

CW雷达多普勒测速实验教学装置设计

孙玉国

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海

收稿日期: 2022年5月11日; 录用日期: 2022年6月9日; 发布日期: 2022年6月16日

摘要

根据多普勒效应设计了一款连续波(Continuous Wave, CW)雷达测速实验装置。采用10.525 GHz X波段雷达收发模块接收回波信号, 经混频器输出中频信号。利用仪用放大器AD620对中频信号进行放大, 由16位数据采集板卡完成数据采集。采用快速傅里叶变换FFT识别中频信号频率, 进而得到多普勒频率和目标径向运动速度。利用步进电机和丝杆螺母机构搭建了运动控制实验平台, 实验结果表明低速目标径向运动速度测试误差小于1%。以期用于《大学物理》和《通信电子线路》等课程的实验教学演示。

关键词

雷达测速, 多普勒效应, 中频信号, 快速傅里叶变换, 实验教学

Experimental Device Design of CW Doppler Radar Velocity Measurement

Yuguo Sun

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: May 11th, 2022; accepted: Jun. 9th, 2022; published: Jun. 16th, 2022

Abstract

An experimental device for target speed measurement based on continuous radar's Doppler effect was designed. The radar echo signal was collected by a radar transceiver with 10.525 GHz center frequency. The intermediate frequency (IF) signal was generated by a mixer and amplified by AD620, and the data acquisition of the IF signal was completed by 16-bit high precision ADC. The frequency of the IF signal was identified by Fast Fourier Transform (FFT); the Doppler frequency and target radial velocity were then obtained. An experimental platform was built by using the structure of stepping motor and screw nut. The experimental results show that the measurement

error of target radial motion speed is less than 1%. The experimental device is expected to be used in the course teaching demonstration, such as *College Physics and Communication Electronic Circuit*.

Keywords

Radar Velocity Measurement, Doppler Effect, IF Signal, Fast Fourier Transform, Experimental Teaching

Copyright © 2022 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

多普勒雷达在智能汽车驾驶、弹道导弹拦截,舰船运动目标跟踪定位等领域有重要应用[1] [2] [3] [4]。雷达的多普勒效应是《大学物理》《通信电子线路》和《信号与系统》课程均有涉及的一个重要概念[5] [6]。目前,在课堂教学环节对多普勒效应的讲解尚多拘泥于数学公式的推导与分析,学员难以对多普勒效应有一个直观的理解和认识。

针对上述理论教学中存在的问题,本文基于 10.525 GHz X 波段雷达收发(Transceiver)模块、步进电机、电动滑台、数据采集板卡 DAQ、仪用放大器和工控机 IPC 等硬件平台,并结合 FFT 频谱分析方法搭建了一款 CW 雷达中频(Intermediate Frequency, IF)信号产生、放大、采集与处理的实验系统。直观揭示了 CW 雷达多普勒测速的底层细节问题,具有较好的实验教学演示效果。实验结果表明,低速目标径向运动速度的测试结果与理论计算值的相对误差小于 1%。此外,该实验装置采用开放式架构,可供学员进行二次开发,有利于提高综合利用专业知识解决工程问题的能力。

2. CW 雷达多普勒测速原理

CW 雷达测速的基本原理是大家所熟知的多普勒效应:当运动目标接近雷达时,回波信号频率相对于雷达发射信号频率变高;目标远离雷达时,回波信号频率变小。雷达发射信号与回波信号频率的差值定义为多普勒频率(Doppler Frequency):

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (1)$$

式中, v_r 为目标相对于雷达的径向速度, λ 为雷达发射波波长。一般约定目标远离雷达时 f_d 为负,目标接近雷达时 f_d 为正。可见,在雷达发射波长 λ 已知的情况下,若能测得多普勒频率 f_d 即可通过上式得到目标的径向运动速度 v_r 。亦可看出,在 CW 雷达发射波长一定的情况下,测速精度主要取决于普勒频率 f_d 的识别精度。

设 CW 测速雷达发出的单频电磁波信号为:

$$u_t(t) = A_m \cos(\omega_c t) \quad (2)$$

式中, A_m 为雷达发射电磁波信号幅值, ω_c 为发射电磁波信号角频率。设其初始相位为零并不影响推导结论。探测目标反射回来的回波信号:

$$u_r(t) = A_m \cos(\omega_r t + \varphi) \quad (3)$$

式中， A_m 为回波信号幅值， ω_r 为回波信号角频率， φ 为回波信号相对于发射信号的相位差。将回波信号连与发射信号输入到相乘器，设相乘系数为 1，有：

$$A_m \cos(\omega_c t) \cdot A_m \cos(\omega_r t + \varphi) = \frac{A_m \cdot A_m}{2} \{ [\cos(\omega_c + \omega_r)t + \varphi] + [\cos(\omega_r - \omega_c)t + \varphi] \} \quad (4)$$

