

# 基于 DSP 的 LFM CW 雷达信号处理技术研究

温宗周 刘 焱 段俊瑞 李健全

(西安工程大学电子信息学院 西安 710048)

**摘要:** 调频连续波(FMCW)雷达在目标测量系统中有着广泛的应用,而雷达信号的处理是决定测量精确度的关键。本研究设计了一款基于 DSP 的线性调频连续波(LFM CW)雷达信号处理系统,采用经过三角波调制的 LFM CW 雷达信号作为发射信号,来实现目标距离及速度的测量。介绍了 LFM CW 雷达的基本结构,分析了实现目标测量的原理,解决了在信号处理过程中,仅采用快速傅里叶变换(FFT)算法而存在的频率分辨率与计算时间的矛盾,提高系统的测量效率。重点研究了雷达信号处理系统的处理算法——FFT 和线性调频 Z 变换(CZT)的联合算法(FFT/CZT 联合算法),同时对 FFT/CZT 联合算法也进行了 MATLAB 仿真分析。分析结果表明,FFT/CZT 联合算法可以显著地提高雷达信号处理的效率和精度。

**关键词:** DSP; LFM CW 雷达; FFT/CZT 联合算法; MATLAB

**中图分类号:** TP302 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

## Research on LFM CW radar signal processing technology based on DSP

Wen Zongzhou Liu Yao Duan Junrui Li Jianquan

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnical University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Frequency modulated continuous wave (FMCW) radar is widely used in target measurement system, and the radar signal processing is the key to determine the accuracy of measurement. In this paper, a linear frequency modulation continuous wave (LFM CW) radar signal processing system based on DSP is designed to measure the target distance and relative speed. And the system uses triangle wave modulation of linear frequency modulation continuous wave radar signal as transmitted signal. The basic structure and principle of LFM CW radar are discussed in order to solve the only using fast Fourier transform (FFT) algorithm and the contradiction between the frequency resolution and the calculation time, improve the measurement efficiency of system, focuses on the signal processing algorithms of the radar signal processing system-FFT and Chirp-Z transform (CZT) of the joint algorithm (FFT/CZT algorithm) to achieve, and analyzed the FFT/CZT algorithm by MATLAB simulation at the same time. The analysis results show that the FFT/CZT algorithm can significantly improve the efficiency and precision of the radar signal processing.

**Keywords:** DSP; LFM CW radar; FFT /CZT algorithm; MATLAB

## 1 引言

线性调频连续波雷达是一种通过对连续波进行线性频率调制的雷达体制,它具有体积小、无损非接触、分辨率高、辐射功率小、良好的低截获率以及不存在距离盲区等特点,特别适用于目标特性研究领域<sup>[1]</sup>。近年来,随着微波集成电路、DSP 等硬件技术的快速发展以及信号处理技术的日益成熟,LFM CW 雷达技术也得到了较大的发展及广泛的应用。目前,LFM CW 雷达主要应用于各种目标测量系统中,如汽车防撞雷达、连续波高度计以及导弹制导系统等<sup>[2]</sup>。

正确获得目标信息的关键是雷达信号的处理,而 LFM CW 雷达信号处理的关键是目标差频频率的获取。目前,较为成熟且易于实现的方法主要是通过快速傅里叶变换(FFT)来获取目标的频谱,再按照最大功率原则,在频域上选择峰值点对应的频率作为目标信号的差频频率<sup>[3]</sup>。但是由于目标回波信号频谱上的不连续,采用 FFT 进行连续波雷达信号频谱分析时很难做到同步采样和整周期截断,由此会产生频谱泄漏及截断误差,进而影响测量精度。如果要提高测量精度,就必须增加采样点数,但计算量同时也增加了。为了解决测量精度与计算时间的矛盾,提高系统的测量效率,本文采用了一种 FFT/CZT 联合算法。

## 2 LFM CW 雷达信号处理系统概述

LFMCW 雷达信号处理系统的基本结构如图 1 所示。系统主要由雷达传感器、滤波放大处理模块、A/D 转换模块、DSP、外部存储模块、串口通信模块以及电源管理模块等几部分组成。

