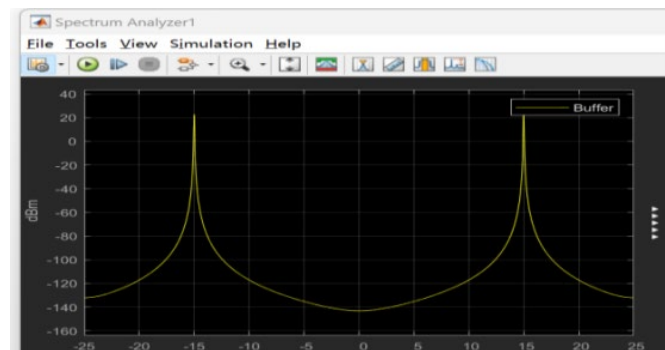


Figure 16. Add ADALM-Pluto Radio Transmitter module to simulate linear frequency modulation spectrum

图 16. 添加 ADALM-Pluto Radio Transmitter 模块仿真线性调频频谱

将输出信号与原 LFM 信号通过混频器进行混频, 得出中频信号, 进行试验过程中, 中频信号进行移动, 如图 17、图 18 所示。

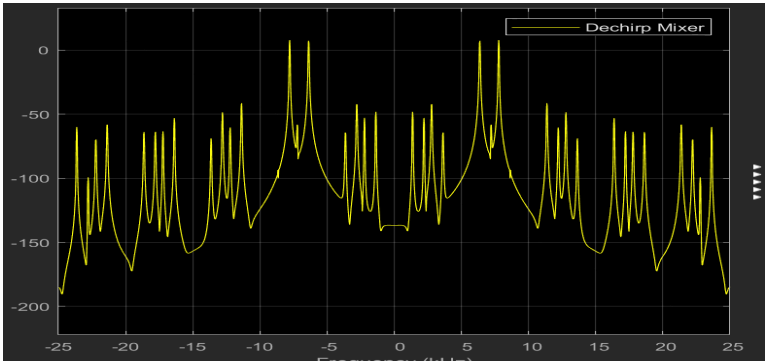


Figure 17. The intermediate frequency signal after simulating without adding ADALM-Pluto Radio Transmitter module
图 17. 未添加 ADALM-Pluto Radio Transmitter 模块仿真后中频信号

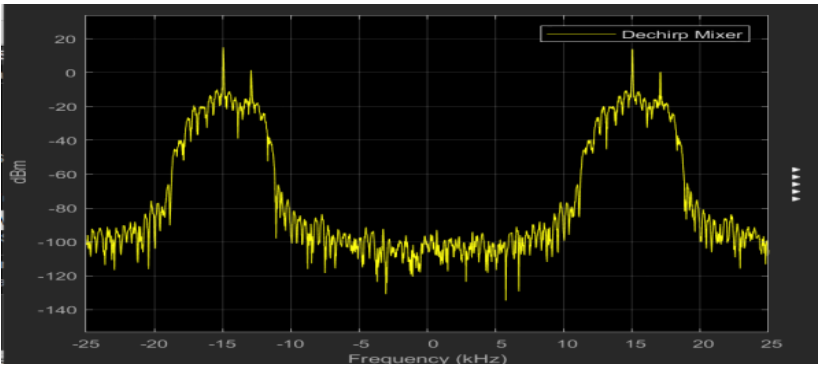


Figure 18. Add ADALM-Pluto Radio Transmitter module to simulate the intermediate frequency signal
图 18. 添加 ADALM-Pluto Radio Transmitter 模块仿真后中频信号

混频后的信号包含了目标多普勒频移信息, 在后续仿真中, 提供差频信号相关信息, 令其仿真具有测距测速功能。图 19 所示为速度、距离信息仿真结果图。图 20 为整体仿真结果图。

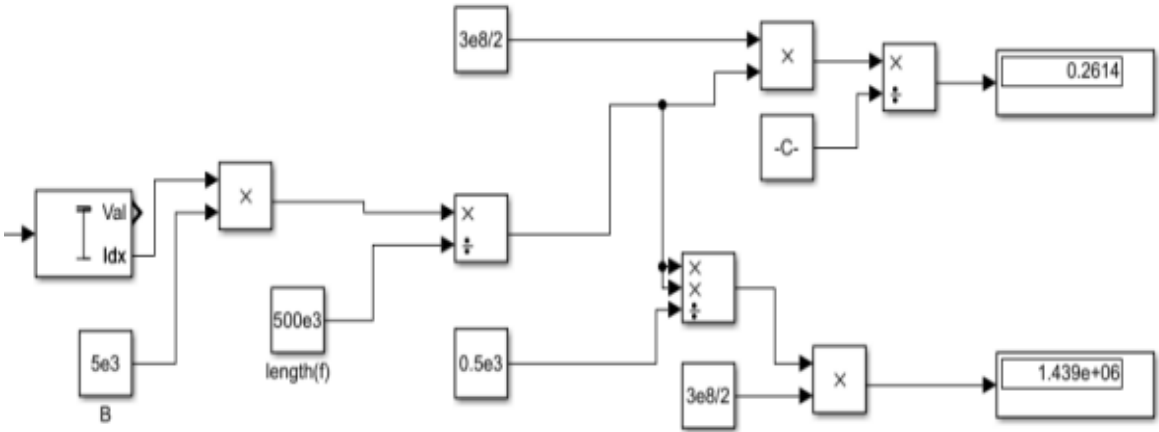


Figure 19. Simulation results of speed and distance information
图 19. 速度、距离信息仿真结果图