式中，第一项为和频分量(高频分量)，可由 LPF 低通滤波器滤除；第二项为差频分量(低频分量)，可由低通滤波器保留。在雷达专业领域，该差频分量又被称作中频 IF 信号。

完整的 CW 雷达多普勒测速数据流程如图 1 所示：IF 信号的主瓣频率即为多普勒频率，可由 FFT 运算得到，带入公式(1)即可换算出目标相对于雷达的径向运动速度。需要说明的是，雷达回波信号不可避免的含有环境噪声，需要在雷达接收天线后端接入低噪声的小信号谐振放大器。

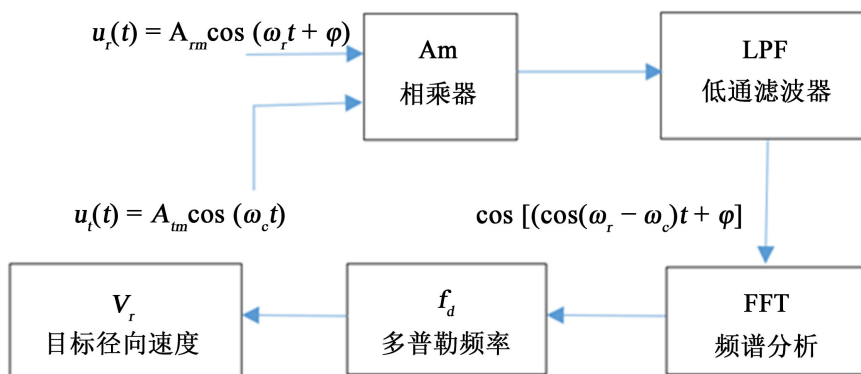


Figure 1. CW Doppler radar velocity measurement architecture
图 1. CW 多普勒雷达测速原理框图

3. CW 雷达多普勒测速实验系统

本文设计的 CW 雷达多普勒测速系统如图 2 所示：STC15W4 单片机通过 Timer 中断模式生成不同频率的脉冲信号输入到步进电机驱动器，以驱动步进电机按照不同转速运动。步进电机带动丝杆螺母机构做变速往复直线运动，一块圆形钢板固定在丝杆螺母机构的工作台作为被探测目标，随着丝杆的运动而运动。中心频率为 10.525 GHz 的 X 波段 CW 雷达收发模块固定在实验台上，向目标发射单频连续雷达波，并接收目标反射回来的回波信号。

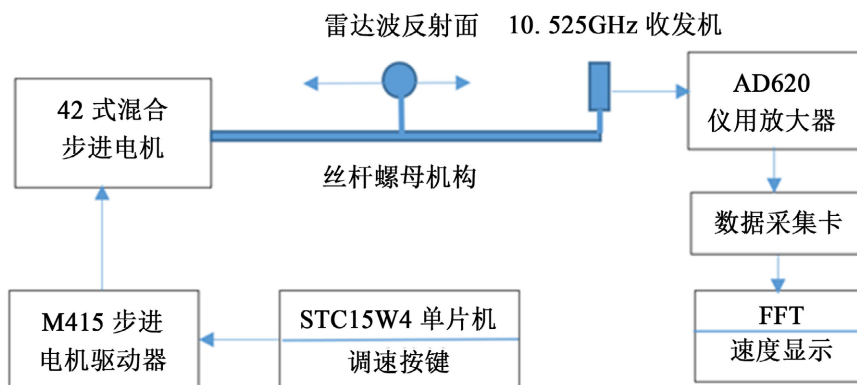


Figure 2. CW radar velocity measurement experimental device diagram
图 2. CW 雷达多普勒测速实验系统框图

雷达发射信号与回波信号经混频器(Mixer)输出的 IF 信号经仪用放大器 AD620 放大后, 由数据采集卡完成数据采集, 经 FFT 变换得到 IF 信号的主瓣频率即为多普勒频率。此外, 可根据回波信号的振幅变化趋势判断目标的运动方向: 振幅逐渐变大表明目标向着雷达的方向运动, 反之亦然。



Figure 3. IF signal amplification and acquisition architecture
图 3. IF 信号放大与采集系统框图

鉴于本文采用的 10.525 GHz CW 雷达收发模块功率仅有 50 mW, 有效探测距离为 5 米左右, 输出的 IF 信号非常微弱。经实际测试, IF 信号带直流偏置, 峰-峰值约为 10 mV, 因此需要采用高精度仪用运算放大器对其进行放大。如图 3 所示, 本文采用的是 AD620 仪用放大器, 经 100 倍放大转化为 1.0 V 左右的电压信号, 再输入到 USB 接口的 16 位的高精度数据采集板卡完成数据采集。数据采集与 FFT 运算程序均在 IPC 上采用 VC++ 2017 调用 DLL 动态链接库的模式编写, 可实现 IF 信号的波形与频谱显示及数据保存, 带入公式(1)即可得到运动目标的径向速度。所设计的雷达测速实验装置主要参数如表 1 所示。