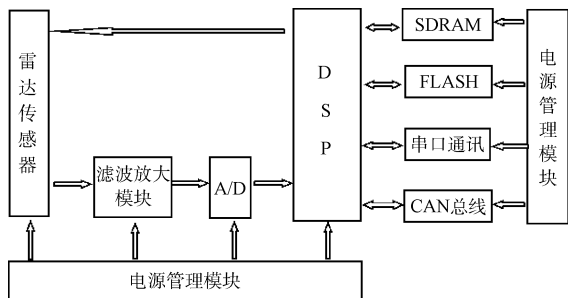


图 1 LFM CW 雷达信号处理系统结构

LFMCW 雷达信号处理系统具体的工作原理如下<sup>[4]</sup>。LFMCW 雷达传感器发射经过三角波调制的连续调频雷达信号，信号遇到目标后反射回雷达传感器，进入混频器与本振信号进行混频得到目标中频信号，中频信号进入滤波放大电路进行滤波放大等信号调理后，最后由 DSP 对中频信号进行数字信号处理，得到目标的速度距离信息。由于实时数据所占用的空间较大，所以需要对外部存储空间进行扩展，用来存储信号数据。另外，系统可通过 RS-232 串口通信接口与外部进行通信，这样可将数据传输到上位机进行显示，并对结果进行验证，也可通过 CAN 总线与汽车中央控制器进行通信。

## 3 LFM CW 雷达与测速测距原理

具体的 LFM CW 雷达系统工作原理如图 2 所示。

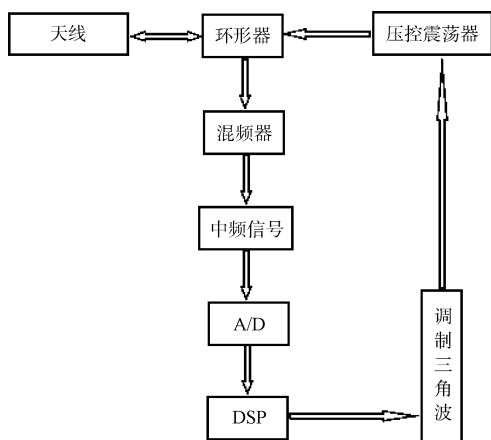


图 2 LFM CW 雷达工作原理

LFMCW 雷达工作时，首先由 DSP 控制产生连续的三角波电压信号，然后由压控振荡器（VCO）在三角波调制电

压信号的控制下产生连续的三角波频率信号，该信号的频率随时间按调制电压的规律变化。信号经过环形器后将一部分信号能量发射出去，剩下的小部分信号能量则进入混频器作为本振信号。发射信号遇到目标后会反射回波信号，接收到的回波信号进入混频器与本振信号进行混频，得到所需的中频信号<sup>[5]</sup>。所得到的中频信号为发射信号与目标回波信号的频率差，即差频信号。

以三角波信号作为连续波雷达的调频信号，由图 3(a) 可知，雷达的发射信号和目标的回波信号在形状上完全一样，只是时间上有一个延迟  $\tau$ ，而对于运动的目标物体同时存在一个多普勒频移  $f_d$ 。

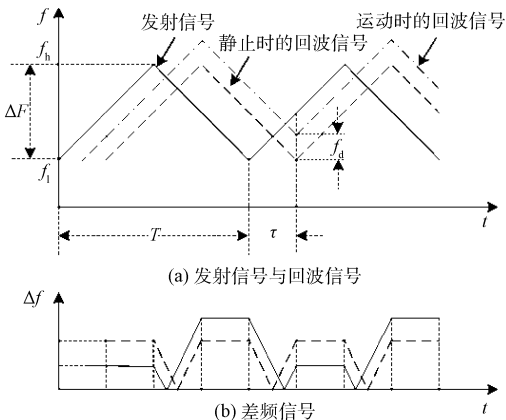


图 3 发射信号与回波信号

若以  $K$  表示三角波调频信号的斜率，则发射信号可表示为：

$$\begin{aligned} f(t+) &= f_1 + Kt \\ f(t-) &= f_b - Kt \\ f_c &= \frac{1}{2}(f_1 + f_b) \end{aligned} \quad (1)$$

