## Journal of System Simulation

Volume 30 | Issue 9

Article 7

1-8-2019

# Parameter Estimation of LFMCW Signals Based on Improved SM Method

Jiang Li

School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

Junni Zhou

School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

**Runling Yang** 

School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

Liu Li

School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

Follow this and additional works at: https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal

Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

## Parameter Estimation of LFMCW Signals Based on Improved SM Method

#### Abstract

Abstract: The parameter estimation of linear frequency modulation continuous wave (LFMCW) signal is a research hotspot in electronic reconnaissance systems. In this paper, the time frequency distribution feature of LFMCW signals is studied first. *Based on the improved S-method (SM), an algorithm for parameter estimation of LFMCW signals is proposed. It uses short-time Fourier transform (STFT) to calculate the SM with adaptive window width, which can suppress the crossterm interferences and improve the time-frequency resolution.* Theoretical analysis and simulation experiment results demonstrate the validity of the proposed algorithm under low SNR.

### Keywords

linear frequency modulated continuous wave signal, time frequency distribution, parameter estimation, S-method

## **Recommended Citation**

Jiang Li, Zhou Junni, Yang Runling, Liu Li. Parameter Estimation of LFMCW Signals Based on Improved SM Method[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3283-3287.

第 30 卷第 9 期 2018 年 9 月

# 利用改进 SM 的 LFMCW 信号参数估计算法

江莉,周军妮,杨润玲,刘利 (西安建筑科技大学信息与控制工程学院,陕西西安 710055)

摘要:对线性调频连续波(LFMCW, Linear Frequency Modulated Continuous Wave signal)信号进行参数估计是近年来电子侦察的研究热点问题。针对 LFMCW 信号在时频图上的分布特点,提出了一种基于改进SM (S-Method)的 LFMCW 信号参数估计算法,采用一种自适应窗宽的短时傅里叶变换 (STFT, Short-time Fourier Transform)算法计算SM,抑制交叉项干扰的同时,提高时频分辨率,进而估计信号的参数。理论分析与仿真实验表明,提出方法能够在低信噪比下有效估计信号参数。 关键词:线性调频连续波信号;时频分布;参数估计;S-方法 中图分类号:TN971 文献标识码:A 文章编号:1004-731X (2018) 09-3283-05

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809007

#### Parameter Estimation of LFMCW Signals Based on Improved SM Method

Jiang Li, Zhou Junni, Yang Runling, Liu Li

(School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** The parameter estimation of linear frequency modulation continuous wave (LFMCW) signal is a research hotspot in electronic reconnaissance systems. In this paper, the time frequency distribution feature of LFMCW signals is studied first. *Based on the improved S-method (SM), an algorithm for parameter estimation of LFMCW signals is proposed. It uses short-time Fourier transform (STFT) to calculate the SM with adaptive window width, which can suppress the crossterm interferences and improve the time-frequency resolution.* Theoretical analysis and simulation experiment results demonstrate the validity of the proposed algorithm under low SNR.

**Keywords:** linear frequency modulated continuous wave signal; time frequency distribution; parameter estimation; S-method

## 引言

在现代雷达系统中,具备低截获概率(LPI, Low Probability of Intercept)特性的雷达系统使用 越来越广泛,所采用的信号形式也越来越复杂多 样。LFMCW 是一类典型的低截获概率雷达信号。



收稿日期:2016-12-02 修回日期:2017-04-14; 基金项目:陕西省教育厅专项科研计划(16JK1429); 作者简介:江莉(1982-),女,陕西商洛,博士,讲师,研究方向为智能信号处理;周军妮(1977-), 女,陕西西安,硕士,讲师,研究方向为信号与信 息处理。 文献[1]结合 Choi-Williams 分布和 Hough 变换来估 计单周期 LFMCW 信号参数。文献[2]提出一种基 于周期 Choi-Williams 的估计方法。文献[3-5]采用 基于 WHT 的方法,其中文献[3]结合自相关法进行 参数估计;文献[4]直接用线积分 WHT 提取 LFMCW 信号特征;文献[5]采用基于周期 WHT 的 方法完成对称三角线性调频连续波信号的参数估 计。文献[6]提出高阶统计量与滤波器组结合的 LFMCW 信号参数估计方法。文献[7]利用信号的自 相关,并结合解线调法和共轭匹配法来估计锯齿波 LFMCW 信号参数。此外文献[8]利用 Chirplet 变换

