

一种线性调频信号参数提取方法

李彦¹, 姜军¹, 朱丰², 柏又青¹

(1.空军工程大学理学院,陕西西安,710051;2.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077)

摘要:针对线性调频(LFM)信号参数提取问题,提出了一种基于 Erosion 变换和 Hough 变换的 LFM 信号参数提取方法。利用 B-分布分析方法描述 LFM 信号,在此基础上,进一步利用 Erosion 变换突出雷达 LFM 信号的特点,利用 Hough 变换提取 LFM 信号参数。仿真分析表明:该方法能够较精确的提取出 LFM 信号参数,误差不超过 1%,并具有良好的抗噪性能。

关键词 LFM 信号;参数提取;B-分布;Erosion 变换;Hough 变换

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.06.011

中图分类号 TN953 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)06-0049-04

A Novel Parameter Extraction Method of Linear Frequency Modulation Signal

LI Yan¹, JIANG Jun¹, ZHU Feng², BAI You-qing¹

(1.Science College, AFEU, Xi'an 710051, China;

2.Information and Navigation College, AFEU, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aimed at the parameter extraction of Linear Frequency Modulation (LFM) signal, an novel parameter extraction method is proposed in this paper based on Erosion transform and Hough transform. First, LFM signal is described by using B-distribution analysis method. On the basis of this, the Erosion transform is utilized to highlight the characters of radar LFM signal, and then Hough transform is employed to extract LFM signal parameters. The simulation indicates that the method can not only extract the parameters of LFM signal in precision, but also has a good anti-noise performance.

Key words: LFM signal; parameter extraction; B-distribution; erosion transform; Hough transform

线性调频(Linear Frequency Modulation, LFM)信号是一种常见的雷达信号形式,在雷达成像和目标识别中具有广泛的应用^[1]。短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)^[2]、Gabor 变换和 Wigner-Ville 分布(WVD)等时频分析方法可以有效地描述该信号时域、频域上的一些特性^[3-4]。其中,STFT 和 Gabor 变换是线性时频分析方法,而 WVD 是二次型时频分析方法。B-分布是由 Barham Barkat 和 Boualem Boashash 2 位学者

于 2001 年提出的一种经典的时频分析方法^[5],它也是一种二次型时频分析方法,相对于 WVD,该方法具有很多特殊的优势。因此,本文主要利用 B-分布分析 LFM 信号^[6]。

众所周知,LFM 信号的时频分布结果是一条直线。要解决的问题是怎样提取该信号的重要参数。首先,用图像处理方法把这条线变细,可以利用 Erosion 变换来实现该过程^[7],这为 LFM 信号参数的提取奠定了基础。进一步,再利用 Hough 变换来

收稿日期:2013-09-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61174194)

作者简介:李彦(1963-),男,北京人,教授,主要从事现代电路理论研究.E-mail: lilyan@kgd.mtn

引用格式: 李彦,姜军,朱丰,等.一种线性调频信号参数提取方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(6):49-52. LI Yan, JIANG Jun, ZHANG Qun, et al. A novel parameter extraction method of linear frequency modulation signal[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(6): 49-52.

完成 LFM 信号参数的提取^[8]。

1 LFM 信号模型

设 LFM 信号表达式为:

$$x(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp\left(j2\pi\left(f_c t + \frac{1}{2}\mu t^2\right)\right) \quad (1)$$

$$\text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) = \begin{cases} 1, & -T_p/2 \leq t \leq T_p/2 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_c 为 LFM 信号的载频; T_p 为脉冲宽度; μ 为脉冲调频率。

2 时频分析方法

本文采用 B-分布分析方法,它是一种典型的二次型时频分析方法。为了说明这一点,下面给出二次型的一般形式:

$$\rho_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{j2\pi v(u - t)\} g(v, \tau) \times z(u + 0.5\tau) z^*(u + 0.5\tau) \exp\{-j2\pi f\tau\} dv du d\tau \quad (3)$$

式中: $z(t)$ 为解析信号; $g(v, \tau)$ 为权重函数,也称为 kernel 核,它决定了分布性能。在 B-分布中,核函数可表示为:

$$\mathbf{G}(t, \tau) = \left[\frac{|\tau|}{\cosh^2(t)} \right]^\alpha \quad (4)$$

式中 α 是一个实参数,根据应用选择该参数,通常使 $(0 < \alpha \leq 1)$,那么:

$$g(v, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{G}(t, \tau) \exp\{-j2\pi v t\} dt \quad (5)$$

