

# 冲击噪声背景下频率和 DOA 的联合估计

张陆游, 张永顺, 张琳

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

**摘要:**为解决冲击噪声背景下的 LFM 信号频率和波达方向(DOA)联合估计问题,本文依据 FLOM-时频分布理论和谱图重排方法,提出了一种基于 FLOM-时频分布谱图重排的频率特性和 DOA 联合估计算法,该算法解决了时频分布 DOA 估计算法不能应用于冲击噪声的不足,能有效抑制交叉项影响,具有较好的时频聚集性能,算法通过频率拟合和时频平均-MUSIC 算法可同时得到 LFM 信号的瞬时频率和 DOA 值,相比于目前已有的 DOA 算法,该算法具有更好的参数估计精度。计算机仿真试验验证了算法的有效性。

**关键词:**波达方向;冲击噪声;时频分布谱图重排;频率拟合

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2009.03.009

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)03-0043-04

目前绝大多数高分辨 DOA 估计算法都是基于阵列输出信号的协方差矩阵<sup>[1-2]</sup>或高阶统计量<sup>[3]</sup>进行处理的,并把噪声假设为高斯的,然而,在实际中所遇到的很多信号和噪声都是非高斯的,这类噪声称之为冲击噪声,近年的研究表明,其合理模型是 SαS 过程<sup>[4-5]</sup>,SαS 是高斯分布的一种推广。对这类噪声,由于 SαS 噪声和干扰没有有限的  $p(p > \alpha, 0 < \alpha < 2)$  阶矩,传统的基于 2 阶矩或高阶矩的子空间测向算法不能应用于 SαS 噪声环境。线性调频信号是一类非常重要的非平稳信号,在各种体制的雷达中广泛使用<sup>[6]</sup>。文献[4,7]在 MUSIC 算法的基础上,分别提出了 ROC-MUSIC 方法和 FLOM-MUSIC 方法,这 2 种方法需要计算共变(或 FLOM),但只能估计出信号的空间方位,文献[8]将 SαS 稳定分布的  $p$  阶矩和模糊函数相结合,并利用 Radon-Ambiguity 变换对冲击噪声下 LFM 信号的频率和 DOA 进行估计,但没有解决交叉项的影响,影响了估计的精度。文献[9]提出了 FLOM-时频分布理论,该理论是一般意义上时频分布的推广,信号的时频聚集性能不好。本文结合 FLOM-时频分布理论和谱图重排方法,提出了一种基于 FLOM-时频分布谱图重排的频率和方位联合估计算法,算法可有效抑制交叉项的干扰,具有较好频率和 DOA 估计精度。

## 1 基于 FLOM 的时频分布

时频分布具有较好时频聚集性和信号选择性等诸多好处。但由于传统的时频分布在冲击噪声环境下性能严重下降,不适用于冲击噪声背景下的 DOA 估计,何劲博士根据 SαS 过程存在有限的分数低阶矩,提出了基于 FLOM 的时频分布矩阵。信号  $x(t)$  的 FLOM-时频分布定义如下<sup>[9]</sup>:

$$C_{xx}(t, f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} \phi(k, \tau) \{x(t+k+\tau)x^{<p-1>}(t+k-\tau)\} e^{-j4\pi f\tau} \quad (1)$$

式中: $x(t)$  为阵列接收信号; $x^{<p>}$  表示  $x$  的  $p$  次幂,则有:

$$\mathbf{x}^{<p>} = [x_1^{<p>}, x_2^{<p>}, \dots, x_L^{<p>}]^T \quad (2)$$

\* 收稿日期:2008-12-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60601016);陕西省自然科学基金资助项目(SJ08F21)

作者简介:张陆游(1982-),男,安徽芜湖人,博士生,主要从事雷达信号处理,电子对抗研究;

E-mail:woshizhang1982@tom.com

张永顺(1961-),男,陕西咸阳人,教授,博士生导师,主要从事雷达信号处理,电子对抗研究。

显然,式(1)是文献[9]定义时频分布矩阵的一种推广。下面利用伪 Wigner - Ville 分布作为 Cohen 类时频分布的一个例子,对 FLOM - 时频分布矩阵进行特征分析。对于 PWVD,式(1)中的时频核函数  $\phi(k, \tau)$  是奇数长度的窗函数,取窗函数为一长度  $L$  的矩形窗。假设有共  $M$  阵元的接收阵列,  $N(N < M)$  个 LFM 信号从不同方向入射,定义 FLOM - 时频分布矩阵为  $C(t, f) = E\{C_{xx}(t, f)\}$ ,则有:

$$C(t, f) = AQA^H + \rho I \quad (3)$$

式中  $C(t, f)$  的第  $(i, k)$  元素  $C_{ik}(t, f)$  表示为:

