

一种基于模糊函数分析的 LFM 信号的改进方法

向 闻¹ 贾 鑫² 秦文兵³

(¹ 装备指挥技术学院研究生四队, 北京, 101416)

(² 装备指挥技术学院光电装备系, 北京, 101416)

(³ 西南电子电信技术研究所国防重点实验室, 成都, 610041)

摘 要: 针对高分辨力雷达的大时宽带宽的要求, 在分析雷达信号中常用的线性调频(LFM)脉冲信号的基础上, 根据现代信号处理的时频处理等相关理论, 提出了 LFM 周期延拓信号, 并分析了其模糊函数, 比较了 LFM 延拓信号与 LFM 信号的模糊函数在时延轴、多普勒频移轴和主轴切割图的关系与性能, 重点讨论了影响测速精度的因素, 仿真结果显示了在适当的参数条件下, LFM 周期延拓信号的速度分辨率有很大的改善。最后, 简要说明了整个测距测速系统的组成, 对雷达体制的优化有一定的参考意义。

关键词: LFM; LFM 延拓信号; 模糊函数; 测速精度

An Improved Analysis Method of LFM Signal Based on Ambiguity Function

Wen Xiang¹ Xin Jia² Wenbing Qin³

(¹ NO.4 Team of The Department of Postgraduate, The Academy of Equipment Command & Technology, Beijing, 101416)

(² Department of Photoelectric & Electronic Warfare Equipment, The Academy of Equipment Command & Technology, Beijing, 101416)

(³ National Defense Key Laboratory, Southwestern Institute Of Electronic & Telecommunication Technology, ChengDu, 610041)

Abstract: Based on the time-frequency theory of modern signal processing, a new signal named LFM extended signal is proposed for high resolution Radar From LFM signal. Comparing with the LFM signal and the new one on ambiguity function at time -Doppler frequency axes and principal axes, result shows that the new signal has higher velocity resolution at proper parameter.

Keywords: LFM; LFM Extended Signal; Ambiguity Function; Velocity-measuring Precision

1 概述

按雷达信号的分辨力理论, 在实现最佳处理和保证一定信噪比的前提下, 好的测距精度和距离分辨力主要要求雷达信号具有大的带宽; 好的测速精度和速度分辨力主要要求雷达信号具有大的时宽。线性调频信号(Linear Frequency Modulation LFM)是在宽脉冲内附加载波进行线性调频, 这种信号在大时宽的前提下又扩展了信号的带宽, 经过相应的匹配处理即脉冲压缩处理, 可以获得很高的速度分辨率和距离分辨力^[1]。在实际应用中与脉冲信号比较, 线性调频比相位编码信号更易获得, 而且接收机更简单, 可以使用一个匹配的乘法器处理, 而不必是一个匹配接收机。因此线性调频信号常应用于具有高分辨性能的星载或机载合成孔径雷达的多目标探测与成

像中, 是现代高性能雷达体制经常采用的信号波形之一^{[2][3]}。

实际中使用的线性调频信号通常是单周期的, 称为线性调频脉冲信号。根据现代信号处理的相关理论, 对 LFM 信号进行改进, 得到 LFM 延拓信号。由于从模糊函数可以导出雷达信号的分辨力、干扰抑制能力等特性, 下面就从模糊函数的角度仿真分析 LFM 信号和 LFM 延拓信号, 讨论后者的高分辨能力, 这对雷达信号处理相关技术的发展有一定参考意义。

2 信号及其模糊函数的分析与仿真

2.1 LFM 信号及其模糊函数的分析

LFM 信号即 Chirp 信号, 是指在脉冲内频率连续线性变化, 时频关系为线性的信号, 其复数表达式可写成

$$s(t) = u(t)e^{j2\pi f_0 t} = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j2\pi(f_0 t + Kt^2/2)} \quad (1)$$

复包络为

$$u(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) e^{j\pi Kt^2} \quad (2)$$

作者简介: 向闻(1981-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电子对抗、雷达信号处理等。贾鑫(1958-), 男, 教授, 博导, 国家 863 计划重大专项 707 专家组成员, 主要研究方向为空间信息对抗与信息处理。秦文兵(1978-), 男, 博士研究生, 专业方向为低截获概率通信信号处理, 主要从事扩频信号处理, 超短波通信信号处理。

