

实验报告：基于 FMCW 调频连续波雷达的信号处理与目标参数估计

[个人信息]*

School of Microelectronics

Southern University of Science and Technology

11111111@mail.sustech.edu.cn

[个人信息]*

School of Microelectronics

Southern University of Science and Technology

11111111@mail.sustech.edu.cn

I. 引言

雷达作为一种主动式无线电传感器，其核心原理是通过发射电磁波并接收目标的反射回波来获取目标的位置、速度及特征信息。在众多雷达体制中，调频连续波（FMCW）雷达因其高分辨率、低截获率、系统结构简单以及良好的近距离探测能力，在现代电子系统中占据了举足轻重的地位。

随着集成电路技术的发展，毫米波 FMCW 雷达已广泛应用于智能驾驶、工业自动化监控以及人体生命体征监测等领域。特别是在信号处理层面，通过对中频信号（Intermediate Frequency, IF）进行傅里叶变换（FFT），FMCW 雷达能够实现对多个目标的高精度距离和速度联合估计，这使得其成为了“信号与系统”理论在工程实践中应用的典范。

II. 理论基础

A. 发射信号模型

FMCW 雷达的核心在于发射频率随时间线性变化的连续波信号，通常称为“线性调频脉冲”（Chirp）。设载波起始频率为 f_c ，调频带宽为 B ，信号周期（扫描时间）为 T_{chirp} 。则频率变化率（斜率）可表示为：

$$K = \frac{B}{T_{chirp}}$$

在单一脉冲周期 $t \in [0, T_{chirp}]$ 内，发射信号的时域表达式可建模为：

$$s(t) = A \cos(2\pi f_c t + \pi K t^2 + \theta_0)$$

*These authors contributed equally to this work.

其中， A 为振幅， θ_0 为初始相位。其瞬时频率为相位的导数，即 $f(t) = f_c + Kt$ ，呈现线性增长趋势。

B. 接收信号与中频信号的产生

当发射信号遇到距离为 R_t 的目标后发生反射，接收机在延时 τ 后接收到回波信号。忽略传播损耗，接收信号 $r(t)$ 是发射信号的延时版本：

$$r(t) = s(t-\tau) = A' \cos(2\pi f_c(t-\tau) + \pi K(t-\tau)^2 + \theta_0)$$

其中延时 τ 取决于电磁波的传播速度 c 。若目标以径向速度 v 运动，则距离 R_t 是时间的函数。

在雷达前端，接收信号 $r(t)$ 与当前的发射信号 $s(t)$ 通过混频器进行相乘，并经过低通滤波器后提取出差拍信号，即中频信号 $x_{IF}(t)$ 。根据三角函数积化和差公式，中频信号保留了两信号的相位差：

$$\Phi_{IF}(t) = 2\pi f_c \tau + 2\pi K t \tau - \pi K \tau^2$$

C. 目标参数提取原理

- **距离估计：**对于静止目标，延时 $\tau = 2R/c$ 为常数。代入相位公式，中频信号的瞬时频率（即相位对时间的导数）为：

$$f_{IF} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\Phi_{IF}(t)}{dt} = K\tau = \frac{2KR}{c}$$

因此，通过对中频信号进行频谱分析（Range-FFT），识别出频谱峰值对应的频率 f_m ，即可反推目标的距离 $R = \frac{c f_m}{2K}$ 。

- **速度估计：**对于运动目标，距离随脉冲序列（Chirp index）的变化导致延时 τ 发生微小偏移。虽然单

周期内的频率变化难以观测，但由于载波波长 λ 极短，目标微小的位移会引起中频信号初始相位的显著线性变化（多普勒效应）。通过对连续多个脉冲的同一距离单元进行第二次 FFT (Doppler-FFT)，测量脉冲间的相位变化率 ω ，即可根据公式 $v = \frac{\lambda\omega}{4\pi T_c}$ 计算目标径向速度。

