

引用本文:卿国能,朱正元,朱康奇,等.基于微波光子的多目标测距和测速技术[J].光通信技术,2025,49(1):74-80.

基于微波光子的多目标测距和测速技术

卿国能¹,朱正元²,朱康奇²,华楠²,张振荣^{1*},郑小平^{2*}

(1.广西大学 计算机与电子信息学院,南宁 530004;2.清华大学 电子工程系,北京 100084)

摘要:为了解决多啁啾线性调频波(LFMW)在多目标环境中测距和测速时出现的虚假目标问题,提出了一种基于微波光子学的多目标测距和测速方法。该方法通过使用三频率段 LFMW 来测量目标的距离和速度,并利用这些频段观测的不变性特征有效地排除错误目标。此外,还设计并建立了一个基于微波光子学的多目标测距和测速验证系统。该系统不仅能够实现上述功能,还在其架构中集成了一个基于现场可编程门阵列(FPGA)的信号处理平台。实验结果表明:对于模拟产生的最高速度达到 6 800 m/s 的 10 个测试目标的回波信号,该系统能够实现实时的运动参数测量,其中最大的测距与测速误差分别为 0.58 m 与 24 m/s。

关键词:多目标;距离和速度测量;微波光子;线性调频波

中图分类号:TN929.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)02-0074-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Multi-target ranging and velocity measurement technology based on microwave photonics

QING Guoneng¹, ZHU Zhengyuan², ZHU Kangqi², HUA Nan², ZHANG Zhenrong^{1*}, ZHENG Xiaoping^{2*}

(1.School of Computer, Electronic and Information, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To address the issue of false targets in multi-target environments when using multi-chirp linear frequency modulated wave (LFMW) for ranging and velocity measurement, a method based on microwave photonics for multi-target ranging and velocity measurement is proposed. This method uses three frequency bands of LFMW to measure the target's distance and velocity, and it effectively eliminates false targets by leveraging the invariant features observed across these frequency bands. Additionally, a multi-target ranging and velocity measurement verification system based on microwave photonics has been designed and established. This system not only achieves the aforementioned functions but also integrates a signal processing platform based on field-programmable gate arrays (FPGA) within its architecture. The experimental results show that for simulated echo signals from 10 test targets with the highest speed reaching 6 800 m/s, the system can achieve real-time motion parameter measurements, with maximum ranging and velocity errors of 0.58 m and 24 m/s.

Key words: multi-target, distance and velocity measurement, microwave photonics, linear frequency modulated wave

收稿日期:2024-03-20。

基金项目:国家自然科学基金项目(62127805)资助;广西重点研发计划项目(桂科 AB23075199)资助。

作者简介:卿国能(2000—),男,硕士研究生,现就读于广西大学计算机与电子信息学院电子与通信工程专业,主要从事高分辨率成像、收发机设计、波形设计与产生、信号实时处理等方面的研究工作。

* **通信作者 1:**张振荣(1976—),男,博士,教授,主要研究方向为通信网络及光纤传感技术。

* **通信作者 2:**郑小平(1965—),男,博士,教授,主要研究方向为光网络与微波光子学技术。



0 引言

随着科学技术的迅速发展,对多个动态目标的运动状态进行快速检测的需求日益增长^[1-3]。为了能够实时、准确地监测多目标^[4-6],必须高效而精确地估计每个目标的运动参数。由于线性调频波(LFMW)具有出色的距离分辨率和多普勒耐受性,基于 LFMW 的技术成为估计运动目标参数的首选方法^[7-8]。然而,为了进一步提高运动参数检测的准确性,通常需要增加信号的带宽和脉冲的持续时间^[9]。传统的探测技术受到电子瓶颈的限制,难以生成和处理高频的大带宽信号^[10],

这直接降低了运动参数的测量精度。相比之下,微波光子技术因其强大的大带宽信号生成和处理能力,被视为解决这一问题的有效途径。例如,CHENG H 等人^[11]利用 V 型 LFMW 作为发射信号,并通过选择马赫-曾德尔调制器(MZM)的偏置点,让输出光载波及其正负二阶边带占据主导地位,成功实现了 LFMW 的倍频效果,从而将距离和速度测量的分辨率提升了 2 倍。但是,这项研究主要集中在单目标测量上,未能解决多目标环境下错误目标识别的问题。ZHANG J 等人^[12]采用了偏振复用双驱动调制器来同时处理双波段 LFMW,他们基于双波段的观测不变性原则,有效地排除了错误目标,解决了多目标运动参数测量的难题。但是,该技术的应用范围有限,主要适用于速度较慢的车辆目标,不适用高速度的多个目标。