$$C_{i,k}(t, f) = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N a_i(\theta_m) Q_{mn} a_k^H(\theta_n) + \rho \delta_{ik} \quad (4)$$

$$Q_{mn} = E\left\{ \sum_{\tau=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} s_m(t+\tau) \left| \sum_{n=1}^N s_n(t-\tau) + n_k(t) \right|^{p-1} s_n^*(t-\tau) e^{-4\pi f \tau} \right\} \quad (5)$$

$$\rho = \sum_{\tau=-(L-1)/2}^{(L-1)/2} \left\{ E\left[ n_k(t+\tau) \left| \sum_{m=1}^N s_m(t-\tau) + n_k(t-\tau) \right|^{p-2} \left( \sum_{m=1}^N s_m(t-\tau) + n_k(t-\tau) \right)^* e^{-4\pi f \tau} \right] \right\} \quad (6)$$

式(3)的时频矩阵结构与传统时频分布矩阵非常相似,传统时频分布矩阵可看成 FLOM - 时频分布矩阵在  $p = 2$  时特例,可采用文献[10]提出的时频子空间波达方向估计方法获得 LFM 信号的 DOA 估计值。

### 1.1 FLOM - 时频分布重排

FLOM - 时频分布具有较好的时域和频域聚集性,但由于 FLOM - 时频分布存在固有的交叉项干扰,影响了 DOA 估计的性能,为此,本文提出了一种 FLOM - 时频分布的谱图重排方法,可有效提高时频特性的估计精度。Cohen 类的时频分布可以看成是伪 Wigner - Ville 分布  $C_x$  的二维卷积,即有:

$$S_x(t, f; \Pi) = \sum_{\xi=-\infty}^{\infty} \sum_{s=-\infty}^{\infty} C_x(t-s, f-\xi) \Pi(s, \xi) \quad (7)$$

式中  $\Pi(s, \xi)$  为重排核函数, FLOM - 时频分布的谱图重排公式如下:

$$S_x^r(t', f') = \sum_{t=-\infty}^{\infty} \sum_{f=-\infty}^{\infty} S_x(t, f; \Pi) \delta(t'-t) \delta(f'-f) \quad (8)$$

式(8)表明,在任意点  $(t', f')$  的修正时频分布是所有原 FLOM - 时频分布在该点的值之和,这样就提高了信号分量聚集的尖峰。若  $\Pi(s, \xi)$  为实函数,修正时频分布矩阵可简化为类似于式(3)的形式:

$$S_x^r(t', f') = \sum_{t=-\infty}^{\infty} \sum_{f=-\infty}^{\infty} S_x(t, f; \Pi) \delta(t'-t) \delta(f'-f) = AC_s(t', f')A^H + S_n(t', f') \quad (9)$$

式中:  $S_n(t', f')$  是噪声子空间的时频分布;  $C_s(t', f')$  是所有信号自时频分布以及互时频分布在该点值的加权和,它是核函数  $\Pi(s, \xi)$  的基本支撑区为支撑区的能量重心。

对时频分布的多个时频点的平滑处理,则信号的平均空间时频矩阵如下:

$$\bar{C}_x = \frac{1}{n_0(L_0 - L + 1)} \sum_{p=1}^{n_0} \sum_{i=1}^{L_0-L+1} S_x(t'_i, f'_p, i) \quad (10)$$

式中:  $L_0$  为快拍数;  $n_0$  为选择处理的信源数。取  $\bar{C}_x$  的数学期望,得  $C = E(\bar{C}_x)$ , 对  $C$  进行特征值分解得到  $C = [U_s, U_n] \Sigma [U_s, U_n]^H$ , 式中  $U_s$  为信号子空间,  $U_n$  为噪声子空间,则时频分布的 MUSIC 空间谱函数为:

$$P(\theta) = \|U_n^H a(\theta)\|_2^{-1} \quad (11)$$

### 1.2 频率特性和波达角的联合估计算法

重排后的 FLOM - 时频分布,信号具有较好的时频聚集尖峰,我们可以拟合出每个信号的瞬时频率变化曲线,更为准确地求出信号的时频分布特性,算法的具体实现步骤如下:

**步骤 1** 对时间  $t = 1, 2, \dots, T$ , 由  $S_x^r(t', f')$  的尖峰位置估计各信号的瞬时频率并排序:  $f_1(t) < f_2(t) < \dots < f_N(t)$ 。

**步骤 2** 对时间点  $t = T + 1, T + 2, \dots, K$ , 由前  $T$  个瞬时频率估计值  $f_p(t - T), f_p(t - T + 1), \dots, f_p(t - 1)$  预测下一个瞬时频率  $f_p(t)$  ( $p = 1, 2, \dots, N$ ), 从  $t$  时刻  $S_x^r(t', f')$  的峰值位置中选取与  $f_p(t)$  最接近的频率作为瞬时频率估计值  $f_p(t)$ 。