根据式(3)~式(5),B-分布分析的表达式可记为:

$$\rho_z(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{G}(u - t, \tau) z(u + 0.5\tau) z^*(u + 0.5\tau) \exp\{-j2\pi f\tau\} du d\tau \quad (6)$$

上式的离散形式为:

$$\rho_z(n, f) = \sum_{m=-M}^M \sum_{p=-M}^M \mathbf{G}(p, m) \times z(n + p + 0.5m) z^*(n + p - 0.5m) \exp\{-j2\pi m f\} \quad (7)$$

3 LFM 信号参数提取方法

由于 B-分布分析的分辨率限制,在时频平面的线相对较粗。这样不利于相关参数的提取。因此,采用一些图像处理方法把线变细,本文采用 Erosion 变换。在此基础上,就可以用多项式描述该线,并提取 LFM 信号参数。

3.1 Erosion 变换

下面对 $\rho_z(n, f)$ 进行相关处理。

1) 设 $\rho_z(n, f)$ 为 N 行 F 列的矩阵。归一化结果为:

$$\rho'_z(n, f) = \sum_{n=1}^N \sum_{f=1}^F \frac{\rho_z(n, f)}{\max(\rho_z(n, f))} \quad (8)$$

2) 设计门限 H 。如果 $\rho'_z(n, f)$ 大于 H , 则输出为 1, 否则,输出为 0, 即:

$$\rho''_z(n, f) = \begin{cases} 1, & \rho'_z(n, f) \geq H \\ 0, & \rho'_z(n, f) < H \end{cases} \quad (9)$$

3) 设参数为 b 对 $\rho''_z(n, f)$ 进行 Erosion 的变换,即:

$$(\rho''_z \ominus b)(n, f) = \min \{ \rho''_z(n + n', f + f') - b(n', f') \mid (n', f') \in D_b \} \quad (10)$$

式中 D_b 为 ρ''_z 的有效面积。若值为 $-\infty$, 则 $\rho''_z(n, f)$ 不在 D_b 区域内。若 b 在 D_b 区域内, 则用 ρ''_z 的值减去 b 获得预期的最小值。

3.2 Hough 变换

在上述工作的基础上,进一步用 Hough 变换来提取 LFM 信号参数。

Hough 变换是一种有效的图像线条和边缘检测方法,具有较优的鲁棒性。这种方法,检测问题在参数空间解决,而不是图像空间。在参数空间利用累积统计来完成检测。最后,根据获得的重要参数转换到图像空间。Hough 变换的主要思想是点线对偶性。设在 UV 空间,所有通过 (u, v) 点的直线满足:

$$v = pu + q \quad (11)$$

式中: p 为斜率; q 为截距。同时式(11)也可以表示为:

$$q = -up + v \quad (12)$$

该式表明在 PQ 空间产生一条新的直线。即在 UV 空间获得 2 个不同的点,可以转换为 PQ 空间中直线的参数,见图 1。因此,Hough 变换将图像空间中直线的检测根据变换关系转换为参数空间中峰值的检测。

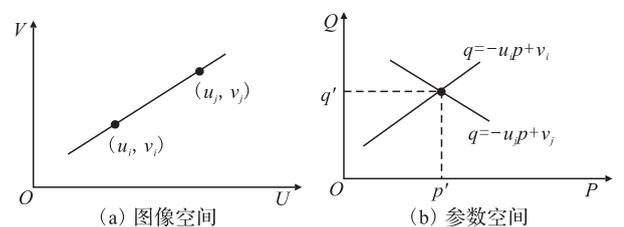


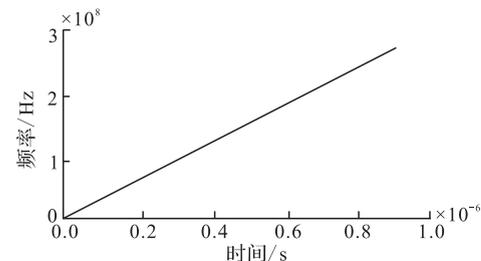
图 1 Hough 变换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Hough transform

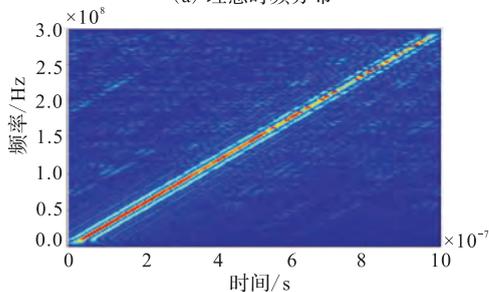
利用 Hough 变换,脉冲的持续时间、带宽和频率变化可以通过式(12)中的斜率和截距等参数来获得。

