



正弦调频连续波信号参数估计新方法

聂小鹏¹, 沈祖成¹, 王晓峰², 王春雨²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 空军航空大学信息对抗系, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对电子侦察截获的正弦调频连续波信号, 提出一种调制参数估计的新方法。首先基于信号调制函数的周期性, 采用自相关函数完成调制频率估计, 然后基于重排谱图提取调频曲线, 对调频曲线进行修正, 进而实现载频、调制指数和初始调制相位的估计。仿真实验表明, 该方法在无需先验知识, 且信噪比为-5 dB时, 各调制参数均具有较高的估计精度, 均方误差均能低于-25 dB。

关键词: 正弦调频连续波信号; 参数估计; 自相关函数; 重排谱图

中图分类号: TN971.1

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018089

A new method of parameter estimation for sinusoidal frequency modulated continuous wave signal

NIE Xiaopeng¹, SHEN Zucheng¹, WANG Xiaofeng², WANG Chunyu²

1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China
2. Department of Information Countermeasure, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China

Abstract: A new method of modulation parameter estimation was proposed to process the sinusoidal frequency modulated continuous wave signal intercepted by electronic reconnaissance. Firstly, based on the periodicity of signal modulation function, the modulated frequency was estimated using autocorrelation function. And then, the frequency modulation curve was extracted and revised based on rearranging spectrogram. Finally, the carrier frequency, the modulation exponent and the initial phase were estimated by the frequency modulation curve. The simulation experiment results show that the proposed method does not require prior knowledge, and the mean square error of each modulation parameter can reach -25 dB by using this method when SNR is -5 dB.

Key words: sinusoidal frequency modulated continuous wave signal, parameter estimation, autocorrelation function, rearrangement spectrogram

1 引言

正弦调频信号的模糊函数介于“刀刃型”和“图钉型”之间, 在现代雷达和无线电引信中有着

广泛的应用, 且经常以连续波形式出现^[1,2]。应用正弦调频连续波信号的雷达系统可以实现高精度测速、测距, 并具有较强的抗噪性。电子侦察和电子干扰是电子战的重要形式。在电子战中, 有

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2018-01-18

效截获敌方信号并进行识别和参数估计是实现电子干扰的前提, 因此研究正弦调频连续波信号的参数估计对于电子战具有重要意义。

目前, 已有不少文献提出了各种正弦调频连续波信号参数估计方法, 但多数只适用于协作接收或部分参数已知情况, 不适用于无任何先验知识的电子侦察场合^[3,4]。针对非协作条件下正弦调频连续波信号参数估计问题, 参考文献[5]将信号建模为高阶多项式相位信号, 利用离散多项式变换完成参数估计, 但多项式阶数选择制约了参数估计性能; 参考文献[6]提出一种基于时频脊线提取和随机 Hough 变换的正弦调频信号参数估计方法, 该方法的参数估计性能受限于选取的时频工具性能, 且曲线拟合方法存在多值性问题; 参考文献[7]提出了基于自适应窗长 Wigner 变换的伪码正弦调频信号参数估计, 算法十分复杂, 且当信号的调制指数较小时, 估计性能不佳; 参考文献[8,9]利用正弦调频信号的循环平稳特征, 提出了基于循环自相关的调制参数估计方法, 该方法只能估计信号的部分调制参数, 且计算复杂。参考文献[10]研究了多分量正弦调制信号的分离与参数估计问题; 参考文献[11]提出了正弦调频连续波信号参数估计的卡森准则方法, 该方法计算简单, 且估计性能不受调制指数限制; 参考文献[12]提出了一种基于稀疏分解时频分析的正弦调频信号参数估计方法, 利用 Gabor 原子库和遗传算法提取信号的调制规律。