Journal	of	System	Simu	lation,	Vo	l. 30	[2018	], Iss.	9, Art	. 7
---------	----	--------	------	---------	----	-------	-------	---------	--------	-----

第 30 卷第 9 期	系统仿真学报	Vol. 30 No. 9
2018年9月	Journal of System Simulation	Sep., 2018

将信号转化为系数,并结合迭代掩模的方法来实现 信号的参数估计。

LFMCW 信号的时频变化较为复杂,传统的基于时频图的估计方法很难适用,而解线调法、帧间相关法等方法需要一定的先验知识。本文提出一种基于自适应窗宽的改进二次时频分布——SM 方法来实现 LFMCW 信号参数估计。

### 1 信号模型

LFMCW 信号通常应用于连续波体制雷达系统中,是一种典型的 LPI 信号,包括锯齿波信号和三角波信号。锯齿波 LFMCW 信号可看作是对 LFM 脉冲信号进行周期延拓,即多周期的 LFM 信号,而三角波 LFMCW 信号的调频斜率正、负交替出现。实际截获的 LFMCW 信号不一定包括完整周期,且往往会存在一个时延,如图1所示。图1(a)~(b)分别表示截获到的锯齿波调制和三角波调制的 LFMCW 信号的瞬时频率。图中,信号的归一化起始频率和截止频率分别为 0.15 和 0.3,两种信号的调频斜率相同。





LPI 信号,具有大的时宽带宽积。这些特征对低信 噪比下的信号参数估计等带来较大困难。

## 2 基于自适应窗宽的改进 SM 算法

文献[9]在 STFT 的基础上,提出了一种二次时 频分布算法——SM 方法。该算法计算复杂度较低, 且能有效抑制交叉项干扰,提高时频分辨率。根据 Heisenberg 不确定性原理,短的窗函数具有较好的 时间分辨率,而长的窗函数具有较好的频率分辨 率。窗函数的选择是 STFT 的关键,直接影响着 STFT 的分辨性能。

物理学家 L. Cohen 于 1966 年将所有具有双线 性特性的时频分布用统一的形式表示,即

$$C(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x \left( u + \frac{\tau}{2} \right) x^* \left( u - \frac{\tau}{2} \right) \times$$

$$\phi(\theta,\tau) e^{-j2\pi(\theta t + f\tau - u\theta)} du d\tau d\theta$$
(1)

式中:  $\phi(\theta, \tau)$  称为核函数。定义瞬时自相关函数为  $r(u, \tau) = r\left(u + \frac{\tau}{2}\right)r^*\left(u - \frac{\tau}{2}\right)$  (2)

$$r(u,\tau) = x \left( u + \frac{\tau}{2} \right) x^* \left( u - \frac{\tau}{2} \right)$$
(2)

当  $\phi(\theta, \tau) = 1$ , C(t, f) 退化为 Wigner-Ville 分布 (WVD), 定义为

$$WVD_{x}(t,f) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t,\tau)e^{-j2\pi f\tau}d\tau$$
(3)

WVD 对于单一 LFM 信号具有最优的能量聚 集特性,但对其它调制信号会产生各种交叉项干 扰。通过设计不同的核函数,可抑制交叉项干扰, 得到不同的 Cohen 类时频分布。伪魏格纳—维利 分布(PWVD, Pseudo-Wigner-Ville Distribution)可 表示为

$$PWVD(t,f) = \int h(\tau)r(t,\tau)e^{-j2\pi f\tau}d\tau \qquad (4)$$

平滑伪魏格纳—维利分布(SPWVD, Smoothed Pseudo-Wigner-Ville Distribution)可表示为

$$SPWVD(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau)g(u)r(t-u,\tau) \times e^{-j\omega\tau} du d\tau$$
(5)

