

FMCW雷达测距测速功能仿真

1、课程设计说明

调频连续波（Frequency Modulated Continuous Wave，缩写为FMCW）雷达是一种基于频率调制连续波信号的雷达系统，广泛应用于自动驾驶、无人机探测、生命体征检测、手势识别等多种领域，可实现目标探测并对所检测到目标的距离、速度和角度等参数信息进行估计。

基于DFT的数字频谱分析是我们在“数字信号处理”课程中所学习的DFT变换的重要应用，其也是FMCW雷达中实现对目标测距和测速信号处理算法的基础。本次课程设计以FMCW雷达作为工程应用背景，学习其实现测距和测速功能的工作原理，编写实现测距和测速功能的MATLAB仿真程序，从而加深同学们对DFT频谱分析方法中频率分辨率、混叠效应、泄漏效应、栅栏效应等重要知识点的理解。

在开展具体课程设计工作前，请各位同学通过研读附件中提供的参考论文【1】和查阅其它相关资料自学FMCW雷达的工作原理，理解FMCW雷达是如何实现测距和测速功能。（参考论文中section II~section IV部分）。

【1】 X. Li, X. Wang, Q. Yang and S. Fu, "Signal Processing for TDM MIMO FMCW Millimeter-Wave Radar Sensors," in IEEE Access, vol. 9, pp. 167959-167971, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137387.

2、课程设计内容

2.1、线性调频连续波信号的产生和分析

FMCW雷达通常使用线性调频连续波信号，其瞬时频率在时间间隔 T_c 内从起始频率 f_c 线性变化到 $f_c + B$ ，如图1所示。线性调频连续波信号的数学表达式如下

$$x(t) = \cos(2\pi f_c t + \pi S t^2), \quad 0 \leq t < T_c$$

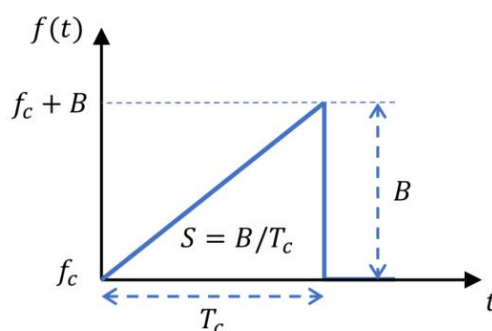


图1 线性调频连续波信号瞬时频率随时间变化示意图

给定线性调频连续波信号的参数设置为 $f_c = 0\text{Hz}$, $B = 150\text{MHz}$, $T_c = 2\mu\text{s}$ 。请同学编写MATLAB程序，完成如下实验内容。

- 1) 选择合适的采样率 f_s ，产生该线性调频连续波信号对应的离散序列 $x[n]$ ，并画出其时域波形。
- 2) 使用fft、fftshift等命令，对该线性调频连续波信号进行基于DFT的频域分析，画出其频谱图（频率轴坐标请使用模拟频率表示）。
- 3) 使用spectrogram命令，对该线性调频连续波信号进行基于STFT的时频域联合分析，画出其时频谱图。要求至少采用两种不同的STFT变换参数配置（包括每段变换点数、相邻段间重叠点数、窗函数类型等）完成分析，并说明不同配置下时频谱图间的差异并解释原因。

2.2、单目标探测和测距测速功能仿真

随附件提供的MATLAB程序fmcw_onetarget_sim.m实现了FMCW雷达在单目标场景下对目标测距测速功能的仿真。为实现测速功能，FMCW雷达需要使用由多个线性调频chirp组成的一帧探测信号。仿真程序中雷达探测信号的帧格式如图2所示：其由numChirps个线性调频chirp信号组成，而每个线性调频chirp又包括时长为 T_{chirp} 的线性调频部分和时长为 T_{idle} 的固定频率部分。