本文提出了一种新的正弦调频连续波信号调制参数的估计方法。该方法首先计算正弦调频连续波信号的自相关函数, 利用信号调制函数的周期性完成调制频率的估计; 然后基于重排谱图提取信号调频曲线, 并结合时频能量曲线滤除噪声突变点, 获取修正调频曲线; 最后基于正弦曲线拟合实现调制参数估计。该方法无需先验知识, 且能够较好地抑制噪声, 适用于信噪比较低的电子侦察场合。

2 信号模型

正弦调频连续波信号的调制函数为三角函数, 具体调制参数包括载频、调制指数、调制频率和初始调制相位。信号的解析形式可以表示为:

$$s(t) = A \exp\{j[2\pi f_c t + k_m \sin(2\pi f_m t + \phi)]\} \quad (1)$$

其中, A 为信号幅值, f_c 、 k_m 、 f_m 和 ϕ 分别为正弦调频连续波信号的载频、调制指数、调频频率和初始调制相位。正弦调频连续波信号的瞬时频率可以表示为:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = f_c + k_m f_m \cos(2\pi f_m t + \phi) \quad (2)$$

其中, $\varphi(t) = 2\pi f_c t + k_m \sin(2\pi f_m t + \phi)$ 为信号瞬时相位。式(2)表明, 正弦调频连续波信号的瞬时频率是一个由调制参数构成的余弦函数, 具有确定的周期性。因此可以提取信号的瞬时频率完成调制参数估计。理想的正弦调频连续波信号瞬时频率曲线如图1所示, 信号调制周期为 $T = 1/f_m$ 。

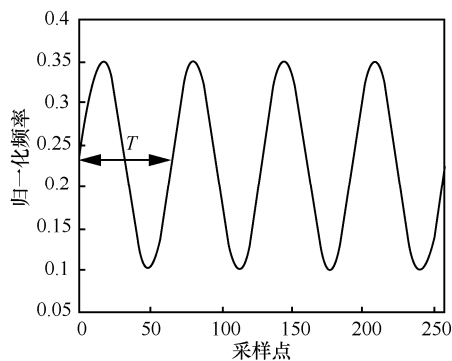


图1 正弦调频连续波信号瞬时频率曲线

3 调制频率估计

设信号包含 M 个调制周期, 则信号的自相关函数为:

$$R_s(\tau) = \frac{1}{MT} \int_0^{MT} s(t)s^*(t-\tau)dt \quad (3)$$

可以证明当 $\tau = kT$ (k 为整数, 且 $1 \leq k < M$) 时, 正弦调频连续波信号的自相关函数模值为:



$$|R_s(kT)| = \frac{M-k}{M} |R_s(0)| \quad (4)$$

即自相关函数模值会在零时延点出现最大值, 在调制周期 T 的整数倍处出现峰值, 且峰值随 k 的增加而线性减小。根据信号调制特性可知, 此峰值间隔等于信号的调制周期。

图 2 为正弦调频连续波信号的归一化自相关函数。其中, 调制周期个数为 5, 周期内采样为 500 点。图 2 中自相关函数除零时延点的峰值以外, 其他峰值的幅度有所下降, 但相邻峰值的周期性依然十分明显, 可以提取峰值点之间的时间间隔估计信号的调制周期。图 2 (a) 是无噪声时的自相关函数, 与理论分析一致, 图 2 (b) 是信噪比 (SNR) 为 -5 dB 时信号的自相关函数, 峰值特征依然十分明显。