式中： $f(t+)$  为发射信号的前半周正向调频信号， $f(t-)$  为发射信号的后半周负向调频信号， $f_1$  为载波信号的最低频率， $f_b$  为载波信号的最高频率， $f_c$  为载波中心频率。

回波信号可表示为：

$$\begin{aligned} f_r(t+) &= f_1 + K(t - \tau) + f_d \\ f_r(t-) &= f_b - K(t - \tau) + f_d \end{aligned} \quad (2)$$

从而得到差频信号：

$$\begin{aligned} f_i(t+) &= |f(t+) - f_r(t+)| = K\tau - f_d \\ f_i(t-) &= |f(t-) - f_r(t-)| = K\tau + f_d \end{aligned} \quad (3)$$

由公式  $\tau = 2R/C$  可得目标距离  $R$ ：

$$R = \frac{CT}{2 \cdot \Delta F} \cdot \frac{[f_i(t-) + f_i(t+)]}{2} \quad (4)$$

式中： $C$  为光速， $T$  为调制三角波周期， $\Delta F$  为调制带宽。根据多普勒原理，目标的相对运动速度可表示为：

$$V_{rel} = \frac{C \cdot f_d}{2f_c} = \frac{C}{2f_c} \cdot \frac{[f_i(t-) - f_i(t+)]}{2} \quad (5)$$

由式(4)、(5)可以得出：在调制参数  $T$ 、 $\Delta F$ 、 $f_c$  一定的

条件下,只要测得差频频率,就能计算出目标距离  $R$  以及目标相对速度  $V_{rel}$ 。

#### 4 雷达信号处理算法设计

由式(4)、(5)可知,为了得到目标距离  $R$  以及目标相对速度  $V_{rel}$ ,就需要提取经信号调理后得到的差频信号频率,一般采用的方法是直接对差频信号进行 FFT 处理后在其频谱中找出其峰值谱线位置<sup>[7]</sup>,然后根据峰值谱线位置得到相应频率,利用该频率通过公式(4)、(5)便能计算出目标的距离和相对速度。而由分析可知,目标回波差频信号的频谱是不连续而是离散的<sup>[8]</sup>,采用快速 FFT 进行连续波雷达信号频谱分析时很难做到同步采样和整周期截断,由此会产生频谱泄漏及截断误差<sup>[9]</sup>,并会影响分析结果。因此直接由 FFT 处理计算得到的频率值很可能是不准确的。如果要提高测量精度,就必须增加采样点数,但计算量同时也增加了,这就往往使得不能满足实时测量的要求。

高精度频率估计一般是通过对信号采取非线性变换得到单载波分量,再对这个单载波进行高精度估计<sup>[10]</sup>。为了克服仅仅采用 FFT 计算而存在的精度与运算时间相互矛盾的问题,LFMCW 雷达信号处理系统采用 FFT /CZT 联合算法。其原理是:首先对差频信号做  $N$  点的 FFT 运算,找出频谱最大的峰值点  $P$ ,然后计算  $(P-1)$  和  $(P+1)$  两点频率,再对这两点间的频谱做  $M$  点的 Chirp-Z 变换运算细化频谱,频谱局部细化后得到的谱线峰值点对应的频率值即为差频频率。

FFT/CZT 联合算法的关键在于频谱范围的选取,选取合适才能保证频率估计的正确性。FFT/CZT 联合算法体现出一种局部放大的小波处理思想,既能提高速度,又能获得精度<sup>[11]</sup>。

FFT/CZT 联合算法具体步骤<sup>[12]</sup>如下。

- 1) 对差频信号进行去线性化及加窗处理,以减少频谱泄露;
- 2) 对处理后的频谱信号做  $N$  点 FFT 运算,查找谱线幅度最大值点  $P$ 。
- 3) 计算  $(P-1)$  和  $(P+1)$  两点的频率值  $f_1$  和  $f_2$ 。
- 4) 在  $f_1$  至  $f_2$  区间内做  $M$  点 CZT 变换运算,找到谱线幅度最大值点  $P1$ ,计算该点的频率值,所得频率即为差频频率。