为了解决上述问题,本文提出一种基于微波光子的多目标测距和测速技术,该技术不仅能够提高测量精度,还能有效排除多目标场景下的错误目标。

1 多目标测距和测速技术原理

天线发射的三频段 LFMW 的时频图如图 1 所示。其中,蓝色实线为发射信号,其时域波形表示为

$$s_T(t) = \sum_{j=1}^3 s_{n,T}(t) = \sum_{j=1}^3 V_{n,T} \cos \left[2\pi \left(f_n t + \frac{1}{2} u_n t^2 \right) \right] \quad (1)$$

其中, t 表示时间, $0 < t < T$; $s_{n,T}(t)$ 表示三频段的 LFMW,频段 1 是上啁啾 LFMW,频段 2 和频段 3 是下啁啾 LFMW; u_n 表示 3 个 LFMW 的啁啾率, $u_n = B_n/T$,其中 T 表示脉冲宽度, B_n 表示三频段 LFMW 的带宽, $n=1,2,3$; $V_{n,T}$ 表示幅度, f_n 表示初始频率。

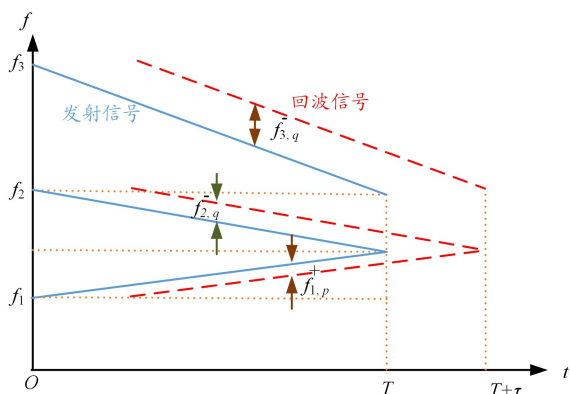


图 1 三频段 LFMW 收发信号时频图

发射的三频段线性调频波(LFMW)在经过第 i 个目标反射后,会在一段延迟后被接收天线接收到。这个延迟时间可以表示为

$$\tau_i(t) = \frac{2}{c} (R_i - v_i t) \quad (2)$$

其中, i 表示目标的序列数($i=1,2,\dots,N$), c 表示光速, R_i 和 v_i 分别表示目标对应的距离和速度。接收到的回波信号可以表示为

$$s_{\text{echo}}(t) = \sum_{i=1}^N s_T(t - \tau_i(t)) \quad (3)$$

图 1 中红色虚线表示第 i 个目标回波信号。回波信号和参考(发射)信号进行去啁啾处理,并对处理后的信号进行时频分析,可以准确得到上啁啾和下啁啾的去啁啾处理后的去啁啾频率。三频段 LFMW 的去啁啾频率可表示为

$$\bar{f}_{1,p}^+ = u_1 \frac{2R_i}{c} - \frac{2v_i}{\lambda_1} \quad (4)$$

$$\bar{f}_{2,q}^- = u_2 \frac{2R_i}{c} - \frac{2v_i}{\lambda_2} \quad (5)$$

$$\bar{f}_{3,q}^- = u_3 \frac{2R_i}{c} - \frac{2v_i}{\lambda_3} \quad (6)$$

其中, λ_n 为三频段信号的波长, $\lambda_n = c/f_n$; p, q 为目标序列, $p, q=1,2,\dots,N$ 。

在单目标情况下,每个频段仅存在一个去啁啾频率,通过联立式(4)和式(5)求解,可以直接获得该目标的距离和速度。然而,当有 N 个目标存在时,每个频段将产生 N 个不同的去啁啾频率。若将频段 1 与频段 2 的去啁啾频率配对,将会生成 N^2 组去啁啾频率对($\bar{f}_{1,p}^+$, $\bar{f}_{2,q}^-$)。利用式(4)和式(5)求解每一对去啁啾频率,理论上可以获得 N^2 个目标的距离和速度信息。这其中包括了 N 个真实的测量值和 $N^2 - N$ 个错误的目标数据。

为了筛选出真实的 N 个目标,本文引入第三个频段的去啁啾频率,比如将频段 1 与频段 3 的频率结合。通过联立使用式(4)和式(6),同样可以求得 N^2 个目标的信息。考虑到真实目标的实际存在性,无论是采用哪 2 个频段的去啁啾频率组合,最终的结果中总会包含相同的 N 个真实目标,它们的距离和速度测量值一致。相反,由于各频段的频率间隔 u_i 和波长 λ_i 不同,不同频段组合所计算出的虚假目标的位置和速度会有差异,以此识别并提取真实目标的数据。这一方法被称为“三频段观测不变性”。