4 仿真分析

为了验证本文方法的有效性,下面展开相关的计算机仿真实验。设 LFM 信号的脉冲宽度为 10^{-6} s,带宽 $B=300$ MHz。计算得到调频脉冲斜率 $\mu=3 \times 10^{14}$ 。图 2(a)为理想时频分布,图 2(b)为 B-分布结果。设 $H=0.2824$,根据式(8)、式(9),得到归一化和门限处理结果见图 3(a)。根据式(10)进行 Erosion 变换,结果见图 3(b)。



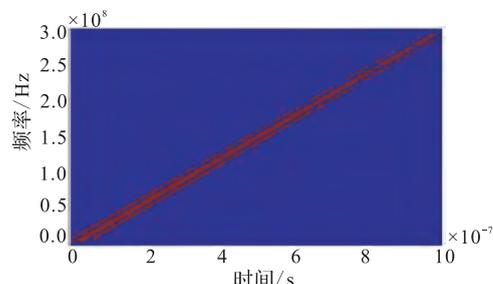
(a) 理想时频分布



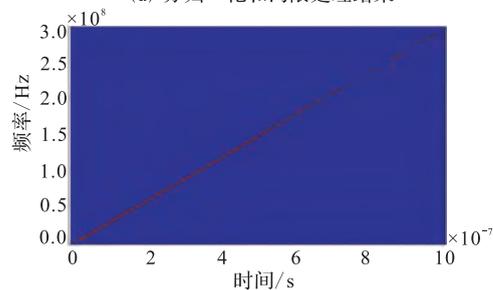
(b) B-分布方法获得的时频分布结果

图 2 LFM 信号时频分布结果

Fig. 2 Time-frequency distribution of LFM signal



(a) 分归一化和门限处理结果



(b) Erosion变换结果

图 3 Erosion 变换相关处理结果

Fig. 3 Related processing result of Erosion transform

从图 4 和表 1 中,可以看出,LFM 信号脉冲持续时间为 10^{-6} s,带宽为 2.99×10^8 Hz,调频率为 2.99×10^{14} 。这个结果和原来假设的信号参数几无差别,统计误差不超过 1%。若采用文献[9]提出的基于匹配傅里叶变换的 LFM 信号参数提取方法对雷达回波信号进行调频率估计,结果为 2.98×10^{14} 。显然本文所提算法的精度得到提高。

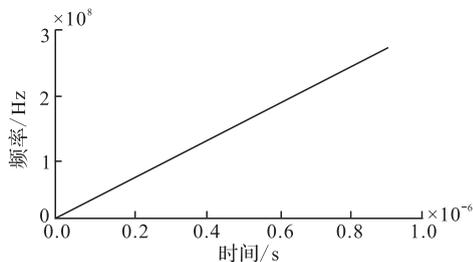


图 4 利用 Hough 变换重建出的 LFM 信号时频分布结果

Fig. 4 Time-frequency distribution of reconstructed LFM signal based on Hough transform

表 1 利用 Hough 变换提取到的 LFM 信号参数

Tab.1 Extracted parameters of LFM signal based on Hough transform

斜率	2.99×10^{14}
截距	0.01×10^8
峰值	487

为分析算法的抗噪性,回波信号中加入高斯白噪声,SNR=-5 dB时,B-分布结果见图 5,显然,由于噪声的影响,时频谱图不再清晰地表现为一条直线。设 $H=0.2824$,根据式(8)、式(9),得到归一化和门限处理结果见图 6(a)。根据式(10)进行 Erosion 变换,结果见图 6(b)。对图 6(b)进行 Hough 变换重建出的 LFM 信号时频分布结果见图 7,提取到的信号参数见表 2。