运算量分析。

对于  $N \times M$  点序列,直接运用 FFT 运算,其运算量为:  $(N \times M) \lg_2(N \times M)$ 。

若采用 FFT /CZT 联合算法,为达到相同的分辨率,需要先进行  $N$  点 FFT 运算后再进行  $M$  点的 Chirp-Z 变换计算,其总运算量为:  $N \lg_2 N + 2(N + M) + (N + M) \lg_2(N + M)$ 。

相同的分辨率,采用 FFT /CZT 联合算法的运算量远远小于直接计算 FFT 的运算量,所以采用联合算法在提高

精度的同时又不会增加运算时间。而对于联合算法,当  $N < M$  时的运算量,比  $N > M$  时的运算量要小,即先做小点数的 FFT 计算,再做大点数的 CZT 计算会显著节省计算量。但在有噪声的情况下,FFT 点数太低也会影响频谱范围选择的正确性,进而影响频率测量的正确性,所以具体问题应具体分析<sup>[13]</sup>。

#### 5 系统算法的 MATLAB 仿真验证

利用 MATLAB 在无噪声情况下对一个信号进行 FFT 计算得到的主瓣频谱图如图 4 所示。信号频率为 8 MHz,采样率为 70 MHz,信号序列长度为 4 096,采样点数为 8 192 点。

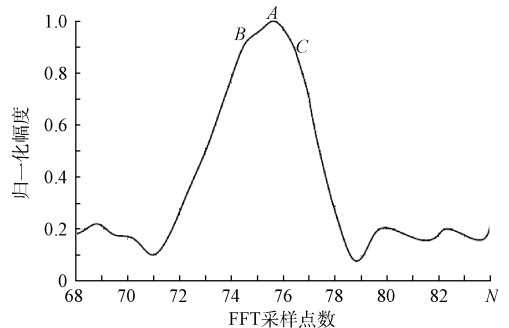


图 4 仿真信号主瓣频谱图

由于 FFT 的“泄漏效应”,图 4 的峰值点得到的频率并不是真实的差频频率,真实差频频率的峰值点应该在 A 点与其相邻点之间<sup>[14]</sup>。观察 A、B、C 三点之间的位置关系及趋势可知: B 点应该比 C 点更接近真实差频频率的峰值点。所以在进行 FFT 运算之后,选择在 A、B 两点之间进行 CZT 局部细化运算。进行 100 点 CZT 细化运算后得到的频谱图如图 5 所示。

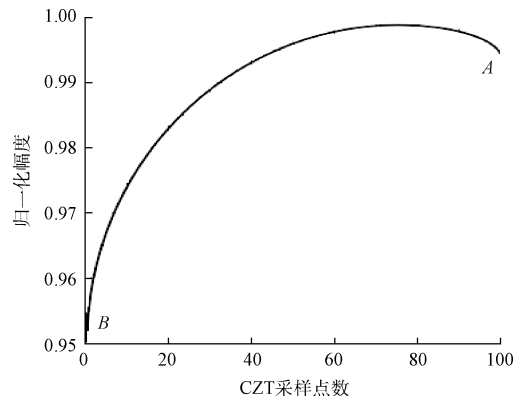


图 5 CZT 局部细化频谱图

对上述无噪声信号进行不同点数的 FFT 及 CZT 运算后得到的仿真数据如表 1 所示。其中,  $Length$  表示信号长度,  $\Delta$  表示测量频差。

表 1 仿真结果

Length	NFFT	NCZT	$\Delta/\text{Hz}$
2 048	1 024	100	-96.3
2 048	1 024	1 000	-28.1
2 048	1 024	10 000	-8.7
2 048	4 096	100	72.8
2 048	4 096	1 000	-12.4
2 048	4 096	10 000	-2.5
4 096	4 096	1 000	72.5
4 096	4 096	1 000	4.8
4 096	4 096	10 000	0.25
4 096	8 192	100	12.3
4 096	8 192	1 000	3.6
4 096	8 192	10 000	0.22