2 多目标测距和测速验证系统

多目标测距和测速验证系统示意图如图 2 所示。系统的主要硬件配置包括:现场可编程门阵列(FP-

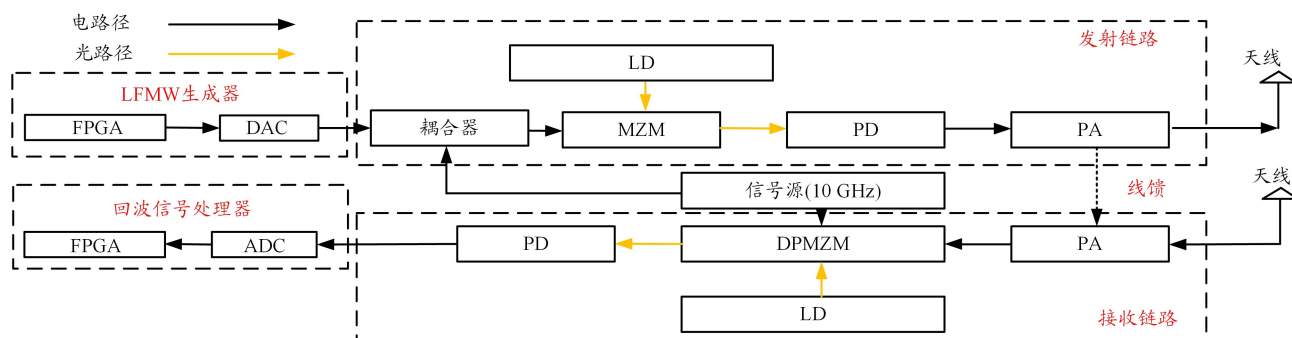


图2 多目标测距和测速验证系统

GA)、数字/模拟转换器(DAC)、模拟/数字转换器(ADC)、耦合器、MZM、双平行马赫-曾德尔调制器(DPMZM)、激光二极管(LD)、LFMW生成器、光电探测器(PD)以及射频功率放大器(PA)等核心组件。

系统被划分为4个主要模块:LFMW生成器、发射链路、接收链路和回波信号处理器。LFMW生成器负责生成三频段LFMW中频信号,并将这些信号传递给发射链路。发射链路通过光学上变频技术生成准备发射的射频信号。接收链路则负责捕捉回波射频信号,并通过光学下变频技术处理,最终输出中频回波信号,随后被送入回波信号处理器。回波信号处理器提取目标的距离和速度信息。

2.1 LFMW生成器

LFMW生成器原理框图如图3所示。计算机依据式(1)生成三频段LFMW中频信号的波形数据,并通过网络接口将这些波形数据传输给FPGA。FPGA接收数据后,将其存入内部存储单元。随后,DAC控制器读取存储单元中的数据,并将其传递给DAC芯片完成数/模转换,最终产生所需的三频段LFMW中频信号。此外,DAC控制器还会输出同步信号,确保收发过程的时间同步。

2.2 发射链路和接收链路

在发射链路中,LFMW生成器产生的三频段LFMW中频信号与本振信号(具有10 GHz载频)经电耦合器耦合后通过MZM调制到光信号上。MZM输出光信号的电场强度可表示为

$$E_{up}(t) = \sqrt{P_0} \exp(j\omega_0 t) \times$$

$$\cos\left(\frac{m_{BT} s_{BT}(t)}{2} + \frac{m_{LO} s_{LO}(t)}{2}\right) \quad (7)$$

其中, $s_{BT}(t)$ 为待发射的中频信号, P_0 为激光源输出光功率, ω_0 为光载波角频率, m_{BT} 、 m_{LO} 分别为发射中频信号调制度、本振调制度。本振信号 $s_{LO}(t)$ 可表示为

$$s_{LO}(t) = V_{LO} \cos(2\pi f_{LO} t) \quad (8)$$

其中, V_{LO} 表示本振信号幅度, f_{LO} 表示本振信号频率。

PD将光信号转换成电信号,经PA放大后,得到系统的发射射频信号 $s_{RT}(t)$ 为

$$s_{RT}(t) = \sum_{i=1}^3 s_{i,RT}(t) \quad (9)$$

发射射频信号 $s_{RT}(t)$ 经过第 i 个目标反射和一段时间延迟,由接收天线捕获。

在接收链路中,回波信号与本振信号(同样具有10 GHz载频)一起调制在DPMZM上。DPMZM的上臂、下臂与第三偏置点的相位分别是 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、0。此时,光信号的电场强度可表示为

$$E_{dom}(t) = \sqrt{P_0} \exp(j\omega_0 t) \times \left[\cos\left(\frac{m_{echo} s_{echo}(t)}{2} + \frac{\pi}{4}\right) + \sin\left(\frac{m_{LO} s_{LO}(t)}{2}\right) \right] \quad (10)$$