- **角度估计：**在多天线系统中，电磁波到达不同天线的时间差导致了空间域上的相位差。利用阵列信号处理技术，对不同接收通道的信号进行 FFT (Angle-FFT)，可实现对目标方位角的定位。

D. 系统性能指标分析

- **距离分辨率：**理论上取决于调频带宽，公式为 $d_{res} = \frac{c}{2B}$ 。带宽越大，分辨率越高。
- **最大探测距离：**受限于系统的采样率 f_s 以及中频带宽，公式为 $d_{max} = \frac{f_s c}{2K}$ 。
- **最大探测距离：**取决于帧观测时长（脉冲总数），观测时间越长，速度分辨越细腻。

E. 2D-FFT

为了同时分离目标的距离 (Range) 和速度 (Doppler)，系统需要采集一帧 (Frame) 数据。一帧包含 M 个连续的 Chirp，每个 Chirp 采集 N 个采样点。这构成了一个 $M \times N$ 的二维原始数据矩阵。

根据二维离散时间傅里叶变换 (2D DTFT) 定义，对于离散信号 $x[m, n]$ ，其频域表示 $X[k, l]$ 为：

$$X[k, l] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x[m, n] e^{-j(\omega_l n + \omega_k m)}$$

其中 $\omega_l = \frac{2\pi}{N}l$ 代表快时间轴 (距离维) 的角频率， $\omega_k = \frac{2\pi}{M}k$ 代表慢时间轴 (多普勒维) 的角频率。

III. 静态单目标测距

本实验旨在利用 FMCW 雷达系统对一个处于静止状态的单一目标进行探测。已知雷达发射参数（载频 $f_c = 77\text{GHz}$ ，带宽 $B = 150\text{MHz}$ ，扫频周期 $T_{chirp} = 8\mu\text{s}$ ），通过对接收到的中频信号 x_1 进行频谱分析，提取差拍频率 (Beat Frequency)，进而解算出目标的径向距离。

A. 分析思路

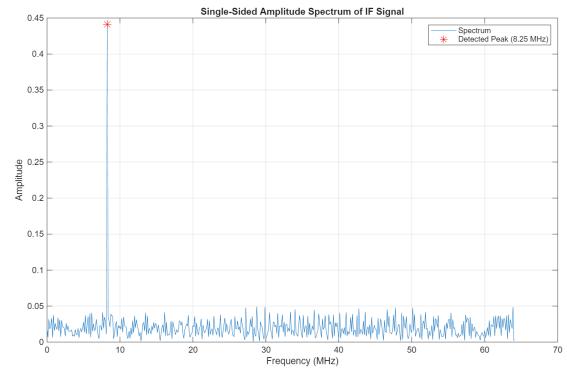
针对静止目标，其回波信号的延时 τ 为常数，中频信号在时域表现为单一频率的余弦信号。处理流程

如下：计算调频斜率 $K = B/T_{chirp} = 18.75\text{MHz}/\mu\text{s}$ 。根据采样点数 N_r 和采样时间 T_{chirp} ，确定采样频率 $f_s = N_r/T_{chirp}$ 。对中频信号 x_1 进行 FFT，再提取正频率部分的单边谱 P_1 。除了直流分量和奈奎斯特频率点外，其余频率点的幅值需乘以 2，以补偿能量损失，从而准确反映原时域信号的振幅。通过搜索频谱中的幅值最大值，确定目标对应的频率 f_m 。最后，根据 FMCW 测距核心公式进行距离换算：

$$R = \frac{c f_m}{2K}$$

B. 结果展示

经过 MATLAB 处理，中频信号的幅值谱如下图所示：



结果如下：

检测到的中频频率 (f_m) 为 8.25 MHz ，计算出的目标距离 (R) 为 66 米

从单边幅值谱图中可以观察到，在 66MHz 处存在一个极具显著性的谱峰，这符合单目标的理论预期。

C. 代码实现

见 GitHub。

IV. 运动单目标距离与速度测算

本实验引入了目标的径向运动。由于目标位移会导致回波信号在不同 Chirp 之间产生微小的相位偏移 (多普勒效应)，单脉冲的 Range-FFT 已不足以提取速度信息。本任务要求利用一帧内包含的 $N_d = 128$ 个连续 Chirp 信号，通过二维信号处理流程，准确解算出目标的距离 R 和径向速度 v 。