Table 1. CW radar velocity measurement device specification
表 1. CW 雷达测速实验装置参数

参数	数值	单位
丝杆螺距	4.0	mm
电机转速	120~1200	rpm
雷达波长	28.50	mm
雷达频率	10.525	GHz
雷达 T/R 功率	50	mW
雷达探测距离	5.0	m
IF 信号放大倍数	100	/
IF 信号采样频率	100	Hz

4. 实验结果与分析

在实验过程中将步进电机转速设定在 300 rpm, 通过按键控制电机的启停与转向。目标物匀速远离雷达约 3 秒、静止约 3 秒再匀速靠近雷达, 采集到的经 100 倍放大后的 IF 信号波形如图 4 所示。可见, IF 信号有 1.7 V 左右的直流偏置。当目标远离雷达时, IF 信号幅值变小; 相对静止时, IF 信号近似为直线; 匀速接近雷达时 IF 信号幅值逐渐变大。这符合雷达方程所揭示的规律, 雷达反射波幅值近似与探测目标距离的平方成反比[1]。此外, IF 信号有明显的高频毛刺现象, 这是由雷达回波噪声与电动滑台抖动引起。

去掉直流偏置, 对 IF 信号进行 1024 点 FFT 运算, 得到的信号频谱如图 5 所示。其主瓣频率为 1.40 Hz, 即多普勒频率 $f_d = 1.40$ Hz, 带入公式(1)得到径向运动速度:

$$v_r = f_d \cdot \frac{\lambda}{2} = 1.40 \times \frac{28.50}{2} = 19.95(\text{mm/s}) \quad (5)$$

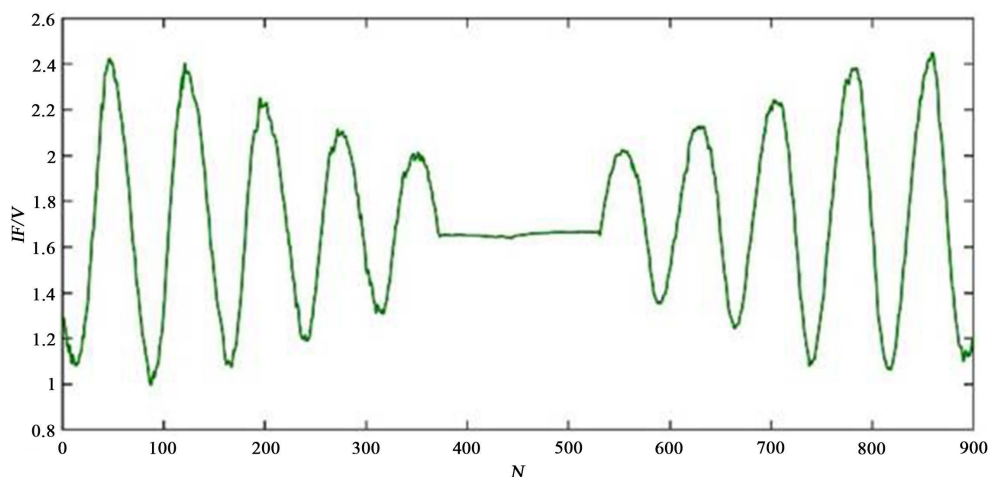


Figure 4. IF signal ($\times 100$) with DC bias
图 4. 放大 100 倍带有直流偏置的 IF 信号

根据实验台运动控制机构参数进行核算：步进电机转速为 300 rpm，丝杆螺距为 4.0 mm。可得目标物径向速度的理论计算值为： $300/60 \times 4.0 = 20.0$ mm/s，测试误差为 $(20.0 - 19.95)/20.0 \times 100\% = 0.25\%$ 。

