

## 小型调频连续波雷达优化设计与性能分析\*

蒋 俊,穆文星,方 璐,刘 涛

(海军工程大学 电子工程学院,湖北 武汉 430033)

**摘 要:** 调频连续波(Frequency Modulation Continuous Wave, FMCW)雷达具有体积小、功耗低、低截获特性,在车载导航雷达、低截获雷达等领域应用广泛。借鉴麻省理工学院咖啡罐雷达的设计,使用模块化集成微波器件,改造完成了一套 S 波段小型 FMCW 雷达系统。该系统设计的简易阵列天线增加了信号增益;调整电子线路板以增强系统稳定性,改进音频接口使得应用更加广泛,使用距离多普勒(RD)方法测量目标参数,并在原来“停-走-停”静止模型的基础上增加了滑轨连续运动的改进 RD 成像算法,补偿了运动期间多普勒伸缩对合成孔径雷达(SAR)成像的影响。通过仿真和实测实验验证了该系统设计的合理性和可靠性。

**关键词:** 调频连续波;改进 RD 算法;SAR 成像;优化设计

中图分类号: TN958

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.223097

中文引用格式: 蒋俊,穆文星,方璐,等. 小型调频连续波雷达优化设计与性能分析[J]. 电子技术应用, 2022, 48(8): 6-12.

英文引用格式: Jiang Jun, Mu Wenxing, Fang Lu, et al. Optimized design and performance analysis of small FMCW radar[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(8): 6-12.

## Optimized design and performance analysis of small FMCW radar

Jiang Jun, Mu Wenxing, Fang Lu, Liu Tao

(School of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Small size, low power consumption and low probability of intercept are the characteristics of frequency modulation continuous wave(FMCW) radar. It is widely used in vehicle navigation radar, low probability of intercept radar and so on. In this paper, the system draws on the design of the MIT coffee can radar, a small S-BAND FMCW radar system is developed which draws on the design of the MIT coffee can radar and uses the modularized integrated microwave device. The system designs simple array antenna to increase the echo intensity, adjusts electronic circuit boards to enhance system stability, improves audio interface to make the system more widely used and uses Range Doppler(RD) algorithm to measure target velocity. Furthermore, a modified RD imaging algorithm was implemented to the original stop-and-go static model to compensate for the effect of Doppler stretching on synthetic aperture radar(SAR) imaging during motion. The simulation and experiment results show that the system is reasonable and reliable.

**Key words:** frequency modulation continuous wave; improved RD algorithm; SAR imaging; optimized design

## 0 引言

传统脉冲体制雷达重量体积大、能耗和成本高,只能在实验室、厂家或者部队等特定场地使用,难以因地制宜地在日常使用和大规模推广,比如应用于普通高等院校现场教学等。调频连续波(FMCW)雷达具有测距精度高、体积小、成本低和能耗低等优点,逐渐应用于日常生活的各个领域。2011 年麻省理工学院(MIT)林肯实验室开设了一门制作 FMCW 雷达的公开课程(Open Course Ware)<sup>[1-2]</sup>,通过搭建小雷达和一系列现场测试,培养学生对应用电磁学、射频(RF)电子设备、模拟电路、信号处理和其他相关主题的兴趣,取得非常好的效果。该 FMCW 合成孔径雷达(SAR)系统使用 Mini-Circuits 系列射频组

件,改造搭建一套载频 2.4 GHz、带宽 287 MHz 的 FMCW 雷达系统,用于教学实践,并引起了相关人员广泛的研究兴趣<sup>[3-5]</sup>。特别是宁波诺丁汉大学 A.Melnikov 教授团队,对 MIT 咖啡罐雷达进行深入研究改进。但目前还存在以下难题:(1)咖啡罐天线增益较低,信号回波强度较弱,影响后续的目标参数测量和成像结果。(2)原系统的调制电压面包板电路容易造成接触不良,性能不够稳定。(3)当前大部分笔记本电脑音频线插口麦克风和耳机插口合二为一,无法进行双声道采集,采集不到触发信号。(4)MIT 咖啡罐雷达测速只能通过距离除以时间得到目标运动的平均速度,无法计算出目标瞬时速度。(5)MIT 设计的咖啡罐雷达在合成孔径成像的实验中采用模拟脉冲 SAR“停-走-停”的方式成像。将雷达固定在等间隔位置采集目标信号,模拟脉冲 SAR 在收发

\* 基金项目:国家自然科学基金(62171452, 61771483)