其中, m_{echo} 为回波信号调制度。经过PD可将光信号转换成电信号,得到系统的接收中频回波信号 $s_{BR}(t)$ 的表达式为

$$s_{BR}(t) = s_{echo}(t) s_{LO}(t) = \sum_{i=1}^N s_{BT}(t - \tau_i(t)) \cos(2\pi f_{LO} \tau_i(t)) \quad (11)$$

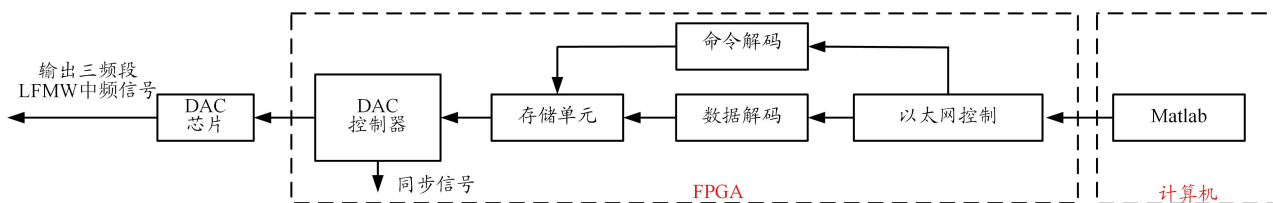


图3 LFMW生成器原理框图

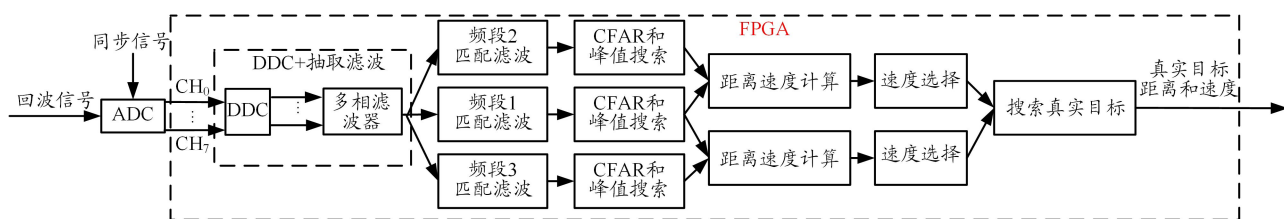


图4 回波信号处理器原理框图

2.3 回波信号处理器

回波信号处理器原理框图如图4所示。处理具体过程如下:

1)ADC采样。该部分负责采集回波数据,将模拟信号转换为数字信号。ADC芯片型号为AD9176,配置的采样率为3 GHz。模/数转换后的数字信号通过JESD204B协议传输至FPGA,原本以每秒钟30亿次采样的信号(3GSPS),被转换成了8路并行数据流,相应的工作时钟频率为375 MHz。

2)DDC+抽取滤波。首先将回波中频信号搬移到接近零频的位置,接着通过抽取滤波去除带外噪声,同时减少后续处理的数据量。输入数据流为8路并行数据,运行在375 MHz的时钟频率上。输出信号则为1路经过16倍抽取和滤波的数据流,工作在187.5 MHz的时钟频率下。抽取滤波架构采用了高速并行多相滤波结构^[14],利用多相分解技术实现高速数字有限冲激响应(FIR)滤波器的并行化,以满足实时处理的需求。

3)匹配滤波。抽取滤波后的数据流与三频段LFMW分别进行匹配滤波,以获取回波与发射的三频段线性调频信号之间的延迟,进而计算出去啁啾频率。频率匹配滤波法的结构示意图如图5所示。该方法的滤波过程主要包含以下步骤:首先,对输入信号序列执行快速傅里叶变换(FFT),以转换到频域;然后,将得到的频域序列与匹配滤波器的频域响应(匹配函数)及窗函数(用来抑制旁瓣)的频域响应依次相乘;最后,对相乘后得到的频域序列应用逆快速傅里叶变换(IFFT),将其转换回时域,从而获得匹配滤波处理后的输出信号。FPGA以流水线(Pipelined Streaming)模式运行,支持持续输入数据。

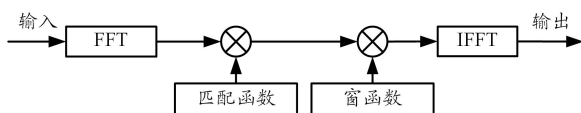


图5 频率匹配滤波法结构示意图

4)恒虚警率(CFAR)和峰值搜索。对匹配滤波后的数据实施CFAR处理和峰值搜索,以便在保持高目标检测概率的同时定位目标峰值所在频率单元。本系

统的CFAR算法采用的是平均值-恒虚警方法^[17],该算法通过计算参考单元的平均功率来设定杂波门限,将检测单元与该门限对比,若检测单元的功率高于门限,则认为检测到目标;反之,则未检测到目标。CFAR处理后能确定目标位于某一频率范围内的大致位置,但无法精确指出峰值的具体位置。因此,峰值搜索步骤旨在精确定位峰值,从而识别出确切的目标信号。