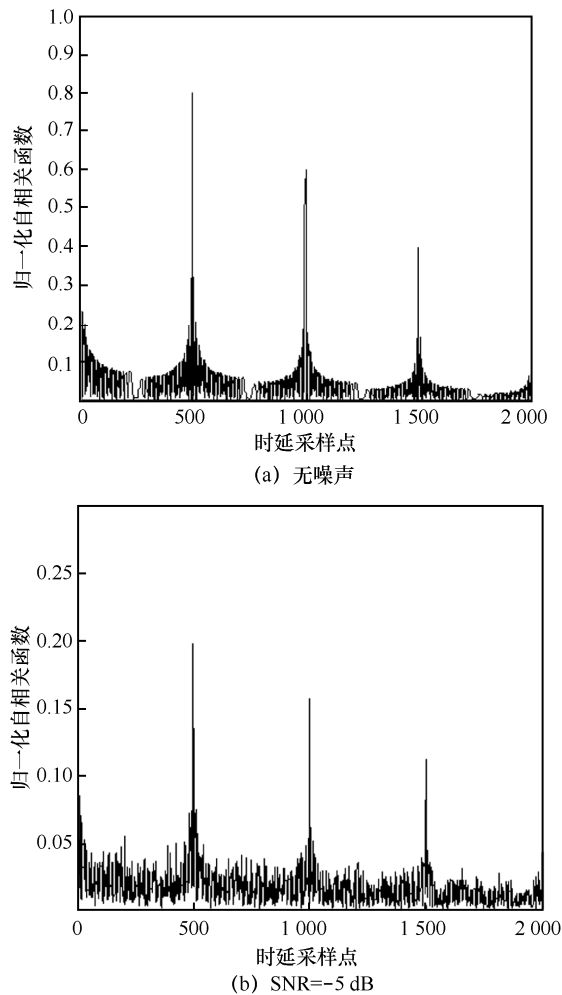


图 2 正弦调频连续波信号自相关函数

4 调频曲线估计

信号 $s(t)$ 的 STFT 定义为:

$$\text{STFT}_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) h^*(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

其中, $h(t)$ 表示短时宽窗函数, 且 $\|h(t)\|^2 = 1$ 。信号谱图为 STFT 的模值平方为:

$$S_x(t, f) = |\text{STFT}_x(t, f)|^2 \quad (7)$$

谱图是恒正的, 且是一个关于时间和频率的实函数。为了便于分析其性质, 依据 Moyal's 公式, 谱图可以表示为信号的 Wigner-Ville 分布 (WVD) 和窗函数的 WVD 的二维卷积形式为:

$$S_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_x(s, \xi) W_h(t-s, f-\xi) ds d\xi \quad (8)$$

其中, W_x 和 W_h 分别为信号和窗函数的 WVD。由式 (8) 可知, $W_h(t-s, f-\xi)$ 在点 (t, f) 附近构成了一个时频域, 谱图可以就是信号 WVD 的加权平均。因此, 谱图是在窗函数构成的时频区域的能量平均值, 虽然这有效地降低了 WVD 的时频交叉项, 但信号能量发生了扩散, 牺牲了时频分辨率。

为了改善谱图的能量聚集性, 采用重排算子调整信号在时频平面内的能量分布, 进而提高时频分辨率。重排算子将谱图在任意点 (t, f) 处的值转移到另一点 $(\hat{t}, \hat{f})$, 这一点是信号围绕点 (t, f) 能量分布的重心, 可以用式 (9) 和式 (10) 表示为:

$$\hat{t} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} s W_h(t-s, f-\xi) W_x(s, \xi) ds d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_h(t-s, f-\xi) W_x(s, \xi) ds d\xi} \quad (9)$$

$$\hat{f} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \xi W_h(t-s, f-\xi) W_x(s, \xi) ds d\xi}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_h(t-s, f-\xi) W_x(s, \xi) ds d\xi} \quad (10)$$

经过重排的谱图能够提升时频分辨率, 正弦调频连续波信号的谱图和重排谱图如图 3 所示。

由图 3 可知, 正弦调频连续波信号的谱图虽然不存在交叉项, 但是它的时频聚集性很差, 只能给出信号的大概轮廓; 经过重排后, 时频聚集性得到了提升, 可以精确地描绘出正弦调频连续波信号的时频变化规律。