以简单的四分量高斯信号为例,分别利用 STFT、WVD、PWVD和 SPWVD 得到其时频图, 如图 2 所示。

http://www.china-simulation.com

https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal/vol30/iss9/7 DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201809007 第 30 卷第 9 期 2018 年 9 月

江莉,等:利用改进 SM 的 LFMCW 信号参数估计算法



根据 STFT 的定义以及傅里叶性质,式(4)可改 写为<sup>[10]</sup>

$$PWVD(t,\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} STFT(t,\omega+\theta) \times STFT^{*}(t,\omega-\theta)d\theta$$
(6)

再引入频域窗函数,抑制 PWVD 的交叉项。 SM 算法定义如式(7)。

$$SM(t,\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(\theta) STFT(t,\omega+\theta) \times STFT^{*}(t,\omega-\theta) d\theta$$
(7)

式中: p(0)为频域窗函数,用于抑制交叉项。

可见,SM的计算可由STFT 实现。窗函数  $p(\theta)$ 直接决定了SM的时频分布性能。如果窗函数太宽,SM的交叉项和噪声抑制能力下降;如果窗函数太窄,SM的能量聚集性将下降。

这里,我们采用一种自适应窗宽的STFT算法。 假设 $X_w(n,k)$ 是窗函数窗宽为W时信号的STFT,

$$X_W(n,k) = \sum_{m=-W/2}^{W/2-1} p(m\Delta t)s(n\Delta t + m\Delta t) \times$$

$$e^{-j(2\pi/N_w)km}$$
(8)

定义局部时频能量聚集性函数为[11]

$$C_{W}(n,k) = \frac{\sum_{m} \sum_{l} D(m-n,l-k)^{4} \left| X_{W}(m-n,l-k) \right|^{4}}{\left( \sum_{m} \sum_{l} D(m-n,l-k)^{2} \left| X_{W}(m-n,l-k) \right|^{2} \right)^{2}}$$
(9)

式中: *D*(*n*,*k*)为低通型局部加权函数。进而,定 义聚集性准则

$$i_C(n,k) = \arg\max_{W} C_W(n,k) \tag{10}$$

应该选取使得能量聚集性最大的窗口宽度,从而提升 STFT 的时频聚集性。这里,定义全局最优窗口 长度为

$$W_{opt}(n) = \max_{l} i_C(n,k) \tag{11}$$

## 3 实验结果与分析

首先, 仿真产生由 LFM 信号和正弦频率调制 信号构成的多分量信号, 分别计算固定窗宽 SM 和 自适应窗宽 SM, 如图 3 所示。与固定窗宽 SM 相 比, 自适应窗宽 SM 进一步提升了时频能量聚集性

#### Journal of System Simulation, Vol. 30 [2018], Iss. 9, Art. 7







其次,通过本文提出的自适应方法计算并搜索 最优窗函数,计算图 1 所示 LFMCW 信号的 SM 时 频图,再根据时频图峰值脊线估计信号参数。为 了验证算法有效性,叠加高斯白噪声,信噪比从 -10 dB~10 dB。在每一信噪比下,进行 100 次蒙特 卡罗实验,并计算相对均方根误差。

图 4 是采用基于 STFT 的时频图算法的估计结 果。由图 4(a)可以看出,该方法对两种 LFMCW 信 号的周期估计性能相当。图 4(b)是起始频率和截止 频率的估计结果。由于周期估计是起始频率和截止 频率估计的前提,对三角波 LFMCW 信号的估计 略优于锯齿波 LFMCW。当信噪比小于 0 dB 时, 算法的估计性能下降较快。