A. 分析思路

为了处理运动目标，实验采用“时-频”二维处理架构，具体步骤如下：

将长度为 $N_r \times N_d$ 的一维原始序列 x_2 重构为 1024×128 的二维矩阵。矩阵的行对应单个 Chirp 内的采样；矩阵的列对应 Chirp 序列的演进。对矩阵进行二维傅里叶变换，再对多普勒维（第二维）执行 fftshift，将零频分量移至频谱中心。取变换后结果的模值，并进行对数缩放，以增强弱信号的可视化效果。只考虑实信号，距离维仅保留前 $N_r/2$ 个有效单元。通过对 RDM 进行峰值搜索，定位到能量最强点 ($idx_{range}, idx_{doppler}$)，随后根据系统参数还原数据：

根据距离分辨率 $\Delta R = \frac{c}{2B}$ ，目标距离为：

$$R = (idx_{range} - 1) \frac{cf_s}{2KN_r}$$

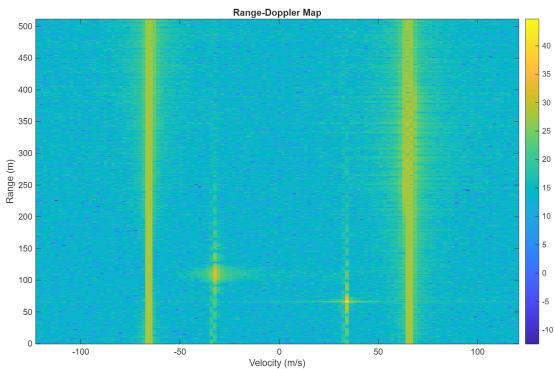
多普勒频率分辨率为 $\Delta f_d = \frac{1}{T_{chirp}N_d}$ 。目标速度根据下式解算：

