

基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法

边 勇¹, 周荫清², 李春升²

(1. 卡尔加里大学 Geomatics 工程系, 加拿大卡尔加里 T2N 1N4; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100083)

摘 要: 本文研究了一些自适应滤波器组谱估计方法(AFSE)在对称 α stable 噪声(SAS)环境下的性能. 提出了三种新的基于分数低阶统计模型(FLOS)的自适应滤波器组谱估计方法(AFSE-FLOS). 这些新方法是基于分数低阶协方差(FLOC), 因此在对称 α stable 噪声环境下比基于二阶和一阶统计模型的方法估计性能好. 计算机仿真结果表明这些基于分数低阶统计模型的新方法在对称 α stable 噪声环境下的性能比对应的基于二阶和一阶统计模型的方法性能好, 在高斯噪声环境下, 与其对应的方法性能相似.

关键词: α stable 分布; 自适应滤波器组谱估计方法 (AFSE); 分数低阶统计 (FLOS)

中图分类号: TN911. 72 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2008) 06-1232-07

Some Adaptive Filterbank Spectral Estimation Methods Based on FLOS

BIAN Yong¹, ZHOU Yin2qing², LI Chun2sheng²

(1. Department of Geomatics Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada T2N 1N4;

2. School of Electronics and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: The performance of some adaptive filterbank spectral estimation (AFSE) methods in the symmetric α stable noise environment is studied. Three new AFSE methods based on the fractional lower order statistics (FLOS) (AFSE-FLOS) are presented. These new methods are based on the fractional lower order covariance (FLOC) which are better than the methods based on second order statistics (SOS) and first order statistics (FOS) in the α stable noise. The simulation shows the new methods based on FLOS outperforms their respective methods based on SOS and FOS in the α stable noise while performs similar to their respective methods in the Gaussian noise.

Key words: α stable distribution; adaptive filterbank spectral estimation method (AFSE); fractional lower order statistics (FLOS)

1 引言

在合成孔径雷达(SAR)成像处理等领域, 基于快速傅立叶变换(FFT)的方法是应用最广泛的方法, 然而基于 FFT 的方法的分辨率是有限的^[1]. 为了打破分辨率的极限, 最近超分辨方法得到了迅速发展. 在众多的超分辨方法中, 有一些方法可以被分类为自适应滤波器组谱估计方法 (AFSE)^[2], 例如幅度和相位估计方法 (APES)^[3], 最小均方误差自适应滤波器组谱估计方法 (AFMMSE)^[2], 和 Capon 方法^[4]. 真实 SAR 杂波有时是非高斯的, 可以分类为 stable 分布^[5,6]. 因此在 stable 噪声情况下的超分辨方法是 SAR 领域迫切需要的方法.

前人的研究主要集中在 α stable 噪声^[7-10] 环境下的波达方向角估计问题上. 文献[7]提出了适合 stable 噪声处理的子空间方法 ROC, MUSIC, 另外文献[8]提出了基于分数低阶矩(FLOM)的 MUSIC, FLOM. 在相干 α stable 噪声下的波达方向角估计方法在文献[11]中

进行了讨论. 前人有关在 α stable 噪声中的谱估计的研究还有文献[12].

自适应滤波器组谱估计方法与子空间方法不同, 据我们所知, stable 噪声环境下的自适应滤波器组谱估计方法在文献中还没有涉及. 另外, 前人的研究主要集中在子空间方法的角估计应用方面, stable 噪声下的谱估计方法的研究很少^[12].

在本文中, 将要讨论一些在对称 α stable (SAS) 噪声下的自适应滤波器组谱估计方法, 并提出适合 SAS 噪声环境应用的新方法. 传统的自适应滤波器组谱估计方法是基于高斯噪声的假设进行的推导, 而真实 SAR 情况下噪声可能是脉冲性的^[5]. 采用文献[13]提出的分数低阶协方差(FLOC)方法, 本文扩展传统的自适应滤波器组谱估计方法到对应的适合噪声处理和高斯噪声的自适应滤波器组谱估计方法, 即基于分数低阶统计模型(FLOS)的自适应滤波器组谱估计方法(AFSE-FLOS).