由表 1 仿真结果可知,实际频率在 MHz 量级,而测量误差却只在 100 Hz 以内,较为理想。当然,实际测量过程中由于噪声产生的偏差、量化误差或信号处理带来的一些偏差也会影响到测量结果,这也是需要注意的,而这些可通过更好的硬件设计来尽量减少噪声的干扰<sup>[15]</sup>。在硬件电路相对成熟的现在,能够对测频精度产生关键影响的依然是算法。

## 6 结 论

设计了一款基于 DSP 的 LFM CW 雷达信号处理系统,针对此信号处理系统,详细地介绍了 LFM CW 雷达的基本结构以及实现目标速度距离测量的原理,并较为深入地研究了雷达信号处理所采用的 FFT / CZT 联合算法。通过 MATLAB 仿真分析表明,FFT / CZT 联合算法可以显著地提高雷达信号处理的效率和精度。

## 参考文献

- [1] 朱文涛,郑纪彬,苏涛,等. 线性调频连续波信号的检测和参数估计[J]. 电子与信息学报,2013,35(7): 1562-1568.
- [2] 周刚,吴杰. 汽车防撞毫米波雷达信号处理[J]. 计算机测量与控制,2011,19(7):1656-1658.
- [3] 彭宇,姜红兰,杨智明,等. 基于 DSP 和 FPGA 的通用

数字信号处理系统设计[J]. 电子测量技术,2013,32(1):17-21.

- [4] 肖玮,涂亚庆,刘良兵,等. 多段同频正弦信号频谱融合的 LFM CW 雷达测距算法[J]. 仪器仪表学报,2013,34(1):94-103.
- [5] 曾国奇,李思吟,王松,等. FFT-CZT 技术在单天线 LFM CW 无线电高度表中的应用[J]. 高技术通讯,2013,23(3): 308-312.
- [6] 孟欣喜,陈文会,刘小民,等. LFM CW 雷达测距系统及其信号处理算法的设计[J]. 科学技术与工程,2011,33(11):8191-8194.
- [7] 陈海宁,陈照章,梁品. 基于 DSP 的汽车防撞雷达系统的实现[J]. 仪表技术与传感器,2009(3):84-86.
- [8] 安洪亮,夏伟杰. 随机斜率 LFM CW 抗汽车防撞雷达中的交叉干扰[J]. 电子测量技术,2012,35(10): 59-61.
- [9] 戚昊琛,胡智文,张鉴. FMCW 雷达系统的双模方向判断模块研究[J]. 电子测量与仪器学报,2014,28(5):486-492.
- [10] 张杰,白然. 应用 FFT 进行 LFM CW 雷达频谱分析的改进算法[J]. 仪表技术与传感器,2010(4):96-98.
- [11] 徐军荣,于盛林. 提高 FMCW 雷达测距精度的谱最大值估值算法[J]. 计算机技术与发展,2009,19(4): 73-75.
- [12] 王依恺. 基于 Chirp-z 变换的快速谱峰搜索方法[J]. 移动通信,2012,14(5):59-62.
- [13] 徐飞,王延暴. Chirp-z 变换在雷达信号处理中的应用[J]. 现代电子技术,2011,34(9):29-34.
- [14] 吴礼,彭树生,肖泽龙,等. 提高毫米波近程探测雷达测距精度的方法研究[J]. 兵工学报,2009,30(3): 301-305.
- [15] 孙国强,田芳宁. 雷达可靠性设计与试验验证[J]. 国外电子测量技术,2014,33(3):55-57.

## 作者简介

温宗周,1962 年出生,副教授,硕士研究生导师,主要研究方向为嵌入式控制系统及应用。

刘 焱,1990 年出生,硕士研究生,主要研究方向为嵌入式控制技术与装置。

E-mail:ichocolates@vip.qq.com