其中 T 为脉冲宽度, K 为信号频率变化斜率。

根据模糊函数的定义式

$$\chi(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t) u^*(t + \tau) e^{j2\pi\xi t} dt \quad (3)$$

可得

$$x(\tau, \xi) = \exp j\pi[(\xi - K\tau)(T - \tau) - K\tau^2] \cdot \quad (4)$$

$$Sa[\pi(\xi - K\tau)(T - |\tau|)] \frac{(T - |\tau|)}{T}, (|\tau| < T)$$

所以,

$$|x(\tau, \xi)|^2 = Sa^2[\pi(\xi - K\tau)(T - |\tau|)] \cdot \frac{(T - |\tau|)^2}{T^2}, (|\tau| < T) \quad (5)$$

取 $\xi = 0$ 或 $\tau = 0$, 可得距离和速度模糊函数, 作出该信号的模糊图、模糊度图以及距离、速度模糊图, 如图 1 所示(时延 $\times 10^{-6}$ s, 多普勒频率 $\times 10^6$ Hz)。

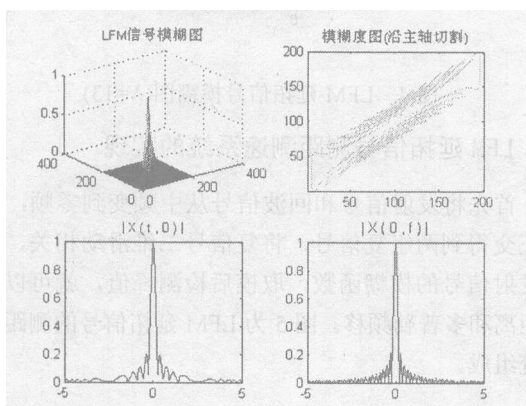


图 1 线性调频脉冲信号模糊图

2.2 LFM 信号改进方法及其模糊函数的分析

根据现代信号的时频处理的相关理论, 将 LFM 信号在时域上进行周期延拓, 就会在频域上具有更好的分辨能力, 这种“计算分辨率”的提高对频谱有着很好的改善作用^[4]。设延拓周期为 N , 则得到信号的复包络可以表示成

$$u_N(t) = u(t + nT) \quad (6)$$

信号为

$$u_N(t) = \frac{1}{\sqrt{NT}} e^{j\pi K(t+nT)^2}, \quad (0 < t < NT) \quad (7)$$

其模糊函数为

$$\chi_N(\tau, \xi) = \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nT}^{(n+1)T} u_N(t) u_N^*(t + \tau) e^{j2\pi\xi t} dt \quad (8)$$

取 $t = t_0 + nT, (n=0, 1, \dots, N-1)$, 得

$$\begin{aligned} \chi_N(\tau, \xi) &= \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nT}^{(n+1)T} u_N(t_0 + nT) u_N^*(t_0 + nT + \tau) e^{j2\pi\xi(t_0 + nT)} dt_0 \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \int_{nT}^{(n+1)T} u(t_0) u^*(t_0 + \tau) e^{j2\pi\xi t_0} e^{j2\pi\xi nT} dt_0 \\ &= \chi(\tau, \xi) e^{j\pi\xi NT} \frac{\sin(\pi\xi NT)}{N \sin(\pi\xi T)} \end{aligned} \quad (9)$$

所以

$$|\chi_N(\tau, \xi)|^2 = \left| \chi(\tau, \xi) \frac{\sin(\pi\xi NT)}{N \sin(\pi\xi T)} \right|^2 \quad (10)$$

令 $\xi = 0$, 得距离模糊函数

$$\begin{aligned} |\chi_N(\tau, 0)|^2 &= |\chi(\tau, 0)|^2 \\ &= Sa^2[\pi K\tau(T - |\tau|)] \frac{(T - |\tau|)^2}{T^2} \end{aligned} \quad (11)$$