在 SAS 噪声情况下, 最小均方误差(MMSE)准则应

214 Capon, FLOS 方法

类似 APES, FLOS, Capon 方法^[4] 可以基于分数低阶协方差扩展为 Capon, FLOS. Capon, FLOS 的采样分数低阶协方差矩阵为

$$C_{\text{Capon}}^{\%} = \frac{1}{J - K + 1} \sum_{i=0}^{J-K} s^{3u_1, 4}(i) s_{\text{H}}^{3u_2, 4}(i) \quad (10)$$

其中 $u_1 + u_2 < A^6$, u_1 和 u_2 可以相等或不等, 其取值类似前面的分析.

215 基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法的预处理解释

在这一部分, 将说明基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法可以解释为一个对数据的幅度限制预处理. (为了得到以前的有关采用幅度限制器消除脉冲噪声方法的相关研究, 请查阅文献[14]).

以 APES, FLOS 为例进行分析 (AFMD 和 Capon, FLOS 方法与之类似). 在 APES, FLOS 中, 采样分数低阶协方差矩阵如式 (7) 所示; 另外, 进行 FFT 的数据用式

(8) 处理. 因此 APES, FLOS 相当于当时, 在传统的 APES 处理前进行数据的幅度限制操作, 即

$$d^{3u_1, 4}(i) = d(i) |d(i)|^{u-1} \quad (11)$$

采用 APES, FLOS 方法相当于在 APES 前进行幅度限制. 在幅度预处理后, 尖峰信号被抑制, 二阶和一阶统计趋于有限大, 传统的 APES 方法可以直接应用, 可以得到在 stable 噪声条件下好的谱估计结果. (在文献[8]中有类似的解释). 有关预处理方法的研究的文献有[12, 14]. 在文献[12]中, 研究了一种基于 zero-memory nonlinearity (ZMNL) 方法的预处理方法. 当 $u_1 = u_2 = 0$ 时, 本文的预处理方法可以归结为文献[12]的归一化相关方法.

为了说明对信号进行预处理的作用, 采用一个单幅度信号. 在没有噪声时信号的幅度如图 1(a) 所示, 在信号中加入加性复 S α S 噪声 ($A = 112$) 后的信号如图 1(b) 所示. 在进行幅度限制处理后的信号幅度如图 1(c) 所示. 在图 1(c) 中, 采用式 (11) 来限制幅度, 其中 $u = 0.12$.

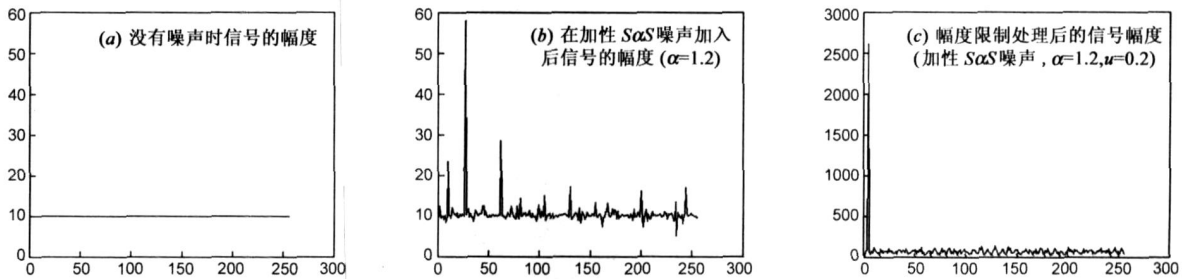


图 1 幅度限制处理

图 1 表示被加性 stable 噪声污染的信号幅度具有尖峰, 而幅度限制处理可以消除大部分尖峰. 在幅度限制预处理后, 大部分尖峰消除了, 这时可以采用传统的自适应滤波器组谱估计方法进行谱估计.

3 计算机仿真

在仿真中, 所有的传统自适应滤波器组谱估计方法和基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法都采用 forward2backward 方法^[2, 3]. 本部分的所有插图的纵轴为该方法的归一化谱. 该仿真是 20 次独立实验的结果, 并且重叠在一幅图上. 有关复 stable 噪声的仿真方法, 请参考文献[7, 10, 15].

311 AFMD 的计算机仿真

在图 2 和图 3 的仿真结果中, 噪声为加性复 S α S 噪声, 其中的参数分别为: 图 2, $A = 112$; 图 3, $A = 01.9$. 当 $A = 112$ 时, AFMD 和 AFMMSE 的结果分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 当 $A = 01.9$ 时, AFMD 和 AFMMSE 的结果分别如图 3(a) 和图 3(b) 所示. 另外, 在图 2(a) 和图 3(a) 中, $u_1 = u_2 = 01.0$.