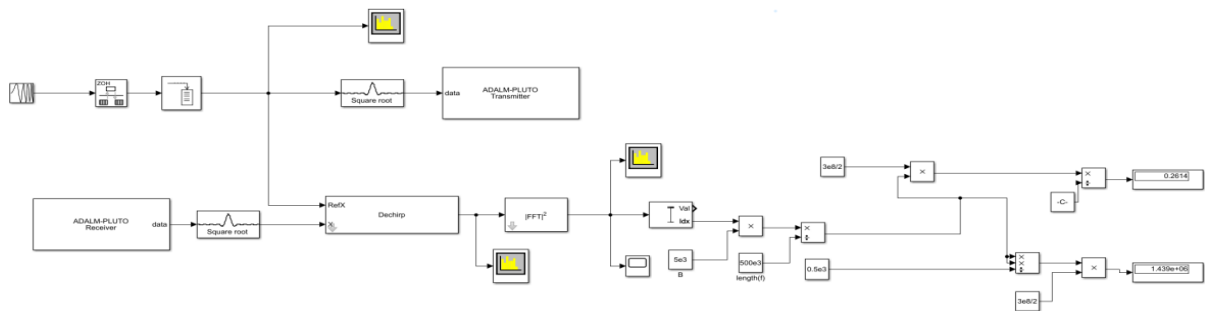


Figure 20. Overall simulation result diagram

图 20. 整体仿真结果图

5.3. 硬件展示

本实验采用硬件核心 CPU 和 FPGA 为一颗 ZYNQ Ultrascale 的 XCZU3EG-2SFVC784I 芯片软件无线电与 SIMULINK 仿真配合。图 21 为硬件实物图。



Figure 21. Hardware physical object

图 21. 硬件实物

6. 结语

在本文中首先介绍仿真 SIMULINK 及其所要用的模块，重点介绍软件无线电收发模块，及其 SIMULINK 的 ZUSDR 开发环境搭建。第二部分讲述 SIMULINK 仿真中所涉及到的线性调频信号原理与仿真使用的测速测距原理。第三部分利用 SIMULINK 仿真，通过软件无线电设备，对信号进行发射接收，再对其信号进行 FFT、多普勒计算等处理得出信号的速度距离具体信息和未连接软件无线电信号具体变化对比。第四部分对基于 XCZU3EG 芯片的软件无线电进行模块化介绍，对 RF 捷变收发器、接收器、发射器进行阐述。第五部分是连接软件无线电前后仿真结果对比图。未来通过实现 ZYNQ Ultrascale 的 XCZU3EG-2SFVC784I 芯片的软件无线电具体操作，尽可能实现了总线接口 AXI 和控制接口 SPI，在 ZYNQ 的 ARM 处理器资源移植嵌入式系统，利用 ZYNQ 的 FPGA 逻辑资源，开发基于 ZYNQ 的软件无线电平台，并将其应用于射频调制激光雷达。

参考文献

- [1] Harikrishnan, B., Raghul, R., Shibu, R.M. and Nair, K.R. (2014) All Programmable SOC Based Standalone SDR Platform for Researchers and Academia. 2014 *First International Conference on Computational Systems and Communications (ICCSC)*, Trivandrum, 17-18 December 2014, 384-386. <https://doi.org/10.1109/compsc.2014.7032683>

-
- [2] Rashinkar, P.G. and Guinde, N. (2018) Signal Analysis of Software Defined Radio on Field Programmable Gate Array. 2018 *Second International Conference on Green Computing and Internet of Things (ICGCIoT)*, Bangalore, 16-18 August 2018, 268-271. <https://doi.org/10.1109/icgciot.2018.8753064>
 - [3] 张鹏辉, 张翠翠, 赵耀, 等. 基于 ZYNQ-7000 FPGA 和 AD9361 的软件无线电平台设计[J]. 实验技术与理, 2019, 36(8): 85-93.
 - [4] 孔春雷, 王泽昊. 基于软件无线电的测距系统[J]. 数字技术与应用, 2019, 37(7): 83-84.
 - [5] 唐晗呈, 杨涛. 基于软件无线电的调频连续波雷达实现[J]. 电子技术与软件工程, 2020(17): 97-99.
 - [6] 朱童, 艾冬生, 张景鹏, 等. 基于 AD9361 芯片的弹载一体化射频前端[J]. 探测与控制学报, 2021, 43(3): 64-69.
 - [7] 王小龙, 姚尧, 吴忠秉. 基于 MicroBlaze 的双片 AD9361 控制系统的设计与实现[J]. 电子质量, 2022(6): 173-175, 183.
 - [8] 李世博. 基于 AD9361 的零中频发射前端的研究与设计[J]. 通信电源技术, 2023, 40(7): 49-51.
 - [9] 禹永植, 夏泽宇, 刘宇. 一种搭载 FPGA 和 AD9361 的软件无线电平台实现方法[J]. 应用科技, 2023, 50(4): 90-95.
 - [10] 李珊珊. 基于 AD9361 的无线电通信应用分析[J]. 航空维修与工程, 2022(8): 60-63.
 - [11] Tian, F., Li, H. and Yuan, L. (2019) Design and Implementation of Ad9361-Based Software Radio Receiver. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019, Article No. 95. <https://doi.org/10.1186/s13638-019-1420-6>