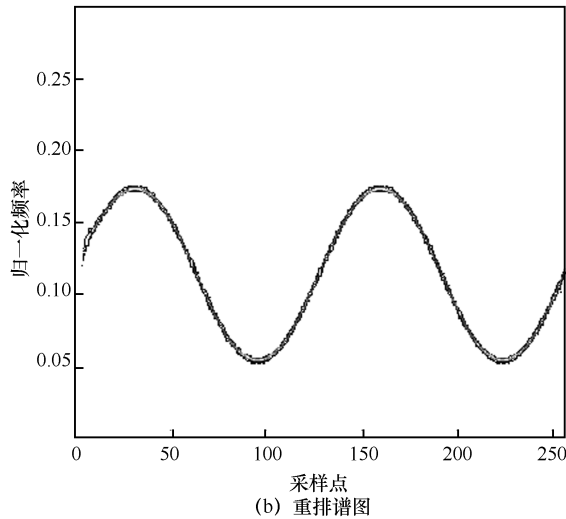
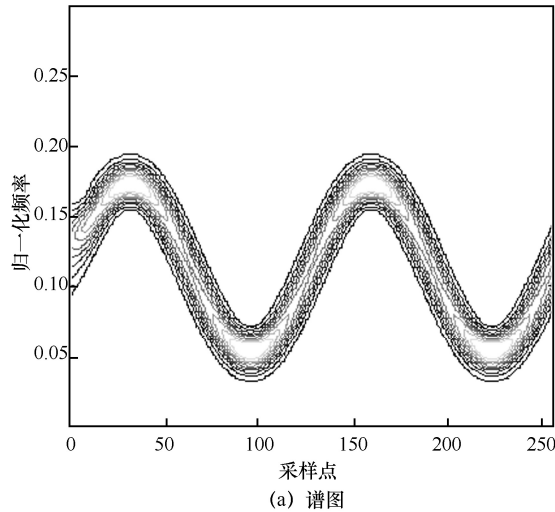


图 3 谱图和重排谱图

计算重排谱图在每一个时刻的最大值即可得出信号的调频曲线为:

$$\hat{f}(t) = \arg \max_{0 < f < 0.5} [S_x^r(t, f)] \quad (12)$$

图 4 为信噪比在 0 dB 时基于重排谱图估计出的正弦调频连续波信号调频曲线, 为显示清晰, 真实值整体下移 1 个单位。

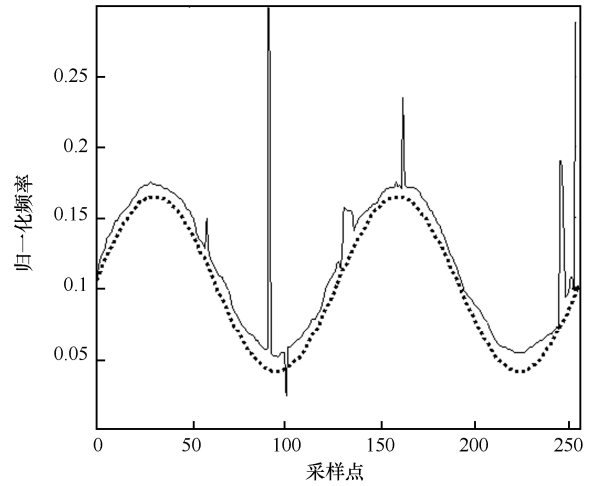


图 4 调频曲线估计结果

图 4 表明, 由于噪声的影响, 调频曲线估计结果中存在部分突变点, 这将影响调制参数估计精度。因此需要去除这些噪声突变点。造成这些突变点的原因是: 混入信号中的噪声使得重排谱图中部分时间段的信号能量分散。因此突变点对应的时频脊线能量必然远远小于正确时频脊线的能量, 为此在提取时频脊线的同时, 按式 (13) 给出时频能量曲线为:

$$p(t) = \max_{0 < f < 0.5} [S_x^r(t, f)] \quad (13)$$

图 5 (a) 为图 4 对应重排图谱的时频能量曲线, 通过在时频能量曲线设置合理的门限, 将能量曲线中低于此门限的部分去除, 即可去除时频脊线中的突变点, 去除突变点后的修正调频曲线如图 5 (b) 所示。此时, 调频曲线估计结果与正弦调频连续波信号的调频曲线具有较高吻合度。虽然修正调频曲线中存在部分缺失数据点, 但这不影响后续的调制参数估计。