图 2 和图 3 表示 AFMD 具有比 AFMMSE 尖得多的

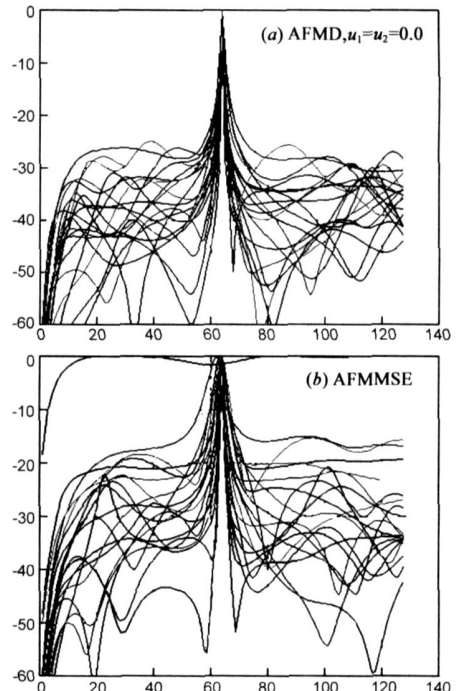


图 2 在加性 S α S 噪声 ($\alpha=1.2$) 下, AFMD 和 AFMMSE 的结果

谱, 另外 AFMD 比 AFMMSE 的输出信噪比高得多. 另外, 图 2 和图 3 表示当从 112 减小到 019, AFMMSE 的性能严重恶化, 而 AFMD 的性能下降很小.

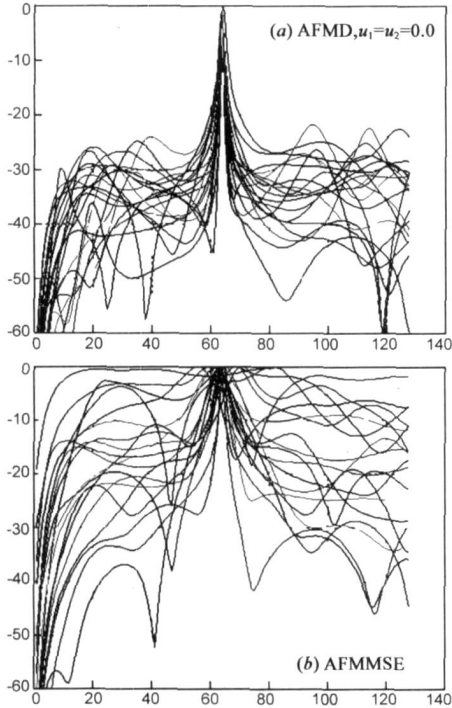


图 3 在加性 $S\alpha S$ 噪声 ($\alpha=0.9$) 下, AFMD 和 AFMMSE 的结果

在图 4 中, 噪声为加性高斯噪声, 信噪比 $SNR=10\text{dB}$. 当 $u_1 = u_2 = 010$ 和 $u_1 = u_2 = 012$ 时, AFMD 方法的结果分别如图 4(a)、图 4(b) 所示. AFMMSE 的结果如图 4(c) 所示. 图 4 表示在高斯噪声情况下, AFMD 与

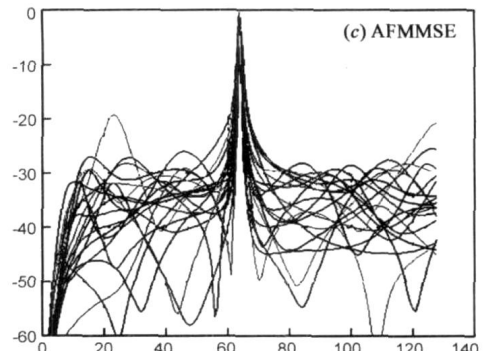
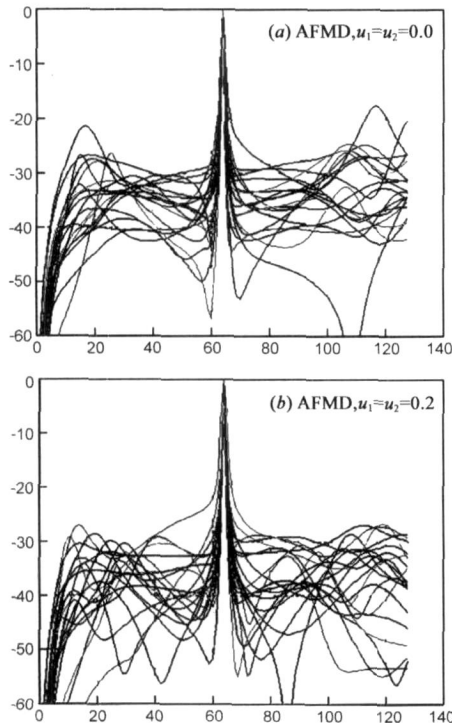