信号过程中静止不动的假设,对采集信号进行数据处理,完成成像。MIT 咖啡罐雷达开源课程设计的雷达在成像采集数据过程非常复杂,成像效果不佳,不易于推广使用。

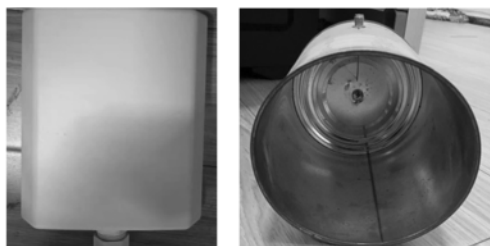
相比于 MIT 咖啡罐雷达,本文主要在收发天线、调制电压产生电路、电脑音频插口、测速功能、成像算法 5 个方面对连续波雷达进行优化和改进:(1) 该系统主要采用阵列贴片天线,相比于原来的咖啡罐天线,信号增益更强,增加该系统作用距离;(2) 原有的面包板电路容易造成接触不良,该系统调制电压产生电路采用电子线路板,性能更加稳定,在长时间外场试验中能够保证电路的稳定性;(3) 当前大部分笔记本电脑音频线插口麦克风和耳机插口合二为一,无法进行双声道采集,采集不到触发信号,该系统采购 AD-2R 立体声数字音频转换器解决该问题;(4) 该系统在分析数据时,提取某一时刻和相邻 32 个周期的信号,使用 RD 算法计算运动目标该时刻的瞬时径向速度;(5) 该系统使用改进传统 RD 算法,增加使用滑轨连续运动的 SAR 成像功能。

## 1 硬件优化设计

主要在收发天线、调制电压电路板、电脑音频插口 3 个方面进行优化设计。

### 1.1 收发天线改进

本套雷达系统在天线方面进行改进,改进阵列贴片天线与咖啡罐天线的实物图如图 1 所示。



(a) 阵列贴片天线

(b) 咖啡罐天线

图 1 阵列贴片天线与咖啡罐天线实物图

图 1(a)是 2×2 阵列贴片天线,图 1(b)是咖啡罐天线。贴片天线是当前应用比较广泛的经典 valid 宽频带微带天线,设计图如图 2 所示。

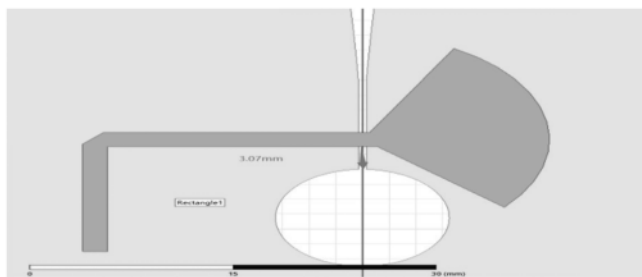
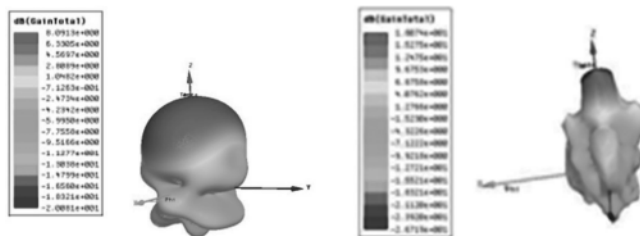


图 2 单一贴片天线设计图

两种天线的三维方向图如图 3 所示。图 3(a)是阵列贴片天线的三维方向图,图 3(b)是咖啡罐天线的三维方向图。

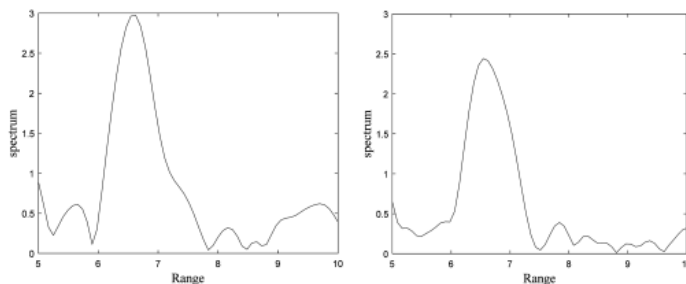


(a) 阵列贴片天线

(b) 咖啡罐天线

图 3 两种天线的三维方向图

分别使用两种天线对同一位置的同一目标测距,得到距离频谱如图 4 所示。



(a) 阵列贴片天线

(b) 咖啡罐天线

图 4 阵列贴片天线与咖啡罐天线对应同一目标距离频谱图

图 4(a)为阵列贴片天线对应的距离频谱图,频谱绝对值最大值约为 2.97;图 4(b)为咖啡罐天线对应的频谱图,频谱绝对值最大值约为 2.44。外场实测实验结果显示,使用阵列贴片天线时目标回波信号更强,即阵列贴片天线对信号增益更强,探测距离更远。

### 1.2 调制电压产生电路改进

调制系统以 16 引脚芯片 XR 2206 为核心,压控振荡器是美国 Mini-circuits 公司推出的 S 波段压控振荡器 ZX95-2536C-S+, 根据压控振荡器与调制电压的对应关系,通过控制调谐电压来控制所产生的发射信号的载频。调制电压集成电路图如图 5 所示。