5)距离、速度计算和速度选择。一旦获取了目标信号,即可利用式(4)和式(5)计算出一组目标的距离和速度值;同样地,使用式(4)和式(6)也能求得另一组距离和速度值。此时,计算出的目标距离、速度中可能包含虚假目标,为了缩短后续搜索真实目标所需的时间,可以通过速度选择剔除错误目标。

6)搜索真实目标。在真实目标的识别过程中,需要比较2组目标的距离和速度值。如果在2组目标中发现距离和速度均匹配的目标(实践中,距离和速度不需要完全相同,只要它们之间的差异在预定的误差范围内即可),则这些目标被认定为真实目标。在FPGA实现中,2组计算结果分别存储在2组寄存器内,系统会遍历所有目标以执行对比。当脉冲重复周期(PRT)较长时,目标测距范围会增大,导致产生大量数据,这可能超出FPGA的资源 and 计算能力。为此,本文采取接收脉冲分段处理和流水线设计策略以提升实时处理能力。例如,对于检测600 km范围内目标的情况,若采样频率为200 MHz,采样点数将达到 2×10^5 。为了降低FPGA处理这些大量数据所需的存储资源和时间开销,本文将600 km范围划分为100个6 km的小段,每次仅处理一个6 km范围内的数据,即每次处理约 2×10^3 个数据点。这种方法显著减少了计算时间和存储需求。本文将每个划分的小段称为一个“距离门”(一帧数据)。FPGA接收机架构采用了流水线设计(其输入输出传输时序如图6所示),支持不间断的数据输入,每经过时间 T_0 输出一帧数据的处理结果。假设 N 帧数据的总时长为 T_1 ,从输入第一帧数据开始计时,只需 $T_1 + T_0$ 的时间就能完成所有帧数据的计算,实现大范围目标的有效测量。

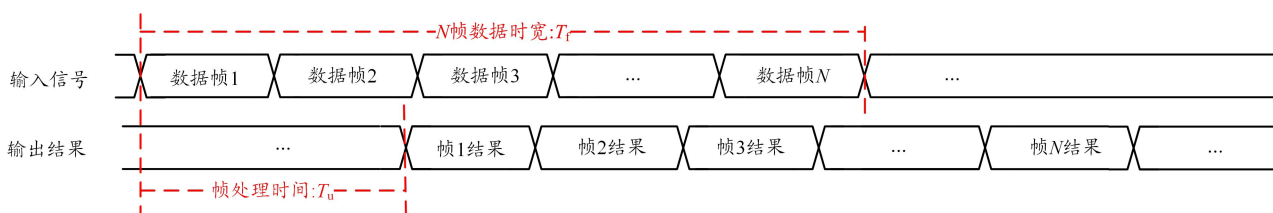


图6 流水线设计输入输出传输时序

3 实验验证与结果分析

为了评估所提出的方法在多目标距离和速度测量方面的性能,本文基于图2中的系统示意图,设计了一个实验系统如图7所示。此实验系统中,FPGA选用Xilinx公司的KCU105型号,而AD/DA子卡则选用RJIBI公司提供的FMC子卡,支持2路3GSPS ADC和1路6GSPS DAC。在发射链路中,使用了富士通公司的光纤强度调制器FTM7938EZ,以及Santec公司的激光源TSL550,后者具有典型的400 kHz线宽值。实验过程中,激光源产生的功率为15 dBm、波长为1 550 nm的光信号被注入到MZM中。接收链路部分负责实现光子下变频功能,其输出的中频回波信号会被送入ADC进行采集。

根据式(1)生成的三频段 LFMW 中频信号是由加载在 FPGA 上的 DAC 扩展板产生的。示波器采集到的



图7 实验系统图

DAC 输出三频段 LFMW 中频信号如图8所示。在图8(a)中,中频信号的时宽和峰峰值分别为21.845 μ s和480 mV;从图8(b)和图8(c)可以看出,三频段 LFMW 的初始频率分别为310、350、390 MHz,且频段1~3的带宽分别为20、20、40 MHz。这表明产生的信号符合发射的三频段 LFMW 特征。