通过重排谱图获得正弦调频连续波信号的调频曲线后, 对正弦调频连续波信号的参数估计问题就转化为对正弦曲线的参数提取问题, 即正弦曲线的拟合问题。本文采用参考文献[13]给出的最小二乘的正弦曲线三参数拟合原理实现调制参数估计。

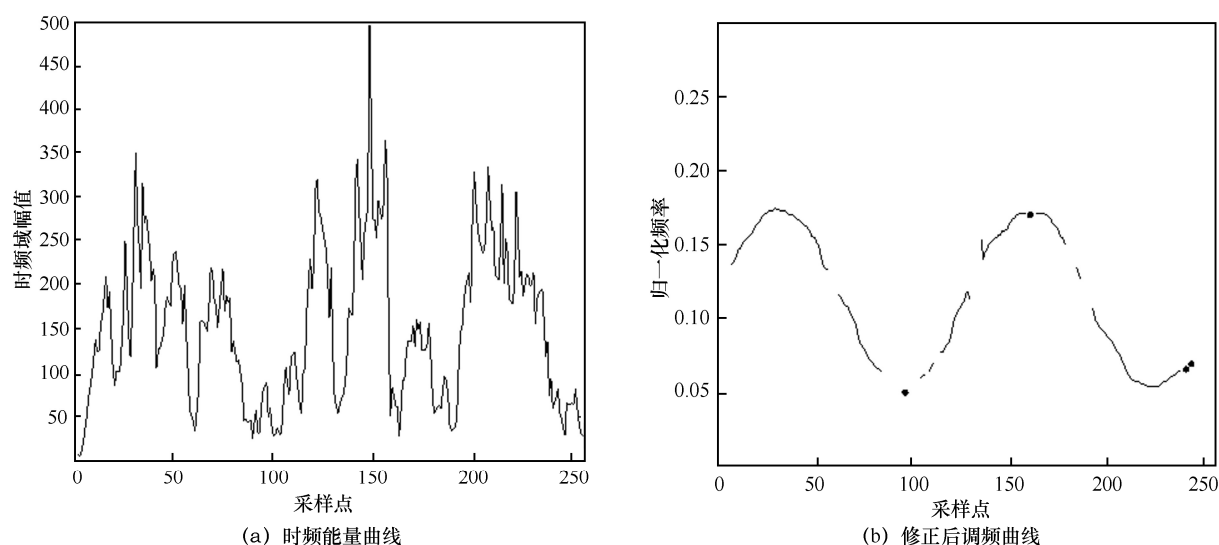


图5 能量曲线与调频曲线

5 仿真分析

为验证本文提出的正弦调频连续波信号调制参数估计方法的性能,进行如下仿真实验。正弦调频连续波信号的调制参数为 $A=1$, $f_c=10$ MHz, $k_m=25$, $f_m=0.1$ MHz, $T=10\mu\text{s}$, $\phi=\pi/4$, 信号长度为 $50\mu\text{s}$, 采样频率 $f_s=100$ MHz, 信号中加入不同强度的高斯白噪声, 各信噪比下进行 500 次蒙特卡洛仿真实验。各调制参数估计的均方误差 (MSE) 曲线如图 6 所示, 图 6 中还给出了基于卡森准则方法^[11]和基于稀疏分解时频分析^[12]的参数估计误差, 其中基于稀疏分解时频分析方法获得调频曲线后, 同样采用参考文献[13]正弦曲线三参数拟合提取调制参数。

图 6 表明, 本文方法的参数估计性能在所有噪声强度下均优于卡森准则估计方法和稀疏分解时频分析方法。这是由于卡森准则方法估计信号调制频率的前提是准确提取信号的瞬时相位, 而瞬时相位提取方法受噪声和相位解模糊的影响严重; 而基于稀疏分解时频分析方法虽然能够利用 Gabor 原子跟踪信号的时频调制规律, 但在基于 Gabor 原子提取信号调制曲线时, 相邻原子就会直接产生很大误差, 导致最终的参数估计精