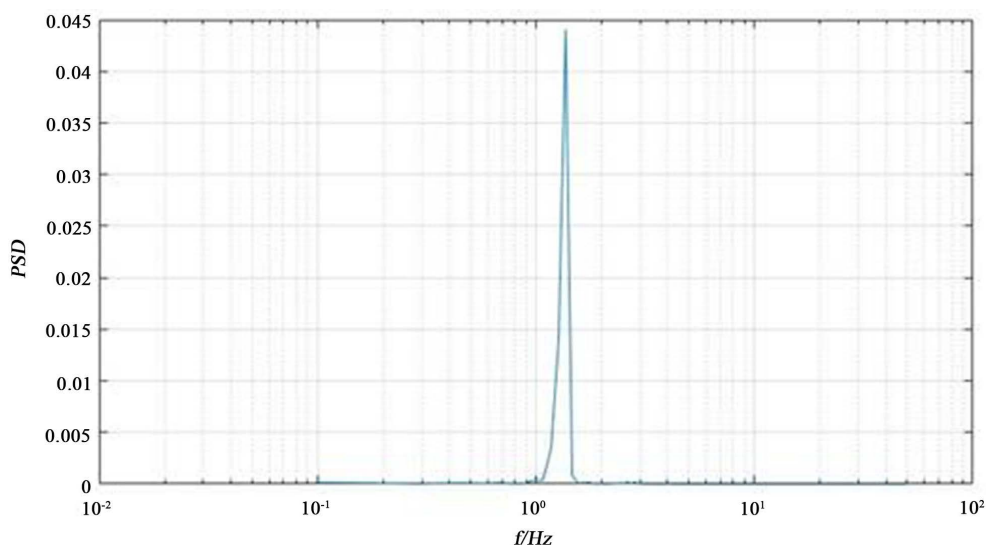


Figure 5. FFT spectrum of radar IF signal
图 5. 雷达 IF 信号的 FFT 频谱曲线

测速误差主要由 FFT 分析的栅栏效应以及电动滑台机械运动误差引起。若要获得目标的瞬时运动速度，可对雷达 IF 信号进行短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)，即可得到每一时刻的多普勒频率。目标运动 9 秒的 STFT 结果如图 6 所示，可见在 5 s 附近的多普勒频率出现明显下降(塌陷)，这恰好对应目标从匀速运动状态切换到停止状态。

5. 结束语

本文设计的 10.525 GHz CW 多普勒雷达测速实验教学装置主要包括丝杆螺母运动控制模块和雷达 IF 信号采集与处理模块，实验表明对低速目标的运动速度测试误差小于 1%。所设计的实验装置涵盖了单片机

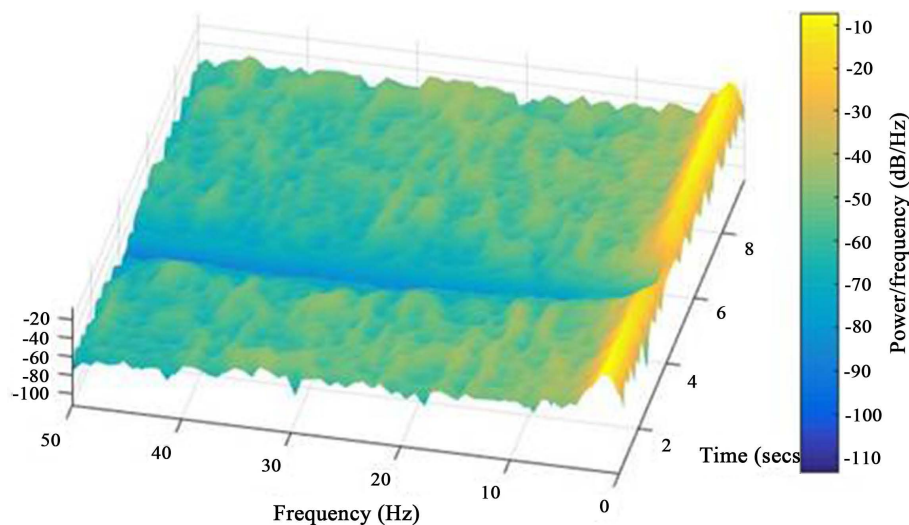


Figure 6. SFFT cloud image of radar IF signal
图 6. 雷达 IF 信号的 SFFT 云图

Timer 中断编程, 步进电机控制, VC++编程, FFT 分析, 雷达混频器与 IF 信号的调理及其采集等诸多知识点, 有助于培养学生综合利用专业知识解决实际工程问题的能力, 具有较好的实验教学效果。

该实验装置采用开放式架构, 在今后的工作中将增加诸如目标表面材料对雷达波反射强度的影响、电磁噪声对测试精度的影响等实验科目。

参考文献

- [1] Merrill I. Skolnik. 雷达系统导论(英文版) [M]. 第 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2007: 60-62.
- [2] Victor C. Chen. 雷达中的微多普勒效应[M]. 吴顺君, 杜兰, 刘宏伟, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 56-57.
- [3] 孙玉国, 吴立鑫. 目标振动微多普勒效应教学实验的设计[J]. 物理实验, 38(8): 6-8.
- [4] 申泽邦, 雍宾宾, 周庆国, 等. 无人驾驶原理与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019: 5-6.
- [5] 胡宴如, 耿苏燕. 高频电子线路[M]. 第 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2018: 101-102.
- [6] 奥本海默. 信号与系统[M]. 第 2 版. 北京: 中国工信出版社, 2020: 89-90.