3.1 单目标检测

首先,测试系统对单个目标同时进行距离和速度的测量。根据图2,将发射链路输出直接连接到接收链路机箱输入(线馈),此时 $\tau_i(t)=0$ 。将 $\tau_i(t)=0$ 代入式(11)可得,发射的三频段 LFMW 中频信号与回波中频信号之间存在明确的关系,即接收到的中频回波信号频谱等同于发射的三频带线性调频波信号频谱。基于这一点,本文利用式(11)来生成带有目标距离和速度信息的三频段线性调频波中频发射信号,模拟并叠加了目标运动特性的回波信号。

FPGA 通过集成逻辑分析仪捕获 ADC 采集的回波中频信号,如图9所示。图9(a)中,采集的回波中频信号时宽和峰峰值分别为43 μ s和20 mV;从图9(b)和图9(c)可以看出,回波信号的频宽约为80 MHz,并由3个不同频段的 LFMW 组成。FPGA 对接收到的回波信号进行处理,计算出去啁啾频率 $f_{1,i}^+$ 、 $f_{2,i}^-$ 、 $f_{3,i}^-$,然后依据式(4)和式(5)计算出目标的距离和速度。

为了评估单目标测距和测速的误差情况,实验中保持目标速度恒定为34 000 m/s,距离为200~3 200 m,每隔200 m变化一次,测得的距离平均误差为43.27 cm。

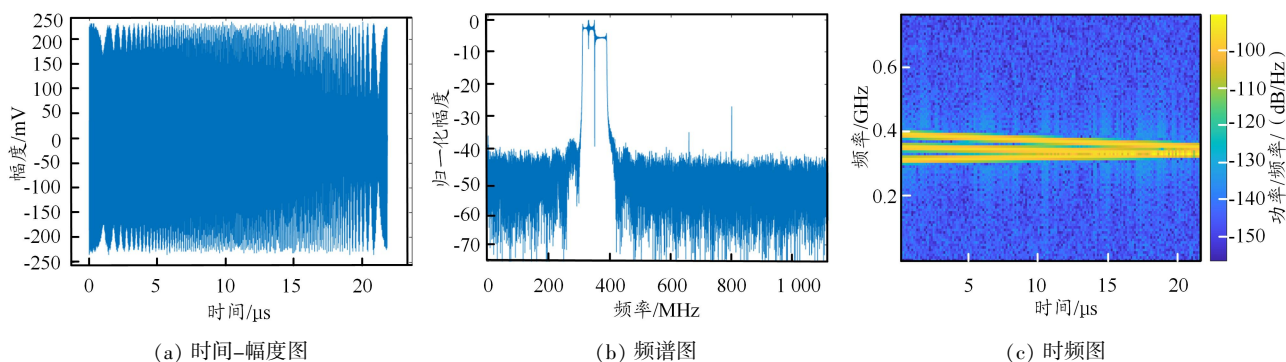


图8 FPGA+DAC产生的三频段 LFMW 中频信号

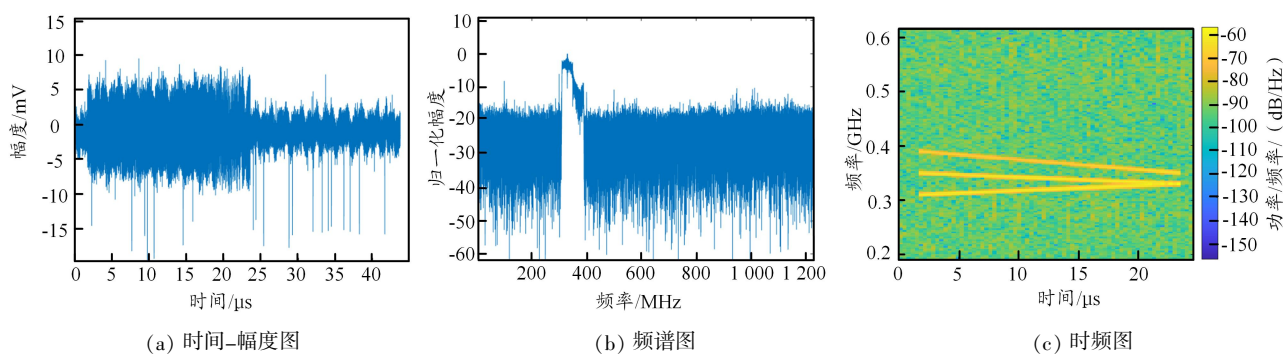


图9 FPGA+ADC采集的中频回波信号

接着,在保持距离固定为 2 000 m 的情况下,目标速度从 3 400 m/s 变化至 68 000 m/s,每次增加 3 400 m/s,测得的速度平均误差为 12 m/s。

3.2 多目标检测

为了验证该算法在多目标场景下的性能,本文设置了一个包含 10 个运动目标的复杂场景,目标检测结果如表 1 所示。可以看出,检测距离、速度的最大误差分别为 0.58 m、24 m/s。