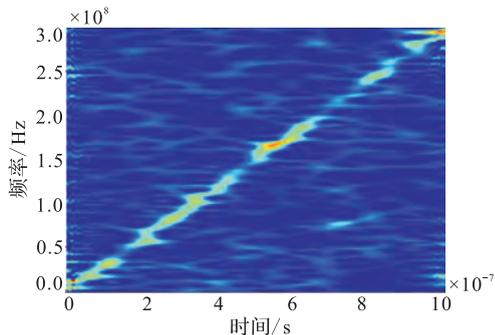


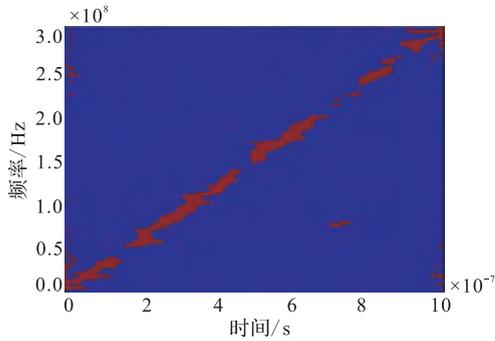
图 5 SNR = -5 dB 时,B-分布方法获得时频分布结果

Fig.5 Time-frequency distribution based on B-distribution with SNR = -5 dB

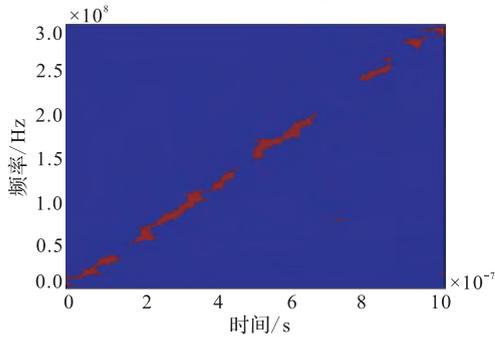
表2 SNR = -5 dB时,利用 Hough 变换提取到的 LFM 信号参数

Tab.2 Extracted parameters of LFM signal based on Hough transform with SNR = -5 dB

斜率	2.99×10^{14}
截距	0.01×10^8
峰值	364



(a) 分归一化和门限处理结果



(b) Erosion变换结果

图6 SNR = -5 dB时,Erosion 变换相关处理结果

Fig.6 Related processing result of Erosion transform with SNR = -5 dB

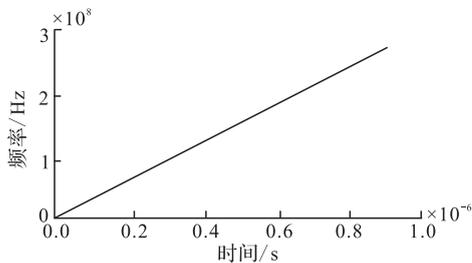


图7 SNR = -5 dB时,利用 Hough 变换重建出的 LFM 信号时频分布结果

Fig.7 Time-frequency distribution of reconstructed LFM signal based on Hough transform with SNR = -5 dB

从图7和表2中可以看出,LFM信号脉冲持续时间为 10^{-6} s,带宽为 2.98×10^8 Hz,调频率为 2.98×10^{14} 。这个结果和原来假设的信号参数十分吻合,说明本文所提算法具有很好的抗噪性。

5 结语

本文讨论了雷达 LFM 信号参数的提取方法。

用 B-分布分析方法描述了 LFM 信号的时频特性。在此基础上,经过 Erosion 变换和 Hough 变换等相关处理提取 LFM 信号参数。仿真实验验证了本文方法的有效性,其误差不超过 1%。本文的研究工作是一些基础性研究,为分析 LFM 信号提供了一些思路和方法。

参考文献(References):

- [1] Skolnik M I. Introduction to radar[M]. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [2] Douglas L L, Thomas W P. A resolution comparison of several time-frequency representations[J]. IEEE trans signal processing, 1992, 40(2): 413-420.
- [3] Barbarossa S. Analysis of multicomponent LFM signals by a combined wigner-hough transform. IEEE trans signal processing, 1995, 43(6): 1511-1515.
- [4] Guohua Wei, Siliang Wu, Mao E. Analysis of multicomponent LFM signals using time-frequency and the gray-scale inverse Hough transform [C]//IEEE workshop on statistical signal processing. [S. l.]: IEEE press, 2003: 109-193.
- [5] Barkat B, Boashash B. A high-resolution quadratic time-frequency distribution for multicomponent signals analysis[J]. IEEE transactions on signal processing, 2001, 49(10): 2232-2239.
- [6] Guan Yongsheng, Zuo Qunsheng, Liu Hongwei. Micro-motion targets resolution in a high noise environment[J]. Journal of electronics & information technology, 2010, 82(11): 2680-2685.
- [7] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. Digital image processing using Matlab [M]. Beijing: Publishing house of electronics industry, 2005.
- [8] Hough P V C. Methods and means for recognizing complex patterns[P]. U.S. patent 069654, U.S. pat. off., Washington, DC, 1962.
- [9] 安伟刚, 程少云. 基于 DMFT 的 LFM 信号参数估计[J]. 现代电子技术, 2009, 288(1): 1-3.
AN Weigang, CHENG Shaoyun. LFM signal parameter estimation based on discrete match Fourier transform [J]. Modern electronics technique, 2009, 288(1): 1-3. (in Chinese)

(编辑:田新华)