$$v = \frac{(idx_{doppler} - (\frac{N_d}{2} + 1))\Delta f_d \lambda}{2}$$

其中速度的正负代表着运动方向。

B. 结果展示

二维信号处理后生成的距离-多普勒热力图 (RDM) 如下：



实验检测到的目标运动参数如下：目标距离:66 米，目标速度:34 m/s，靠近雷达

C. 代码实现

见 GitHub。

V. 测量范围与精度对比

A. 分析思路

距离分辨率 (d_{res}) 取决于扫频带宽 B 。

$$d_{res} = \frac{c}{2B}$$

最大探测距离 (d_{max}) 受限于中频带宽（即采样率 f_s ）与扫频斜率 K 的比值。

$$d_{max} = \frac{f_s c}{2K} = \frac{f_s c T_{chirp}}{2B}$$

最大不模糊速度 (v_{max}) 取决于载波波长 λ 和相邻 Chirp 的间隔时间 T_{chirp} 。

$$v_{max} = \frac{\lambda}{4T_{chirp}}$$

速度分辨率 (v_{res}) 取决于帧观测时长 T_f （即 $N_d T_{chirp}$ ）。

$$v_{res} = \frac{\lambda}{2T_f}$$

B. 结果展示

- 距离分辨率**: 进阶任务（约 0.84m）略优于基础任务（1m）。这是因为进阶任务拥有更大的带宽 (178MHz vs 150MHz)。带宽越大，对应中频信号的时间分辨率越高。
- 最大探测距离**: 基础任务（理论约 1024m）远优于进阶任务（理论约 648m）。进阶任务虽然斜率极小，但其采样率 f_s 极低（仅 50KHz），严重限制了中频信号的最高截止频率，从而压缩了最大量程。
- 最大不模糊速度**: 基础任务（约 121m/s）具有压倒性优势。进阶任务由于 T_{chirp} 极长（15.38ms），导致相位在极小的速度下就会发生相位模糊（其 v_{max} 仅约 2.16m/s）。这表明基础任务适用于高速交通场景，而进阶任务仅能测量极缓慢的运动。
- 速度分辨率**: 进阶任务在精度上更胜一筹。尽管其波长较长，但由于其单次观测时长 (T_{chirp}) 是基础任务的近 2000 倍，这使得系统在频率轴上具有极高的辨识力。

基础任务雷达 (77GHz 高频短脉冲) 具有在距离和速度的量程上都相对较大。其极短的 Chirp 周期有效避免了相位模糊。该方案更适合车载雷达。进阶任务雷达 (2.253GHz 低频长脉冲) 在测量精度上相对较大。其优势在于通过极长的观测时间获得细腻的速度分辨率，且更宽的带宽带来了更好的距离分辨率。该方案更适合室内定位或健康监测。

VI. 多运动目标探测设计与仿真

在实际雷达应用场景中，环境中往往同时存在多个距离和速度各异的目标。此外，接收机噪声和环境杂波会干扰目标的识别。本任务要求设计一套自动化的信号处理流程，模拟探测 $M = 3$ 个运动目标，并实现目标参数的自动提取，而非人工观察 RDM 图形。

A. 分析思路

我们设计了基于 2D-FFT+CFAR 的信号处理方法。

针对 $M = 3$ 个目标，中频信号被建模为多个谐波分量的叠加：

$$x_{IF}(t, n) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi(f_{R,m}t + f_{D,m}nT_c) + \phi_m) + w(t, n)$$

其中 $f_{R,m}$ 为距离频率， $f_{D,m}$ 为多普勒频率， $w(t, n)$ 为手动添加的高斯白噪声。通过二维 FFT 处理，将不同目标的能量分别聚焦在 Range-Doppler 平面的不同“分桶”（Bins）中。相干积累过程显著提升了信号在特定点上的功率。

为了在噪声背景下自动识别目标并控制“虚警”（False Alarm），引入了 2D-CFAR 探测器。其核心逻辑如下：待测单元（CUT）遍历 RDM 中的每一个像素点。训练单元（Training Cells）环绕 CUT 选取一圈区域，计算其平均噪声功率。保护单元（Guard Cells）在 CUT 和训练单元之间设置缓冲带，防止目标能量泄露影响噪声估计。只有当 CUT 的功率超过“噪声均值 + 偏移量（Offset）”时，才判定该点存在目标。

CFAR 产生的掩模（Mask）可能包含多个相邻点。通过 3×3 邻域比较法进一步提取局部极值点，从而获得目标的精确坐标。

如结果展示中的表格所示，我们设置了 3 个不同距离和速度的目标，并将仿真结果与预设值对比确认。

B. 结果展示

预设距离	测得距离	预设速度	测得速度
80	80	10	9.51
120	120	-20	-20.93
180	180	30	20.44

C. 代码实现

见 GitHub。

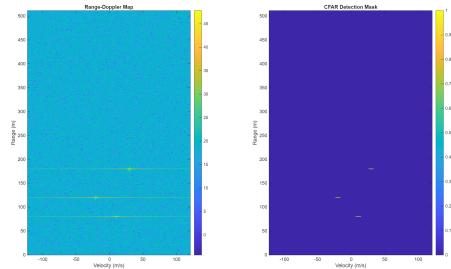


图 1. 左侧为距离-多普勒图，右侧为 CFAR 掩膜图

VII. 基于 SIMO 阵列的多目标定位与测速

在基础探测任务中，单天线雷达仅能感知目标的径向距离和速度。本任务通过引入单发射多接收（SIMO）天线阵列，旨在实现目标的二维平面定位，即在解算距离 R 和速度 v 的基础上，进一步获取目标的方位角 (θ)。