度较差。基于自相关的调制频率估计方法充分利用正弦调频连续波信号的本质特点, 调制频率的估计与其他调制参数无关, 且自相关运算能够很好地抑制噪声, 因此信号调制频率的估计具有较好的抗噪性; 此外不但重排谱图能够很好地抑制噪声影响, 且在时频能量曲线中进一步滤除了噪声的影响, 最大程度地保证了参与曲线拟合数据点的准确性。此外, 卡森准则方法无法估计正弦调频连续波信号的初始调制相位, 而本文方法的初始调制相位估计性能也优于系数分解时频分析方法。

为进一步验证本文方法的参数估计性能, 仿真了不同调制周期个数时的参数估计误差。参与仿真的信号不变, 调制周期个数 M 依次增加, 信噪比为 0 dB, 每个调制周期个数下进行 500 次蒙特卡洛仿真实验, 各调制参数估计误差如图 7 所示。

仿真结果表明, 各调制参数的估计误差均随调制周期个数的增加而减小。这是由于正弦调频连续波信号是周期调制信号, 当信号调制周期个数增加时, 信号成分在调制参数估计的过程中得到了充分累积, 相对压低了噪声对参数估计的影响。其中调制频率受调制周期个数的影响最为明显, 这是因为自相关函数的峰值大小与调制周期