图 4 在加性高斯噪声 ($SNR=10\text{dB}$) 下, AFMD 和 AFMMSE 的结果

AFMMSE 的性能类似.

312 APES_FLOS 的计算机仿真

图 5(a) 和图 6(a) 表示在协方差矩阵由分数低阶协方差矩阵代替, 并且 FFT 项使用式 (8) 时 APES_FLOS 的结果.

在图 5 和图 6 中, 噪声为加性复 SAS 噪声, 在图 5 和图 6 中的参数分别为 $A=112$, $A=019$. APES_FLOS 和 APES ($A=112$) 的仿真结果分别如图 5(a)、图 5(b) 所示. APES_FLOS 和 APES ($A=019$) 的仿真结果分别如图 6(a)、图 6(b) 所示. 在图 5(a) 和图 6(a) 中, $u_1 = u_2 = 010$.

类似地, 图 5 和图 6 表示 APES_FLOS 在噪声 SAS 下比 APES 性能显著优越. 另外, 当 A 从 112 减小到 019, APES 性能急剧恶化, 而 APES_FLOS 的性能只有很微弱的下降.

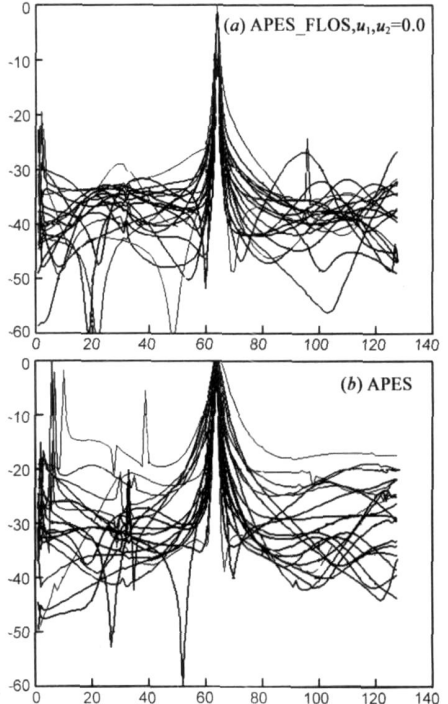


图 5 在加性 $S\alpha S$ 噪声 ($\alpha=1.2$) 下, APES_FLOS 和 APES 的结果

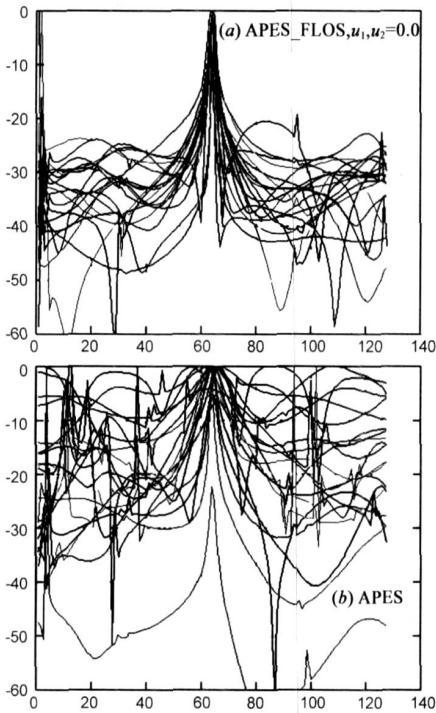


图 6 在加性 $S\alpha S$ 噪声 ($\alpha=0.9$) 下, APES_FLOS 和 APES 的结果

在图 7 中, 噪声为加性高斯噪声, 信噪比 $SNR=10\text{dB}$. APES_FLOS 方法当 $u_1 = u_2 = 0.10$ 和 $u_1 = u_2 = 0.12$ 时的结果分别如图 7(a) 和图 7(b) 所示. APES 的结果如图 7(c) 所示. 图 7 表明在高斯噪声情况下, APES_FLOS 的性能类似 APES.