MIT 雷达系统调制电压产生电路使用的是面包板,本系统使用的是电子线路板,具体实物图如图 6、图 7 所示。

如图 6 椭圆标记所示,MIT 咖啡罐雷达调制电压产生电路使用面包板电路,该电路稳定性不强,在长期外场实验中可能会出现因接线松动导致接触不良,影响实验效果。图 7 是电子线路板调制电压产生电路,电路连线非常清晰,有助于学生学习了解电路结构,在长时间外场实验中,电路性能比较稳定,效果良好。

### 1.3 电脑音频插口改进

为便于本套系统在多种场景下进行实验,使用笔记

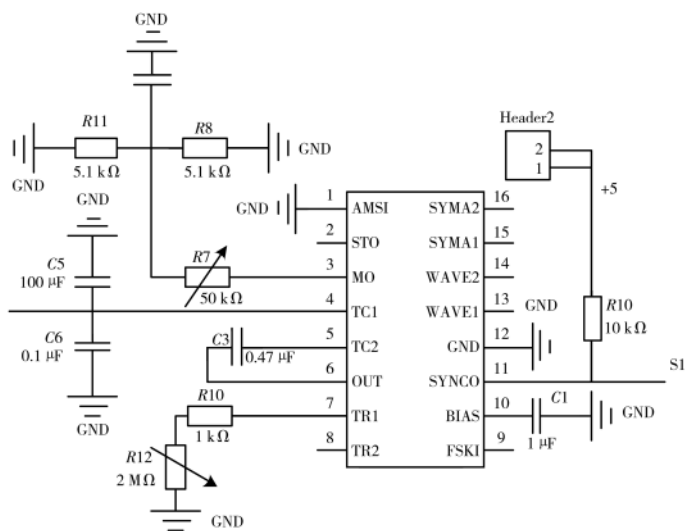


图5 调制电压集成电路图

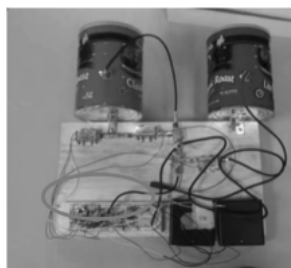


图6 面包板调制电压产生电路



图7 电子线路板调制电压产生电路

本电脑采集数据进行计算。当下大多数笔记本电脑追求轻便,将音频插口耳机和麦克风合二为一,使用电脑内置麦克风,插口用于耳机输出声音信号。本套系统利用音频采集软件将去调频后的回波信号转换为数字信号,麦克风插口是采集数据的关键,本系统为解决多数笔记本电脑无法采集数据的问题,采购AD-2R立体声数字音频转换器调音录音设备<sup>[2]</sup>。具体实物如图8所示。



图8 AD-2R 立体声数字音频转换器调音录音设备实物图

使用3.5mm音频线连接信号采集口和如图8所示音频输入接口,中频信号将传输到该设备,该设备将中频信号通过OTG传输到电脑USB接口。解决电脑音频插口问题,使本套系统在使用时更加方便,更易于推广使用。

## 2 算法优化设计

主要对原来的速度测量方法和静止状态的采样成像方法进行了改进。

### 2.1 改进速度测量方法

MIT咖啡罐雷达只能计算距离时间图,通过读取距离差和时间差计算目标平均运动速度。系统脉冲压缩主要采用频率分析法,将回波线性调频信号和具有相同频率调频斜率的线性调频参考信号共轭相乘,称之为“去调频(Dechirp)”处理<sup>[6]</sup>。去调频后获得目标的差拍信号,该信号是与回波延迟时间 $t$ 有关的单频信号,在频域上进行FFT即可实现对目标的脉冲压缩<sup>[7]</sup>。本套系统使用RD算法,截取采集信号的32个相邻周期的信号,在快时间域进行FFT后,在慢时间域进行FFT即可求得该时刻的速度,具体实验情况在实验结果中详细介绍。

### 2.2 距离多普勒(RD)成像算法分析

该系统主要研究正侧视情况下SAR成像,其几何模型如图9所示。

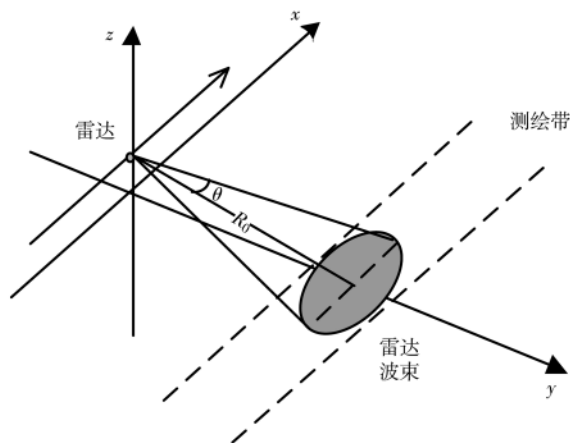


图9 正侧视 FMCW SAR 成像几何模型

本文FMCW SAR成像实验未使用机载平台,选取一定高度台阶放置滑轨作为雷达运动轨迹,如图9所示本文实验过程中使用的正侧视模型俯视角接近 $0^\circ$ ,可以有效减少杂波对成像结果的影响。