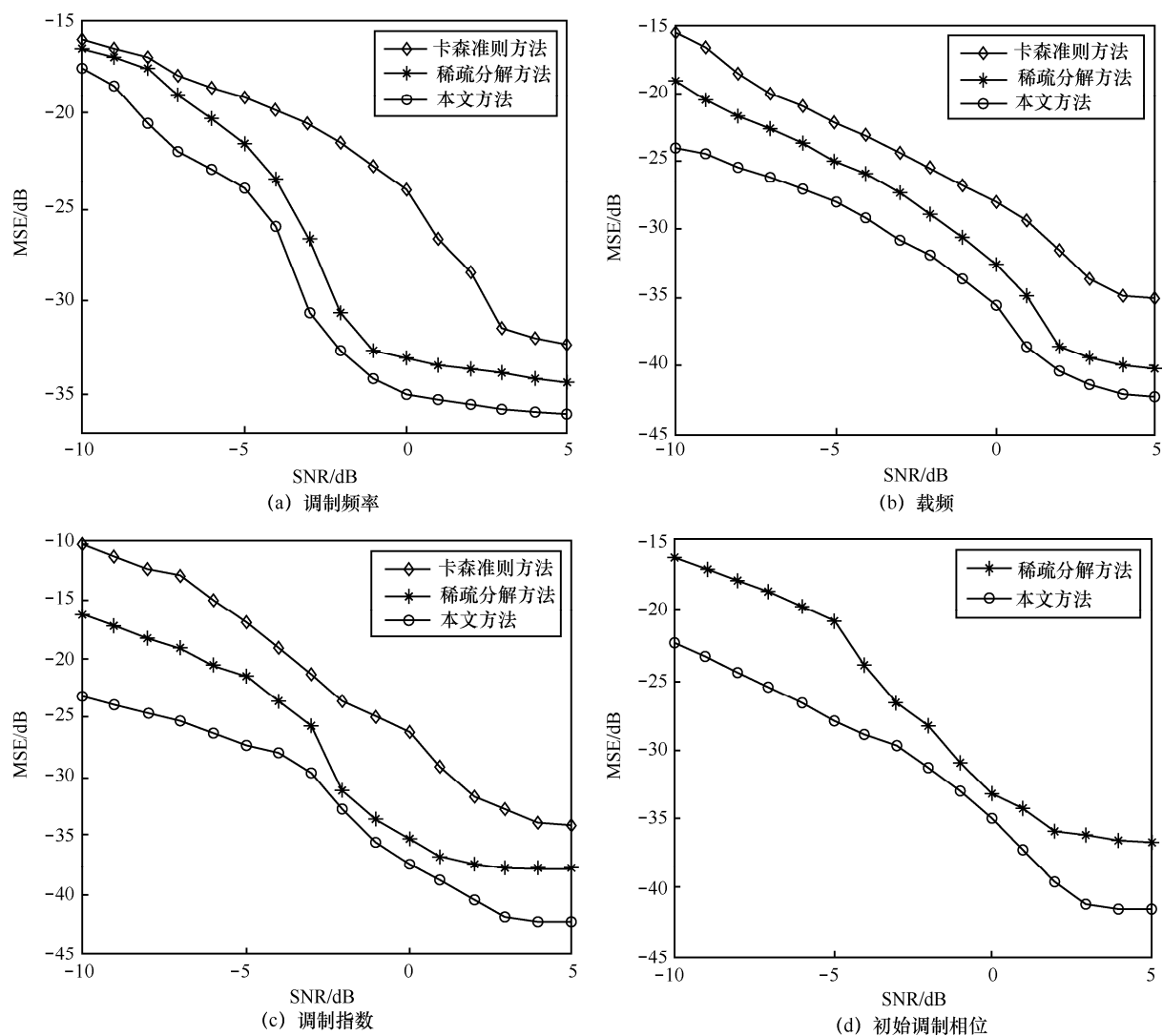


图6 参数估计性能对比

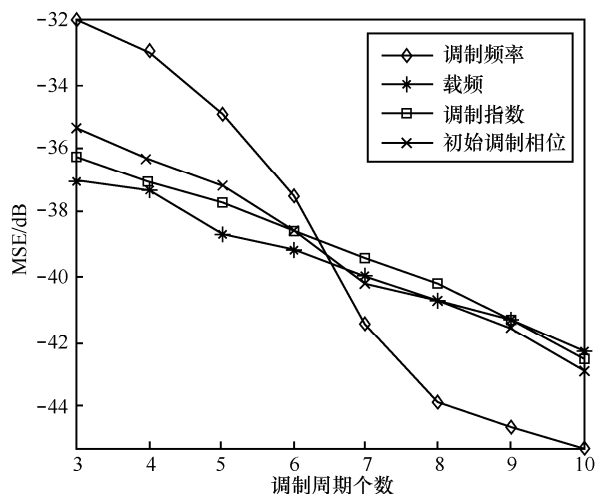


图7 参数估计性能与调制周期个数的关系

个数成正比, 调制周期个数的增加显著提高自相关函数峰值提取的准确性, 因而调制频率的估计性能得到提升。

6 结束语

正弦调频连续波信号是现代雷达系统和无线电引信中的常用信号, 电子侦察接收机必须准确估计出其调制参数才能实现解调和相干干扰。本文研究了电子侦察中正弦调频连续波信号的调制参数估计问题。分析了正弦调频连续波信号的自相关函数特征和重排谱图特征, 对调制频率、载