Vol. 30 No. 9

Sep., 2018



图 5 是基于改进 SM 方法的估计结果,信号模型及实验方法相同。



第 30 卷第 9 期 2018 年 9 月



(b) 起始频率与截止频率估计



从实验结果可以看出,改进的 SM 方法对调制 周期估计优于 STFT 方法;对于起始频率和截止 频率估计来说,当信噪比小于等于 2 dB 时,改进 的 SM 方法要明显优于 STFT 方法,体现出 SM 方 法在低信噪比下的优势。

## 4 结论

LPI 信号的参数估计是电子侦察中的难点。针 对现有方法对 LFMCW 信号的参数估计的局限性, 本文提出一种基于改进 SM 的参数估计方法,能有 效抑制交叉项的干扰,提高时频分辨率。通过对不 同仿真信号进行实验,并与基于 STFT 方法的性能 进行比较。结果表明,提出算法具有较好的抑制作 用,提高了参数的估计性能。

## 参考文献:

- [1] Geroleo F G, Pearce M B. Detection and Estimation of Multi-pulse LFMCW Radar Signals[C]// Proceedings of the 2010 IEEE International Radar Conference, Arlington, Washington DC, USA, 2010: 1009-1013.
- [2] 刘颖, 陈殿仁. 基于周期 Choi-Williams Hough 变换的 线性调频连续波信号参数估计算法[J]. 电子与信息学 报, 2015, 37(5): 1135-1140.

Liu Ying, Chen Dianren. Parameters Estimation Algorithm of Linear Frequency Modulated Continuous Wave Signals Based on Period Choi-Williams Hough Transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(5): 1135-1140.

- [3] 刘勇,张国毅,张旭洲.线性调频连续波雷达信号的参数估计[J].信号处理,2014,30(7):848-855.
  Liu Yong, Zhang Guoyi, Zhang Xuzhou. Parameter Estimation of LFMCW Radar Signal[J]. Journal of Signal Processing, 2014, 30(7): 848-855.
- [4] Liu Feng, Xu Huifa, Sun Dapeng, et al. Feature Extraction of Symmetrical Triangular LFMCW Signal Using Wigner-hough Transform[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (S1004-0579), 2009, 18(4): 478-483.
- [5] Geroleo F G, Pearce M B. Detection and Estimation of LFMCW Radar Signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems (S0018-9251), 2012, 48(1): 405-418.
- [6] 冯志红, 赖涛, 赵拥军. 低信噪比下对称三角线性调频信号参数估计[J]. 电波科学学报, 2012, 3(27): 520-525.

Feng Zhihong, Lai Tao, Zhao Yongjun. Parameter Estimation of STLFMCW Signals in Low SNR[J]. Chinese Journal of Radio Science. 2012, 3(27): 520-525.

- [7] 刘勇,张国毅,张旭洲.低信噪比下LFMCW信号的参数估计[J].电子信息对抗技术,2014,29(6):28-33.
  Liu Yong, Zhang Guoyi, Zhang Xuzhou. Parameter Estimation of LFMCW Signal at Low SNR[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2014, 29(6):28-33.
- [8] MIllioz F, Davies M. Sparse Detection In the Chirplet Transform: Application to FMCW radar signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing (S1053-587X), 2012, 60(6): 2800-2813.
- [9] Stankovic L, Thayaparan T, Dakovic M. Signal Decomposition by Using the S-Method with Application to the Analysis of HF Radar Signals in Sea-Clutter[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(11): 4332-4342.
- [10] Stankovic L. A Method for Time-frequency Analysis[J].
   IEEE Trans. on Signal Processing (S1053-587X), 1994, 42(1): 225-229.
- [11] Kwok H K, Jones D L. Improved Instantaneous Frequency Estimation Using an Adaptive Short-time Fourier Transform[J]. IEEE Trans. on Signal Processing (S1053-587X), 2000, 48(10): 2964-2972.