传统的脉冲SAR主要采用RD成像算法,脉冲SAR信号脉宽在微秒级,在处理信号时假设雷达在发射和接收信号时雷达位置固定不动,即“停-走-停”假设。MIT开放课程在FMCW雷达成像处理时模拟脉冲SAR的成像方法,将雷达固定在等距离的59个点上采集信号,然后进行成像处理,整个过程操作起来比较繁琐,成像质量不太理想。本套系统首先复现MIT FMCW SAR成像过程,然后改进传统RD成像算法<sup>[8]</sup>,适用于连续运动FMCW SAR成像,算法流程图如图10所示。

在信号处理过程中主要是信号相位的计算,和信号幅度无关,为方便计算,在计算过程中将信号幅度系数统一设为1。发射信号为:



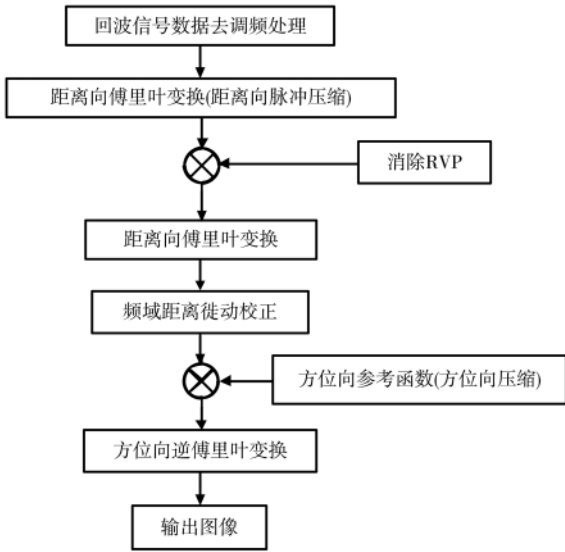


图 10 FMCW SAR 成像算法流程图

$$s(t) = \exp(j2\pi f_0 t + j\pi K t^2) \quad (1)$$

式中  $x$  为雷达实时坐标,  $\eta$  为慢时间,  $f_0$  为发射信号中心频率,  $t$  为快时间,  $K$  为调频斜率。接收信号为:

$$s(r) = \exp(j2\pi(f_0(t - \frac{2R(t)}{c}) + \frac{K}{2}(t - \frac{2R(t)}{c})^2)) \quad (2)$$

其中,  $R(t)$  为接收信号时雷达和目标的瞬时距离。

$$s = vt + v\eta \quad (3)$$

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + x^2} \quad (4)$$

去调频后的信号为  $s(t, \eta)$ 。

$$s(t, \eta) = \exp(j2\pi(-f_0(\frac{R(\eta) - R_{ref}}{c} + f_d t - 2K\frac{R(t) - R_{ref}}{c}(t - t_{ref}) + 2K(\frac{R(t) - R_{ref}}{c})^2)) \quad (5)$$

式中  $R_{ref}$  为参考距离,  $t_{ref}$  为参考距离回波延迟。其中第一个指数项为方位项信息, 主要是在方位压缩时进行计算; 第二个指数项是 FMCW 雷达在运动期间产生的多普勒频率; 第三个指数项为距离向信息, 在距离压缩时进行计算; 最后一个指数项为剩余视频相位(RVP), 是由于去调频处理时回波延迟不同所引起的, 影响成像质量<sup>[9-10]</sup>。

脉冲压缩后的信号变为:

$$s(t, \eta) = \exp(j2\pi(-f_0(\frac{2R(\eta)}{c} + 2K\frac{R(\eta)}{c}t_{ref} + 2K(\frac{R(\eta) - R_{ref}}{c})^2)) \text{sinc}[\pi T(f + 2K\frac{R(t) - R_{ref}}{c} - f_d)] \quad (6)$$

省略常数项, 消除 RVP 并进行距离徙动校正后信号变为:

$$s(t, f_\eta) = \exp(-j\frac{4\pi R_0}{\lambda}) + \exp(j\frac{\pi f_\eta^2 \lambda R_0}{2v^2}) \quad (7)$$