A. 分析思路

为了处理空间维度的信息，系统构建了一个三维数据模型：第一维（Range）为采样点 $N_r = 1024$ 。第二维（Doppler）为 Chirp 序列 $N_d = 128$ 。第三维（Spatial）为接收天线通道 $N_x = 8$ 。

处理流程如下：为每个天线通道生成对应的中频信号。由于空间位置差异，不同天线接收到的回波存在相位差 $\Delta\phi = 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda}$ ，算出 RDM。将 8 个通道的 RDM 幅值相加，提高检测概率，然后利用 CFAR 算法在合成后的 RDM 上锁定目标峰值。针对每一个检测到的目标坐标 (idx_R, idx_D) ，提取其在第三维（天线轴）上的复数向量。对提取的天线轴向量进行 FFT 运算。频谱峰值对应的频率反映了空间相位变化率，通过反正弦映射计算出方位角 θ 。

设相邻天线间距 $d = \lambda/2$ 。当目标位于方位角 θ 时，相邻天线的相位差为：

$$\omega_{spatial} = 2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda} = \pi \sin \theta$$

通过对 N_x 维数据进行 FFT，识别出空间角频率 ω_{peak} ，则目标的物理角度为：

$$\theta = \arcsin \left(\frac{\omega_{peak} \lambda}{2\pi d} \right)$$

在该设置下，天线间距 $d = \lambda/2$ 保证了方位角探测范围可覆盖 $\pm 90^\circ$ 而不产生空间相位模糊。

B. 结果展示

角度分辨率受天线数量 N_x 限制。本实验采用 8 通道阵列，能提供约 $15^\circ\text{-}20^\circ$ 的理论角度分辨率。

预设 (R, v, θ)	测得 (R, v, θ)
$(100, 15, -20^\circ)$	$(100, 15.22, -14.48^\circ)$
$(150, -25, 30^\circ)$	$(150, -24.73, 30^\circ)$

C. 代码实现

见 GitHub。

VIII. 实测数据分析与三角波调制算法实现

本部分实验旨在处理由 2.253 GHz 单天线 FMCW 雷达在室外运动场环境下采集的实测数据。与理想的仿真环境显著不同，真实场景下的雷达信号处理面临着静止杂波掩盖目标、多普勒分辨率不足以及间歇性强噪声干扰等多重严峻挑战。针对这些问题，本实验提出并实现了一套结合动目标显示 (MTI) 滤波、相位干涉测速以及自适应窗口追踪的鲁棒信号处理架构。

A. 分析思路

在信号预处理阶段，为了从强背景中分离出运动目标，算法首先在“慢时间”维度上应用了 MTI 滤波器。该滤波器通过计算并减去一帧内所有 Chirp 信号的均值来抑制静态杂波，其数学表达为：

$$x_{MTI}(t, n) = x_{raw}(t, n) - \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} x_{raw}(t, k)$$

该操作在频域上等效于高通滤波，彻底滤除了零频附近的地面与墙壁回波，从而显著提升了运动目标的信杂比 (SCR)。考虑到人体在运动过程中可能出现的雷达截面积波动导致的信号衰落，系统在生成距离-时间图 (RTM) 时进一步引入了帧间平滑处理，通过对相邻帧进行非相干积累来填补信号能量的“断点”，增强了目标轨迹在时间轴上的连续性。