**步骤 3** 根据步骤 2 拟合出各信号的瞬时频率变化曲线。

步骤 4 按照各信号的瞬时频率变化规律选取时频点进行单信号时频滤波,在此基础上利用时频平均 - MUSIC 算法可实现 DOA 精确估计。

## 2 仿真与分析

接收阵列为 8 阵元的均匀线阵,阵列间距为入射信号载波波长的一半,空间有 2 个独立且等功率的入射信号,冲击噪声为加性 SαS 噪声,宽度参数  $\gamma = 1$ , 噪声特征指数  $\alpha = 1.5$ , 选择 FLOM 参数  $p = 1$ 。由于 SαS 噪声的 2 阶方差是不存在,这里用广义信噪比( $G_{SNR}$ ) 代替一般的信噪比,它是信号功率与  $\gamma$  的比值,即:

$$G_{SNR} = 10 \lg \left[ \frac{1}{\gamma L_0} \sum_{t=1}^{L_0} |s(t)|^2 \right] \quad (12)$$

式中  $L_0$  为快拍数。快拍数  $L_0 = 256$ , 伪 Wigner - Ville 分布的矩形窗长  $L = 40$ , 则选取时频点数  $L = L_0 - T_0 + 1 = 256 - 40 + 1 = 217$ 。

1) FLOM - 时频重排对时频分布的影响。设 2 个调频信号入射到 8 阵元的均匀线阵上,阵列噪声为空间加性 SαS 噪声,信号方位角为  $(20^\circ, 30^\circ)$ , 快拍数  $L_0 = 256$ , 信噪比  $G_{SNR} = 15$  dB, 信号归一化瞬时频率  $f_1(t) = 0.1 + 0.001t, f_2(t) = 0.4 - 0.001t$ 。图 1 为接收信号的伪 Wigner - Ville 分布图。图 2 给出了重排 FLOM - 伪 Wigner - Ville 时频分布图。

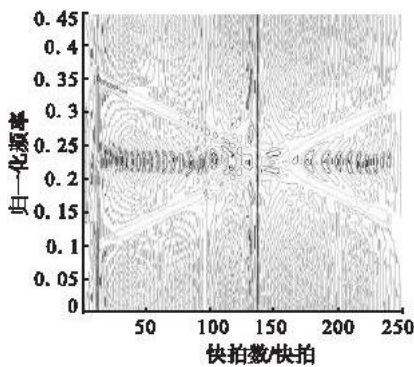


图 1 伪 Wigner - Ville 时频分布图  
Fig. 1 The curve of PWVD

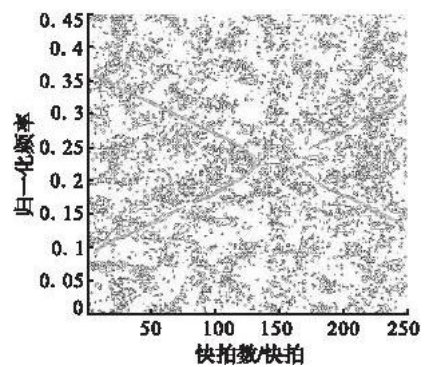


图 2 重排 FLOM - 伪 Wigner - Ville 时频分布图  
Fig. 2 The curve of reassigned FLOM - PWVD

从图 1、图 2 可以看出,传统的时频分布受冲击噪声的影响,性能已经明显下降,相反,基于 FLOM 的时频分布能够比较好地反映出信号的时频分布情况,对 FLOM 时频分布进行重排将进一步地提高时频分布的聚集性能,抑制交叉项。

2) 算法性能分析。仿真条件与试验 1 相同,图 3 为信噪比为  $G_{SNR} = 10$  dB, FLOM - TFD - MUSIC 算法<sup>[9]</sup>、本文算法的频率拟合曲线,图 4 给出了信噪比与测向误差的关系曲线。

从图 3 可以看出,本文算法经时频重排后,具有更好的时频聚集性能,具有较好瞬时频率估计精度。从图 4 可知,在冲击噪声环境下,本文算法以有效估计的入射信号的空间方位,角度估计误差低于 ROC - MUSIC 算法和 FLOM - TFD - MUSIC 算法,所以说本文算法具有更好的测向性能。