表 1 目标检测结果

目标	真实距离/ m	真实速度/ (m/s)	估计距离/m	估计速度/ (m/s)	距离误差/ m	速度误差/ (m/s)
目标 1	200	3 400	199.44	3 415	0.56	15
目标 2	1 000	1 700	1 000.22	1 712	0.22	12
目标 3	1 300	2 720	1 299.83	2 741	0.17	21
目标 4	1 600	5 100	1 599.45	5 118	0.55	18
目标 5	1 900	3 400	1 900.24	3 380	0.24	20
目标 6	2 200	0	2 200.20	9	0.20	9
目标 7	2 500	2 380	2 499.82	2 386	0.18	6
目标 8	3 000	6 800	3 000.27	6 822	0.27	22
目标 9	3 600	1 700	3 599.42	1 676	0.58	24
目标 10	3 900	3 400	3 899.43	3 380	0.57	20

根据式(11),本文模拟产生了具有复杂运动特性的多目标回波信号。匹配滤波输出和 CFAR 估计门限的结果如图 10 所示。图中,红色线条表示回波信号经过匹配滤波后的输出,紫色线条表示 CFAR 算法根据回波信号估计得到的噪声门限。

从图 10 可以看出,在 3 个频段上,匹配滤波输出的幅度在 10 个特定位置均超过了 CFAR 估计的噪声门限幅度,这表明在这 10 个位置附近存在目标。因此,实验结果证明了该算法能够有效地实现多个运动目标的距离和速度测量。

对于频段 1,通过匹配滤波输出结合 CFAR 和峰值搜索,得到了 10 个目标的去啁啾信号 $\hat{f}_{1,p}^+$ ($p=1,2,\dots,10$)。类似地,对于频段 2 和频段 3,分别得到了目标的去啁啾信号 $\hat{f}_{2,q}^-, \hat{f}_{3,q}^-$ ($q=1,2,\dots,10$)。根据式(4)~式(6),本文可以获得 2 组目标测距和测速结果。随后,通过对速度进行匹配,筛选出不符合场景条件的速度目标。

多目标检测结果如图 11 所示。可以看出,频段 1 与频段 2 组合求得的目标数量远超过 10 个,表明 LFMW 测距和测速方法的测量结果中存在错误目标。同样,频段 1 与频段 3 组合求得的目标数量也超过 10 个,进一步证实了使用该方法测距和测速会引入错误目标的问题。

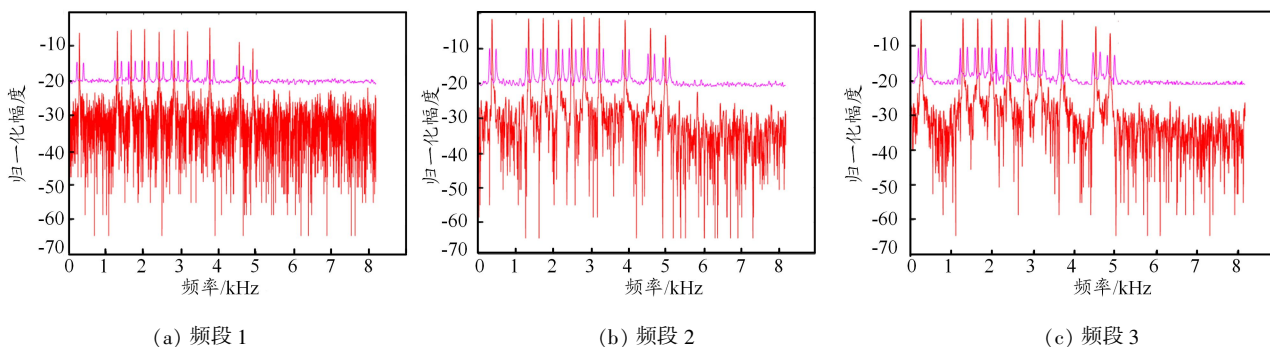


图 10 匹配滤波输出和 CFAR 估计门限结果

卿国能,朱正元,朱康奇,等: 基于微波光子的多目标测距和测速技术

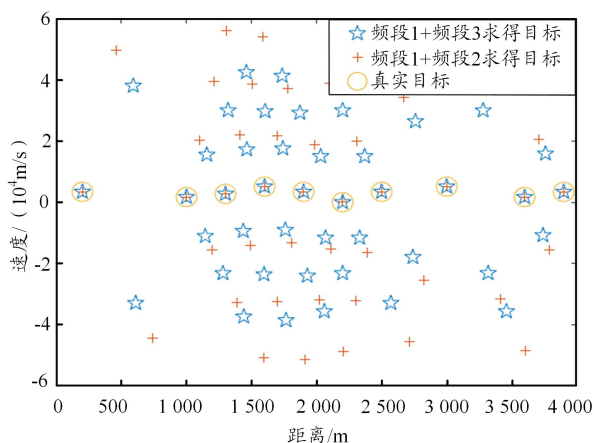


图 11 多目标检测结果

为了解决这一问题,本文利用三频段观测的不变性特性。根据理论,错误目标的距离和速度在不同频段组合下会发生变化,而真实目标的距离和速度则保持不变。通过对比 2 组目标的距离和速度,本文发现在 2 组结果中有 10 个目标的距离和速度高度相似,这 10 个目标即为真实目标。