频、调制指数和初始调制相位进行了估计。仿真实验结果表明,该方法能够有效估计出正弦调频连续波信号的调制参数,且无需任何先验知识,对噪声不敏感。本文方法为电子侦察中处理正弦调频连续波信号提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] HE Q F, ZHANG Q, LUO Y, et al. Sinusoidal frequency modulation fourier-bessel series for multicomponent SFM signal estimation and separation[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2017: 1-14.
- [2] 冯维婷, 梁青, 谷静. 基于谱分析的多分量正弦调频信号估计[J]. 西安邮电大学学报, 2017, 22(4): 86-90.
FENG W T, LIANG Q, GU J. Multi component sinusoidal FM signal estimation based on spectrum analysis[J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2017, 22(4): 86-90.
- [3] WANG Z, WANG Y, XU L. Parameter estimation of hybrid linear frequency modulation-sinusoidal frequency modulation signal[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017, PP(99): 1.
- [4] DJUROVIĆ I. Estimation of sinusoidal frequency-modulated signal parameters in high-noise environment[J]. Signal Image & Video Processing, 2017(1): 1-5.
- [5] 吕远, 祝俊, 唐斌. 基于 DPT 的非线性调频信号参数估计[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(6): 63-67.
LU Y, ZHU J, TANG B. Estimation of nonlinear FM signal parameter based on DPT[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(6): 63-67.
- [6] 陈沁根, 张兴敢. 基于时频分析-随机 Hough 变换的微动目标参数快速提取[J]. 南京大学学报(自然科学), 2017, 53(6): 1178-1186.
CHEN Q G, ZHANG X G. Rapid extraction of parameters of Micro Motion target based time-frequency analysis and random Hough transformation[J]. Journal of Nanjinu University (Natural Science), 2017, 53(6): 1178-1186.
- [7] 李明孜, 赵惠昌. 基于自适应窗长 WD 分析的伪码调相—载波调频复合引信信号的参数提取研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(9): 2086-2089.
LI M Z, ZHAO H C. The study on parameters extraction of pseudo code phase modulation-carry frequency modulation combined fuse signal based on the adaptive window length WD analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(9): 2086-2089.
- [8] 牛杰, 姜卫东, 程永强, 等. 基于 CAFMS 算法的正弦调频信号参数估计及性能分析[J]. 电子学报, 2012, 40(7): 1460-1464.
NIU J, JIANG W D, CHENG Y Q, et al. Parameters estimation of a sinusoidal FM signal based on cyclic autocorrelation function maximum search algorithm and its performance analysis[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 29(9): 2086-2089.
- [9] 黄浩, 李昀豪, 祝俊. 基于循环自相关的正弦调频信号参数

估计新方法[J]. 电讯技术, 2013, 53(9): 1180-1184.

- HUANG H, LI J H, ZHU J. A new sinusoidal FM signal parameters estimation algorithm based on cyclic autocorrelation[J]. Telecommunication Engineering, 2013, 53(9): 1180-1184.
- [10] 朱航, 张淑宁, 赵惠昌. 基于广义周期性的单通道多分量正弦调频信号分离和参数估计[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2438-2444.
ZHU H, ZHANG S N, ZHAO H C. Single channel source separation and parameters estimation of multi-component sinusoid frequency modulation signal based on generalized periodic[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(10): 2438-2444.
 - [11] 熊辉, 吕远, 曾德国, 等. 利用卡森准则的正弦调频信号参数估计方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(4): 353-357.
XIONG H, LV Y, ZENG D G, et al. SFM signal parameter estimation algorithm based on Carson rule[J]. Journal of Electronic Measurement And Instrument, 2010, 24(4): 353-357.
 - [12] 全盛荣, 张天骐, 王俊霞, 等. 基于稀疏分解的 SFM 信号的时频分析方法[J]. 电子技术应用, 2016, 42(6): 87-90.
QUAN S R, ZHANG T Q, WANG J X, et al. A new time-frequency analysis method of sinusoidal frequency modulation signals based on sparse decomposition[J]. Application of Electronic Technique, 2016, 42(6): 87-90.
 - [13] 黄浩, 李昀豪, 祝俊. 四参数正弦曲线拟合的一种收敛算法[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(11): 1513-1519.
HUANG H, LI J H, ZHU J. Convergence algorithm of four-parameter sine wave curve-fit[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(11): 1513-1519.

作者简介



聂小鹏 (1997-), 男, 三峡大学电气与新能源学院在读, 主要研究方向为电气工程及其自动化。



沈祖成 (1973-), 男, 三峡大学电气与新能源学院副教授, 主要研究方向为电气工程及其自动化。

王晓峰 (1987-), 男, 博士, 空军航空大学信息对抗系讲师, 主要研究方向为信号与信息处理。

王春雨 (1983-), 女, 空军航空大学信息对抗系副教授, 主要研究方向为信号与信息处理。