式中  $f_\eta$  为方位向频率分辨单元, 在本套系统中为脉冲重

复周期,  $f_\eta = 1/T$ 。在方位向进行压缩, 然后通过逆傅里叶变换即可得到输出图像。

### 2.3 改进运动导轨实现 SAR 成像

为实现 FMCW 雷达连续运动 SAR 成像, 改进运动导轨, 雷达系统和运动导轨实物图如图 11 所示。导轨是通过驱动电机带动皮带匀速运动, 将皮带和雷达系统底座固定在一起, 从而控制雷达系统做匀速直线运动, 对目标区域进行 SAR 成像数据采集。具体实验情况在实验结果中详细介绍。

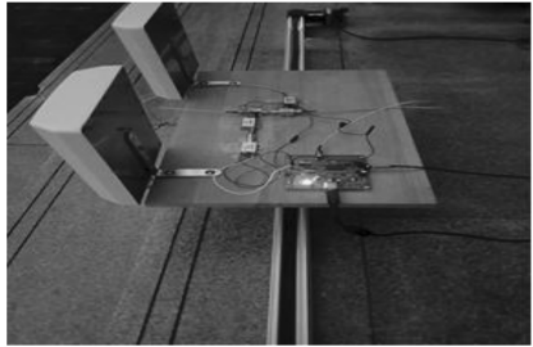


图 11 雷达系统和滑轨实物图

## 3 实验结果

本节主要进行了实际目标的参数测量、滑轨连续运动 SAR 成像的仿真实验以及实际成像分析。

### 3.1 测距测速实验结果

该系统使用 Adobe Audition CC 2015 音频采集软件采集集中频信号, 采集信号的界面如图 12 所示。



图 12 音频软件数据采集示意图

如图 12 所示, 音频软件采集数据的采样率为 44.1 kHz, 数据采集分左右声道, 左声道为触发信号, 判定是否发射信号, 作为同步信号, 与接收信号保持相位一致, 是脉冲压缩的保障。右声道为混频后的中频信号, 在 MATLAB 中计算后得到需要的结果。本套系统载频为 2.4 GHz, 带宽为 287 MHz, 实验过程中三角波周期最短为 10 ms、最长为 40 ms, 实验目标距离在 50 m 以内, 最大径向速度在 20 m/s 以内。根据计算, 目标在最远距离以最大速度运动时产生的差频信号最大为 19 183 Hz, 根据奈奎斯特

采样定律, 采样率为 44.1 kHz 不会造成信号失真。在后续实验中如果目标距离增加或者缩短信号周期, 会相应调整采样频率, 保证音频采集软件采集信号不会失真。

测距测速外场实验具体实验场景如图 13 所示。

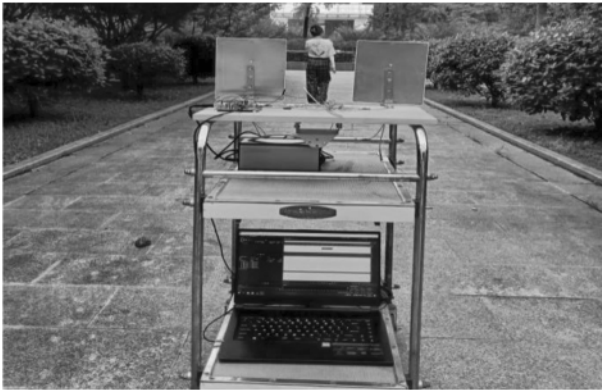


图 13 测距测速实验场景图

如图 13 所示, 一个人从 FMCW 雷达系统处远离该系统做近似匀速直线运动, 12 s 时开始折返, 以相同速度朝该系统运动。通过采集数据计算, 得到目标距离时间图如图 14 所示。

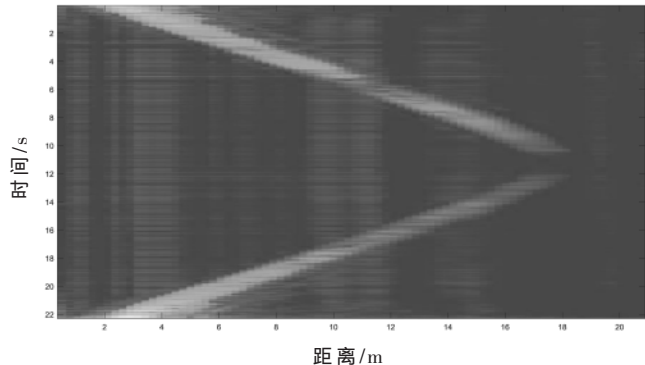


图 14 运动目标速度距离图

如图 14 所示, 横坐标是运动目标距雷达系统的距离, 纵坐标是时间, MIT 咖啡罐雷达测速通过距离除以相应的时间推算出运动目标的速度。

本系统增加使用 RD 算法计算运动目标实时速度, 选取任意时刻相邻 32 个周期信号 (因为如果选取 64 个周期, 运动目标移动距离超过 1 个距离单元, 计算结果会有偏差; 如果选 16 个周期, 速度分辨率较大, 测速误差大), 在快时间域进行 FFT 后再在慢时间域进行 FFT 计算, 计算出目标的实时速度。本文选取 8.68 s 时刻目标的运动数据进行计算, 得到该时刻目标频谱如图 15 所示。