令 $\tau = 0$, 得速度模糊函数,

$$\begin{aligned} |\chi_N(0, \xi)|^2 &= \left| \chi(0, \xi) \frac{\sin(\pi\xi NT)}{N \sin(\pi\xi T)} \right|^2 \\ &= \left| Sa^2(\pi\xi T) \frac{\sin(\pi\xi NT)}{N \sin(\pi\xi T)} \right|^2 = |Sa^2(\pi\xi NT)| \end{aligned} \quad (12)$$

作 LFM 延拓信号的模糊图、模糊度图以及距离、速度模糊图, 如图 2 所示(时延 $\times 10^{-6}$ s, 多普勒频率 $\times 10^6$ Hz)。

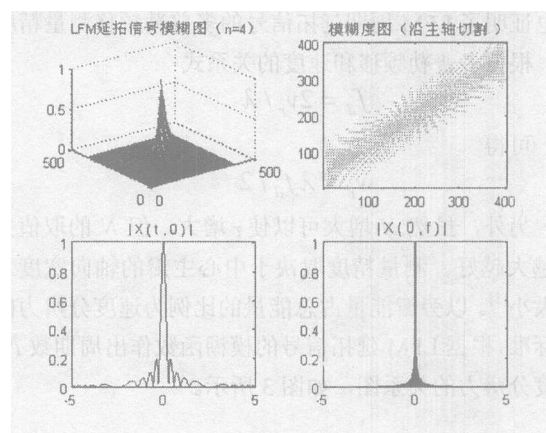


图 2 LFM 延拓信号模糊图(N=4)

3 改进信号的性能分析

3.1 模糊函数的特点

由前面的推导和仿真可以看出, 改进后的 LFM 延拓信号的模糊函数是在 LFM 信号的模糊函数上乘以 $|\sin(\pi\xi NT)/N \sin(\pi\xi T)|^2$ 得出的, N 增大时, LFM 延拓信号的模糊函数 $|\chi_N(\tau, \xi)|^2$ 将会被压缩, 具有更好的图钉性。两模糊图的刀刃方向均与 τ 轴成 θ 角倾斜, 该倾角与调频斜率 k 有关, 模糊体积基本上集中在主峰, 而离主峰较远的区域几乎为零。

3.2 速度精度的提高

从公式推导和图 1、2 的第 3、4 幅图中可以看出,

两种信号的距离模糊图是相同的,但速度模糊图是不同的,图2中 LFM 延拓信号的速度模糊函数的旁瓣更低。正因为如此,信号的性能有所提高,即速度精度提高。

根据曼拿斯(Manasse)应用后验概率法求出多普勒频移测量的最小均方根误差^{[5][6]}为

$$\delta f = \frac{1}{a(2E/N_0)^{1/2}} \quad (13)$$

其中

$$a^2 = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (2\pi t)^2 u^2(t) dt}{\int_{-\infty}^{\infty} u^2(t) dt} \quad (14)$$

$u(t)$ 为输入信号, a 为等效时宽。

而理想矩形脉冲信号的时宽可以表示为

$$a = (\pi^2 \tau^2 / 3)^{1/2} \quad (15)$$

其中 τ 为脉冲宽度,代入(13)式,多普勒频移误差为

$$\delta f = \frac{\sqrt{3}}{(\pi \tau (2E/N_0)^{1/2})} \quad (16)$$

τ 越大,频移测量精度越高。LFM 周期延拓信号相当于在 LFM 脉冲信号的基础上加大了 τ , 这样,从理论上也证明了 LFM 周期延拓信号的多普勒频移测量精度更高。根据多普勒频移和速度的关系式

$$f_d = 2v_r / \lambda \quad (17)$$

可得

$$v_r = \lambda f_d / 2 \quad (18)$$

另外,虽然 N 增大可以使 τ 增大,但 N 的取值并不是越大越好。测量精度取决于中心主瓣的轴向宽度及旁瓣大小^[5]。以旁瓣能量占总能量的比例为速度分辨力的衡量标准,根据 LFM 延拓信号的模糊函数作出周期数 N 与速度分辨力的关系图,如图3所示。