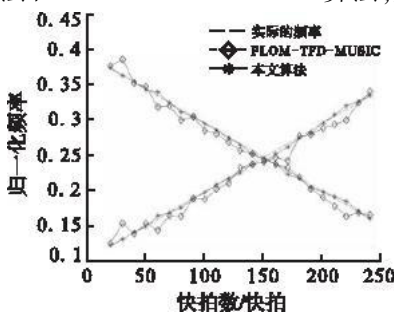


图 3 瞬时频率拟合曲线

Fig. 3 Instantaneous frequency fitting curves

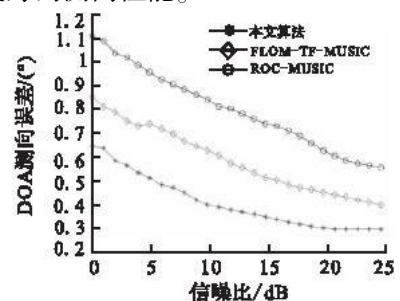


图 4 信噪比与测向误差的关系

Fig. 4 Relation between SNR and bearing error

### 3 结束语

通过理论分析与仿真验证,本文提出的 LFM 信号的频率和 DOA 联合估计算法能有效抑制交叉项干扰,在冲击噪声背景下,可以实现对 LFM 信号的频率和 DOA 的联合估计,且估计精度较高。

#### 参考文献:

- [1] Schmidt R O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation[J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1986, 34(3): 276 - 280.
- [2] Roy R, Kailath T. ESPRIT Estimation of Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1989, 37(7): 984 - 999.
- [3] Jerry E G, Dogan M C. Applications of Cumulants to Array Processing - part IV, Direction Finding in Coherent Signals Case[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1997, 45(9): 2265 - 2275.
- [4] Liu T H, Mendel J M. A Subspace - based Direction Finding Algorithm Using Fractional Lower Order Statistics[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2001, 49(8): 1605 - 1613.
- [5] Tsihrantzis G A, Nikias C L. Performance of Optimum and Suboptimum Receivers in the Presence of Impulsive Noise Modeled As An Alpha - stable Process [J]. IEEE Trans Comm, 1995, 43(2/3/4): 904 - 913.
- [6] 张陆游, 张永顺, 潘克战. 变步长自适应算法在雷达旁瓣对消系统中的应用[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9(4): 25 - 28.  
ZHANG Luyou, ZHANG Yongshun, PAN Kezhan. The Application of Variable Step Adaptive Algorithm in Radar Sidelobe Cancellers [J]. Journal of Air Force Engineering University; Natural Science Edition, 2008, 9(4): 25 - 28. (in Chinese)
- [7] Tsakalides P, Nikias C L. The Robust Covariation - based MUSIC (ROC - MUSIC) Algorithm for Bearing Estimation in Impulsive Noise Environments [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1996, 44(7): 1623 - 1633.
- [8] 李立萍, 钟 璠, 文 忠. 冲激噪声环境中 LFM 信号的特征参数估计[J]. 电子科技大学学报, 2005, 34(6): 729 - 731.  
LI Liping, ZHONG Pan, WEN Zhong. Estimation of LFM Signal's Time Parameters under Impulsive Noise [J]. Journal of Electronic Science and Technology University, 2005, 34(6): 729 - 731. (in Chinese)
- [9] 何 劲. Alpha 稳定分布噪声背景下阵列信号处理方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.  
HE Jin. Research on Array Signal Processing Under Alpha Steady Distributing Noise [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [10] 金 梁, 殷勤业, 李 盈. 时频子空间拟合波达方向估计[J]. 电子学报, 2001, 1(29): 71 - 74.  
JIN Liang, YIN Qinye, LI Ying. DOA Estimation via Time Frequency Signal Subspace Fitting [J]. ACTA Electronic Sinica, 2001, 1(29): 71 - 74. (in Chinese)

(编辑: 田新华)

## Frequency and DOA Simultaneous Estimation of LFM Signal under Impulse Noise

ZHANG Lu - you, ZHANG Yong - shun, ZHANG Lin

(Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan 713800, Shaanxi, China)

**Abstract:** To solve the problem of frequency trait and direction - of - arrival (DOA) simultaneous estimation of linear frequency modulated (LFM) signal under impulse noise, and according to the FLOM - Time Frequency Distribution (TFD) theory and spectrum reassigned method, a new algorithm of Frequency Trait and DOA Simultaneous Estimation is brought forward based on the reassigned FLOM - Time Frequency Distribution (TFD). This algorithm can be applied in impulse noise environment, while the conventional Time Frequency Distribution DOA estimation methods can not. And the algorithm can be used to depress the influence of TFD cross - terms and is good in time - frequency collection. In using this algorithm, the LFM instantaneous frequency and DOA value can be obtained by frequency fitting and Time Frequency Average - MUSIC method. Compared with the similar DOA algorithms in existence, this algorithm is more accurate in estimation results. Simulation results show that the algorithm is effective.

**Key words:** direction - of - arrival (DOA); impulse noise; time frequency distribution reassigned; frequency fitting