如图 15 所示,  $X$  轴表示目标距离,  $Y$  轴表示目标径向运动速度, 远离雷达方向速度为正值, 靠近雷达方向速度为负值,  $Z$  轴表示频谱幅度值。结果表示 8.68 s 时刻该目标以 1.42 m/s 的速度远离雷达运动, 整个过程中

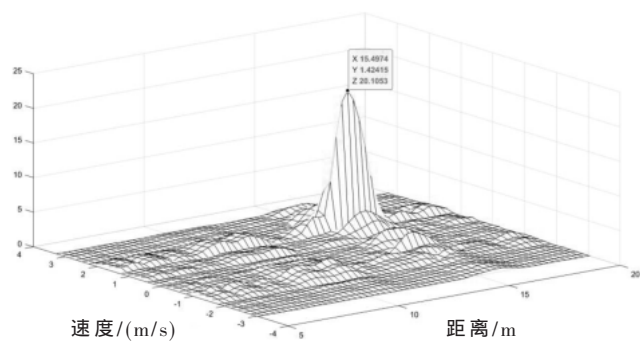


图 15 运动目标速度距离频谱图

平均速度为 1.45 m/s。选取不同时刻计算目标运动速度结果如表 1 所示。

表 1 不同时刻目标运动速度表

序号	时刻/s	距离/m	速度/(m/s)
1	2.93	7.35	1.32
2	5.82	11.85	1.36
3	8.68	15.50	1.42
4	14.40	14.71	-1.52
5	17.93	9.46	-1.55

从表 1 数据可知, 本套系统使用 RD 算法测量目标实时速度在误差范围内, 可以较好地实现对目标实时测速功能。

3.2 滑轨成像算法仿真

在搭建系统后, 针对该系统的各项参数, 在 MATLAB 上对 2 个点目标进行 FMCW SAR 成像仿真实验, 用于对外场实验提供理论指导和技术支撑, 实验参数如表 2 所示。点目标仿真成像图如图 16 所示。

表 2 FMCW SAR 成像仿真参数

参数	值
中心频率/GHz	2.4
扫描周期/ms	40
合成孔径长度/m	2
带宽/MHz	400
采样率/kHz	44.1
雷达速度/(m/s)	0.1
目标坐标	[0, 6.5; 0.5, 8]

通过仿真实验验证, 系统编写的改进 RD 算法在 FMCW SAR 成像中具有良好的效果, 可以用于外场实验。

3.3 SAR 成像实验结果

本文外场实验场景如图 17 所示。

复现 MIT 模拟“停-走-停”SAR 成像的频谱图和成像图结果如图 18、图 19 所示。本文在数据处理时, 消除目标范围以外的回波信号, 仅对目标范围以内的信号进行处理。图 18、图 19 是在图 16 场景下, 2 个灭火器分别