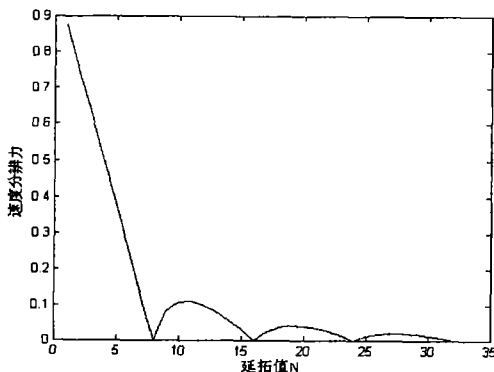


图3 周期数 N 与速度分辨力关系图

由图3可以看出,当 N 取得合适的值时,即 N 为2的指数次幂时,速度模糊图旁瓣几乎为零,旁瓣抑制很有效,所以速度分辨力很好。因此,这种信号应用于高

性能的雷达体制中将会起到更好的效果。但为了使系统更简单,取 $N=8$ 就可以达到这样的效果了。值得注意的是,在周期信号的仿真中发现,也只有当 N 为2的指数次幂时,才能获得单峰信号,否则会有两个峰值,如图4所示,当 $N=13$ 时,模糊函数有两个峰值。

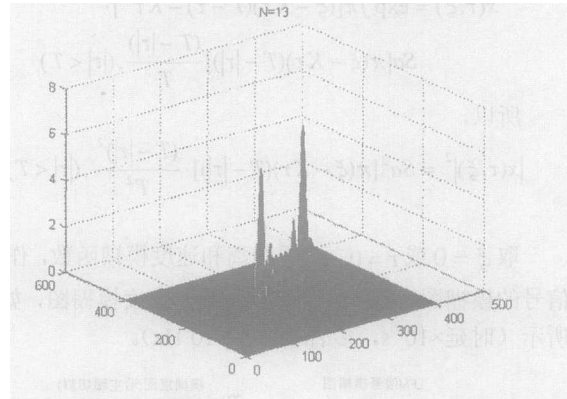


图4 LFM 延拓信号模糊图($N=13$)

3.3 LFM 延拓信号测距测速系统的实现

首先将发射信号和回波信号从中频变到零频,再分别正交得到两组复信号,将复信号二维滑动相关,可得到发射信号的模糊函数,取模后检测峰值,就可以计算出距离和多普勒频移。图5为 LFM 延拓信号的测距测速系统组成。

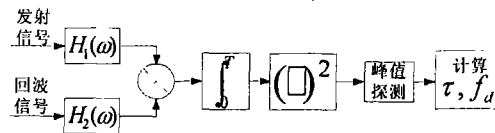


图5 LFM 延拓信号测距测速系统组成

4 结束语

LFM 信号通过脉冲压缩技术可以解决雷达信号中常见的距离分辨力和速度分辨力不可同时兼顾的问题,因此该技术在现代各种雷达体制中被广泛应用。本文通过对 LFM 信号和 LFM 延拓信号及其模糊函数的分析,详细讨论了 LFM 延拓信号的性能,并从理论分析测速精度条件,得出在周期数取得合适的值时,速度模糊图的旁瓣抑制得很好,而且计算量不大。此外,从信号能量来看,当信号具有较大的能量时,对目标的发现能力也更强,LFM 延拓信号也更有利。唯一不足之处在于存在距离-多普勒耦合,使在倾斜轴附近的目标无法分辨。综合来看,这种 LFM 延拓信号还是具有很高的测距测速性能,在高性能雷达体制中将会有很好的应用前景。

参考文献

- [1] 马晓岩, 向家彬等编著, 雷达信号处理, 湖南科学技术出版社, 湖南, 1999.7
- [2] 费元春, 苏广川, 米红等编著, 宽带雷达信号产生技术, 国防工业出版社, 北京, 2002, 1
- [3] 杨建宇, LFM CW 雷达信号模糊函数分析, 信号处理, 成都, 2002, 18(1), 39-42
- [4] 胡广书编著, 数字信号处理——理论、算法与实现(第二版), 清华大学出版社, 北京, 2003, 8
- [5] 蔡希尧编著, 雷达系统概论, 科学出版社, 北京, 1983
- [6] Tujaka S, On frequency stability of transmitter in LFM CW MTD radar, Microwaves and Radar, 1998, MIKON '98, 12th International Conference on vol.3, May, 1998, Vol.3, 776-780,