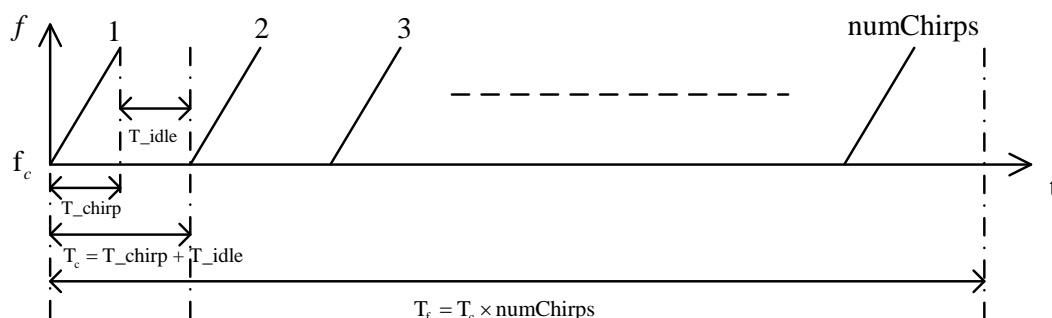


图2 FMCW雷达播一帧探测信号的时序示意图

仿真程序首先基于所配置的FMCW雷达工作参数，针对所设置的目标距离和速度参数，生成了与雷达发射探测信号所对应的接收中频信号的采样序列。然后，实现了参考论文【1】中给出的range-DFT和doppler-DFT处理算法，以完成对目标距离和径向速度的估计。请同学在仔细研读分析该仿真程序的基础上，完成如下实验内容。

1) 请在下表中记录程序中所仿真FMCW雷达的重要工作参数。

FMCW雷达的工作参数表

雷达参数	缩写	参数取值
扫频带宽	BW	
起始频率	Fc	
扫频斜率	F_slope	
扫频周期	Tc	
扫频时长	T_chirp	
空闲时长	T_idle	
每帧chirp个数	numChirps	
ADC采样频率	Fs	
扫频周期内采样点数	numInTc	
扫频时长内采样点数	numInTchirp	

2) 请记录程序中所设置的目标距离、速度和回波强度参数，并画出对应该目标的接收数字中频信号的波形（实部）。

3) 请画出对第一个线性调频chirp周期内接收中频信号进行range-DFT处理后得到的随距离变化的回波强度图，并给出目标距离的估计值。

4) 请画出对一帧探测信号所对应的接收中频信号进行range-DFT和doppler-FFT处理后得到的随距离和速度变化的回波强度图，并给出目标速度的估计值。

5) 请给出该雷达无模糊的最大测距值和测速范围，请确定该雷达的测距分辨率和测速分辨率。

2.3、多目标探测和测距测速功能仿真

在2.2节实验内容的基础上，请编写MATLAB程序来仿真采用相同工作参数的FMCW雷达对如下3个目标的检测和测距测速功能。

目标序号	距离 (m)	径向速度 (m/s)	回波强度
1	4.75	0	1
2	5.25	4	1
3	7.20	-5	0.05

1) 请画出由全部目标回波所形成的接收中频信号波形（实部），并分别画出与每个目标对应的回波中频信号波形。

2) 请画出对第一个线性调频chirp周期内接收中频信号进行range-DFT处理得到的随距离变化的回波强度图。请回答是否可以从该图中检测到全部3个目标并给出目标距离的估计值。如果不能的话，请分析原因并给出相应的解决方案。

3) 请画出对一帧探测信号所对应的接收中频信号进行range-DFT和doppler-FFT处理后得到的随距离和速度变化的回波强度图。请回答是否可以从该图中检测到全部3个目标并给出目标距离和速度的估计值。如果不能的话，请分析原因并给出相应的解决方案。

3、课程设计报告要求

课程设计报告中应包括如下内容：

1) 对FMCW雷达测距和测速工作原理的简要说明

2) 按照课程设计内容的要求，依此给出各实验内容的仿真结果和相关图表，并对其进行必要的分析。