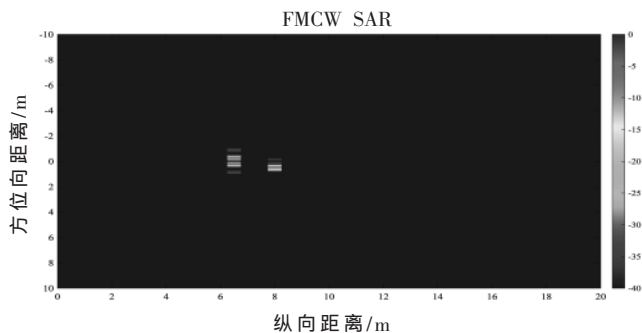


图 16 FMCW SAR 连续运动仿真实验图像



图 17 SAR 成像外场实验场景图

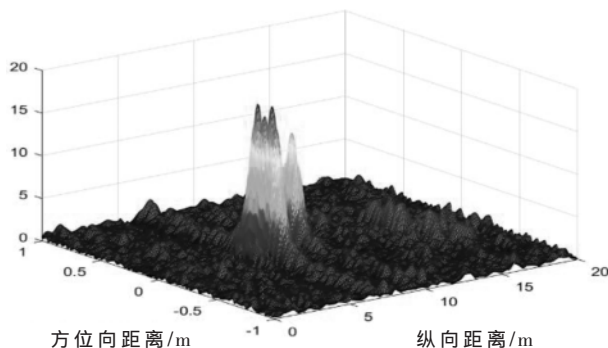


图 18 停-走-停 SAR 成像频谱

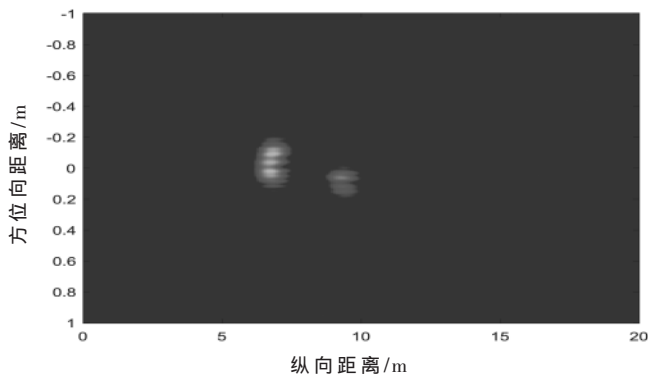


图 19 停-走-停 SAR 成像图

在 6.5 m 和 8.5 m 处的 SAR 成像频谱图和成像图,从图中可以明显看出,在 MIT 基于“停-走-停”假设的 FMCW

SAR 成像中,方位向压缩不完整。该“停-走-停”模式只是依靠人控制雷达在固定的位置采集信号,操作过程比较繁琐,方位向压缩的信号数量较少,相同信号强度下,频谱峰值不超过 20,信噪比较低,目标距离增加或者目标反射强度变弱,信号将很难被分辨出来,严重影响 SAR 成像作用距离。

相同场景下,本系统控制雷达在 2 m 长导轨上做匀速直线运动时采集回波信号,使用改进 RD 算法,得到最终频谱和成像图如图 20、图 21 所示。本文在数据处理时设置一个门限,滤除杂波信号和旁瓣信号。

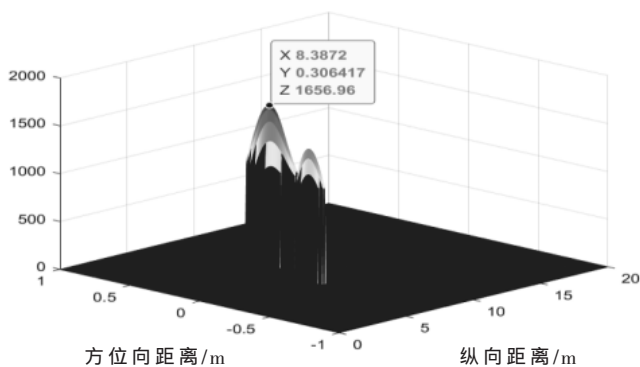


图 20 改进 RD 算法 SAR 成像频谱图

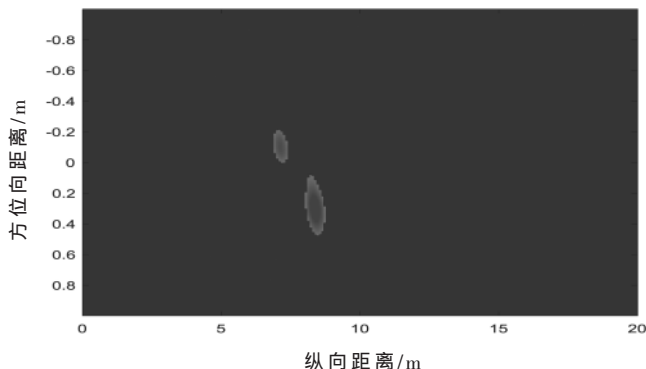


图 21 改进 RD 算法 SAR 成像图

如图 20 所示,频谱峰值达到 1 657,通过比较,信噪比远大于 MIT 的系统的信噪比。实验结果显示该套 FMCW 雷达系统相较于 MIT 咖啡罐雷达成像操作简单,成像效果更好。

#### 4 结论

本文采用微波器件模块化集成系统,借鉴 MIT 咖啡罐雷达,优化设计并搭建一款应用于教学实践的低成本小型 FMCW 雷达系统。该系统在天线设计、调制电压产生电路、电脑音频插口、测速方法和 SAR 成像方法 5 个方面进行改进,提升系统的稳定性和性能,能够实现测量运动目标瞬时径向速度和对静止目标 SAR 成像,能够满足日常教学实践需求。未来将继续优化改进该系统,提升测距、测速和 SAR 成像精度,应用于测绘和地质勘探等社会生活领域。