4 结束语

为了实现多目标运动参数的实时测量,本文提出了一种基于微波光子学的多目标测距和测速方法。该方法利用三频段观测的不变性,实现了错误目标的有效剔除。同时,设计了用于多目标的测距和测速验证系统,该系统包括 LFMW 生成器、发射链路、接收链路和回波信号处理器。实验结果表明:对于模拟产生的最大速度达 68 000 m/s 的 10 个待测目标的回波信号,可实现运动参数的实时测量,最大测距与测速误差分别为 0.58 m 与 24 m/s。

参考文献:

- [1] HUANG X, ZHANG L, LI S, et al. Radar high speed small target detection based on keystone transform and linear canonical transform[J]. Digital Signal Processing, 2018, 82: 203–215.
- [2] FANG X, MIN R, CAO Z, et al. High-order RM and DFM correction method for long-time coherent integration of highly maneuvering target[J]. Signal Processing, 2019, 162: 221–233.
- [3] SUN Z, LI X, YI W, et al. A coherent detection and velocity estimation algorithm for the high-speed target based on the modified location rotation transform[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(7): 2346–2361.
- [4] LI X, CUI G, YI W, et al. Radar maneuvering target detection and

motion parameter estimation based on TRT-SGRFT[J]. Signal Processing, 2017, 133: 107–116.

[5] FU M, ZHANG Y, WU R, et al. Fast range and motion parameters estimation for maneuvering targets using time-reversal process[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55 (6): 3190–3206.

[6] SUN Z, LI X, CUI G, et al. Hypersonic target detection and velocity estimation in coherent radar system based on scaled radon Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(6): 6525–6540.

[7] LIANG D, JIANG L, CHEN Y. Multi-functional microwave photonic radar system for simultaneous distance and velocity measurement and high-resolution microwave imaging[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(20): 6470–6478.

[8] DING Y, GUO S, WU H, et al. Dual-chirp photonics-based radar for distance and velocity measurement based on compressive sensing[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(4): 1–7.

[9] ZHANG K, ZHAO S, LI Y, et al. Photonic-based dual-chirp microwave waveforms generation with multi-carrier frequency and large time-bandwidth product[J]. Optics Communications, 2020, 474: 126076–1–126076–9.

[10] LI Q, YANG D, MU X H, et al. Design of the L-band wideband LFM signal generator based on DDS and frequency multiplication[C]//IEEE. Proceedings of 2012 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT). Shenzhen: IEEE, 2012: 1–4.

[11] CHENG H, ZOU X, LU B, et al. High-resolution range and velocity measurement based on photonic LFM microwave signal generation and detection[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 11(1): 1–8.

[12] ZHANG J, JIANG W, YU Y, et al. Photonics-based simultaneous measurement of distance and velocity using multi-band LFM microwave signals with opposite chirps[J]. Optics Express, 2019, 27 (20): 27580–27591.

[13] FIRMANSYAH I, ADITYA S A, SETIADI B, et al. FPGA-based implementation of I/Q chirp signal generator using memory-based technique[C]//IEEE. Proceedings of 2022 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications. Bandung: IEEE, 2022: 78–82.

[14] 张维良,张彧,杨再初,等. 高速并行 FIR 滤波器的 FPGA 实现[J]. 系统工程与电子技术, 2009 (8): 1819–1822.

[15] ORDUYILMAZ A, KARA G, SERIN M, et al. Real-time pulse compression radar waveform generation and digital matched filtering[C]//IEEE. Proceedings of 2015 IEEE Radar Conference (RadarCon). Arlington, VA, USA: IEEE, 2015: 0426–0431.

[16] AZIM N, JUN W. Hardware optimized implementation of digital pulse compression based on FPGA [C]//IEEE. Proceedings of 2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET). Jakarta: IEEE, 2016: 48–53.

[17] RIHAN M Y, NOSSAIR Z B, MUBARAK R I. FPGA implementation for multiple CFAR algorithms[C]//IEEE. Proceedings of 2023 international telecommunications conference. Egypt: IEEE, 2023: 189–193.