在核心的目标检测与参数提取环节，鉴于环境中存在持续性的非目标强噪声，特别是 19m 处的横向干扰条带，传统的全局最大值搜索策略会导致检测结果在真实目标与强噪声之间剧烈跳变。为此，本实验设计了基于物理约束的自适应窗口追踪算法。利用物体运动的连续性原理，算法将第 k 帧的峰值搜索范围 $R_{search}^{(k)}$ 严格限制在第 $k-1$ 帧估计位置 $R_{est}^{(k-1)}$ 的局部邻域内：

$$R_{search}^{(k)} \in [R_{est}^{(k-1)} - 3, R_{est}^{(k-1)} + 3]$$

通过在首帧根据先验知识锁定 20m 附近的初始目标，该追踪器建立了一个随目标移动的动态“观测窗”。即使在噪声强度高于目标信号强度的极端情况下，算法依然能够利用上述距离门限 (Range Gating) 屏蔽干扰，保持对真实轨迹的稳定锁定。

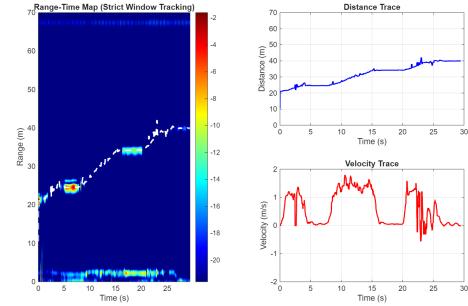
对于速度参数的解算，受限于硬件的频率分辨率，实验放弃了基于幅度谱的多普勒频率估计，转而采用高灵敏度的相位差分技术。通过提取目标在同一距离单元内相邻 Chirp 间的复数相位差 $\Delta\phi$ ，算法利用以下公式反演微小的速度变化：

$$v = \frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{4\pi \cdot T_{up}}$$

该方法突破了 FFT 栅栏效应的限制，实现了对低速运动的高精度测量。

B. 结果展示

经过对 30 秒实测数据的处理，生成的行人运动轨迹如下：



实验最终生成的距离-时间热力图清晰地展示了去除杂波后的目标轨迹，图中明亮的能量带呈现出完整的“先远离、后折返”趋势，且未受横向噪声带影响。解算出的距离曲线平滑连续，准确复原了测试者从 20 米处走走停停至 55 米处的全过程；相应的速度曲线与距离变化率高度吻合。

C. 代码实现

见 GitHub。

IX. 总结与反思

至此，所有实验题目已分析完毕。最后一部分你可以按照任务书要求补充以下内容：本项目从 FMCW 雷达的基础测距理论出发，逐步深入到多脉冲测速、2D-FFT 多目标检测以及多天线 2D 定位。特别是在最后

的实测环节，通过对抗真实环境中的噪声与杂波，深刻体会到了理论模型（如理想点目标）与工程实践（如杂波、多径、微弱信号）之间的巨大差异，以及信号处理算法在弥合这一差异中的核心作用。

A. 团队分工

小组成员 [个人信息] 完成了 a、d、f 题的代码，并对 b、e 题的代码进行了测试。

小组成员 [个人信息] 完成了 b、e 题的代码和 c 题的计算，并对 a、d、f 的代码进行了测试。

实验报告的正文部分由对应题目代码的撰写者完成，引言和总结部分由 [个人信息] 完成。展示汇报的幻灯片由 [个人信息] 完成。

B. 遇到的困难

- d 题不仅要解决判断目标距离和速度的问题，也要解决一个区域内目标有或无的问题。这一问题较为棘手，我们大量搜集资料，学习了如何在本题中应用 CFAR 算法。
- f 题中提供的真实情景雷达信号有很强的近噪，且移动过程中目标显著性极弱，即便是用肉眼也很难在 RTM 图中准确识别目标，这对算法的鲁棒性提出了巨大挑战。考虑到被测目标是一个静止或行走的人，一小段时间内距离不会突变，我们引入了距离门限机制，并在目标极不显著的时间采取帧间平滑的方法，引入邻近帧的信息。但是，我们的方法完全依赖于目标为单一行人的先验知识。如果 f 题改为真实情景下的多目标探测或速度范围很大的物体，本方法将失效。

C. 学习收获

•

参考文献

[1] S. Rao, “Introduction to mmWave Sensing: FMCW Radars.”