### 参考文献

- [1] CHARVAT G L, WILLIAMS J H, FENN A J, et al. RES. LL-003 build a small radar system capable of sensing range, doppler, and synthetic aperture radar imaging Jan. IAP 2011. (MIT OpenCourseWare; Massachusetts Institute of Technology).
- [2] CHARVAT G L, FENN A J, PERRY B T. The MIT IAP radar course: build a small radar system capable of sensing range, Doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging [C]// Radar Conference (RADAR), 2012 IEEE, 2012.
- [3] MELNIKOV A, KERNEC J L, GRAY D. FMCW rail-mounted SAR: porting spotlight SAR imaging from MATLAB to FPGA [C]// 2014 IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing (ICSPCC). IEEE, 2014.
- [4] MELNIKOV A, KERNEC J L, GRAY D. A case implementation of a spotlight range migration algorithm on FPGA platform [C]// International Symposium on Antennas & Propagation. IEEE, 2015.
- [5] MELNIKOV A, KERNEC J L, GRAY D. Porting spotlight range migration algorithm processor from MATLAB to Virtex 6 [C]// 2015 IEEE-APS Topical Conference on Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC). IEEE, 2015.
- [6] WANG R, LOFFELD O, NIES H, et al. Focus FMCW SAR data using the wave number domain algorithm [J]. IEEE Transac-

tions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(4): 2109-2118.

- [7] Liu Yue, Deng Yunkai, WANG R, et al. Bistatic FMCW SAR signal model and imaging approach [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2014, 49(3): 2017-2018.
- [8] 蔡永俊. 调频连续波合成孔径雷达成像研究与系统实现 [D]. 北京: 中国科学院国家空间科学, 2016.
- [9] META A, HOOGEBOOM P, LIGHART L P. Correction of the effects induced by the continuous motion in airborne FMCW SAR [C]// IEEE Conference on Radar, 2006.
- [10] META A. Signal processing of FMCW synthetic aperture radar data [D]. Holland Delft University of Technology, 2006.

(收稿日期: 2022-06-18)

### 作者简介:

蒋俊(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: FMCW SAR 成像。

穆文星(1997-), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 海上信息获取。

刘涛(1978-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 雷达极化统计理论、极化信息处理、雷达极化检测与识别、电子战系统建模与仿真, E-mail: liutao1018@sina.com。



扫码下载电子文档

(上接第 5 页)

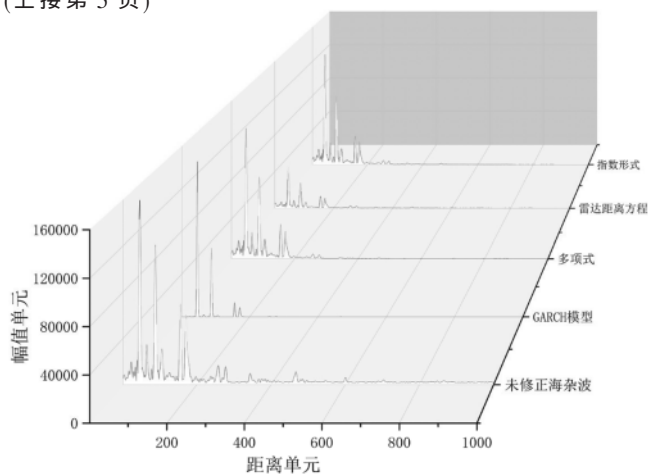


图 6 低海况下四种 STC 曲线修正效果对比图

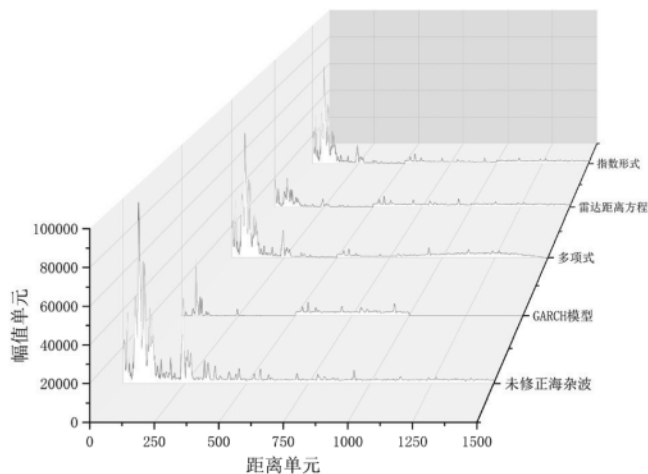


图 7 高海况下四种 STC 曲线修正效果对比图

burg, Artech House, 2013.

- [14] 孔庆颜, 陈重, 胡冰. 地杂波背景中的雷达距离方程的研究 [J]. 兵工学报, 2006, 27(3): 442-445.
- [15] 刘宁波, 董云龙, 王国庆, 等. X 波段雷达对海探测试验与数据获取 [J]. 雷达学报, 2019, 8(5): 656-667.

(收稿日期: 2022-05-14)

### 作者简介:

田凯祥(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 雷达

信号处理与目标检测。

刘宁波(1983-), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 雷达信号智能处理、海上目标探测技术, E-mail: ln198300@163.com。

王中训(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 信源信道编码。



扫码下载电子文档



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所