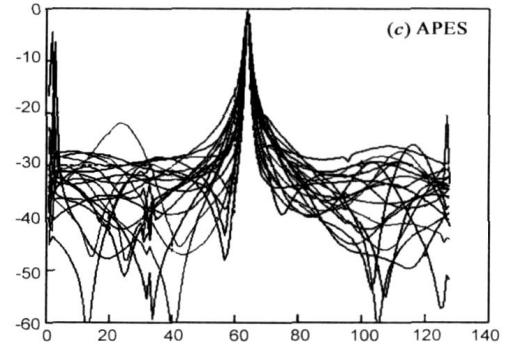


图 7 在高斯噪声 ($SNR=10\text{dB}$) 下, APES_FLOS 和 APES 的结果

图 8 表明只有协方差矩阵由分数低阶协方差矩阵替换, FFT 项使用原始数据时 APES_FLOS 的结果. 由于进行 FFT 的项没有进行幅度限制处理, 在 FFT 项的信号中保留着尖峰, 因此在没有进行 FFT 项预处理时的 APES_FLOS 方法的性能不如进行 FFT 项预处理的 APES_FLOS 方法的好. 图 8 证实了这一结论.

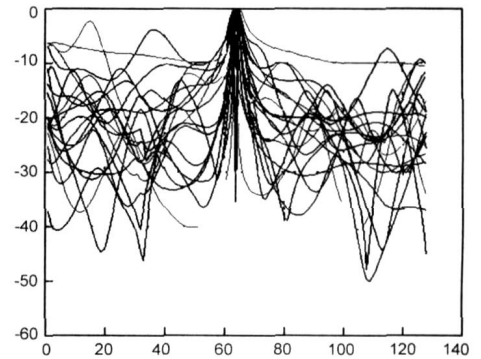
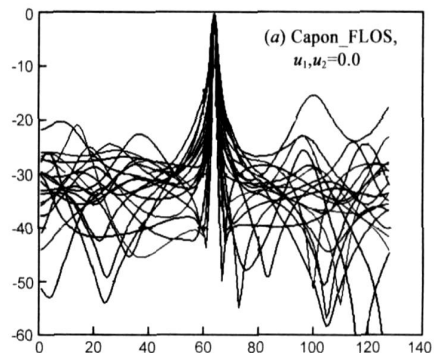
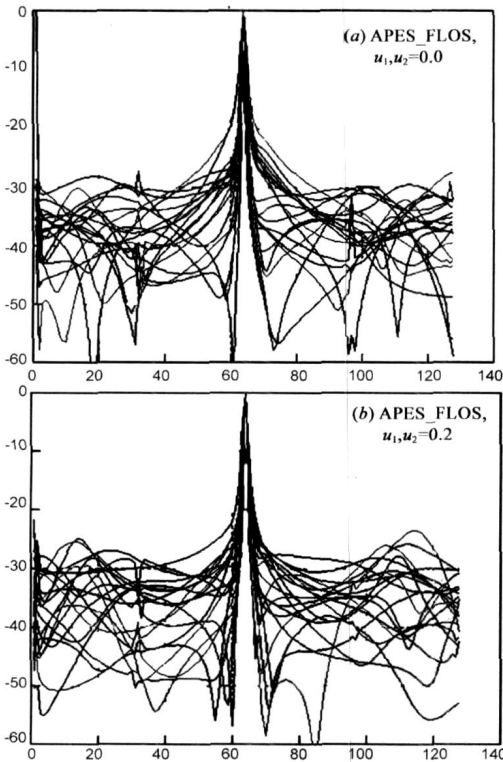


图 8 在加性 $S\alpha S$ 噪声 ($\alpha=0.9$) 下, APES_FLOS 的结果. 在此实验中, 只有协方差矩阵由分数低阶协方差矩阵替换, FFT 项使用原始数据

3.1.3 Capon_FLOS 的计算机仿真

在图 9 中, 噪声为加性复 SAS, 噪声参数为 $A=0.19$. Capon_FLOS 和 Capon 的计算机仿真结果分别如图 9(a) 和图 9(b) 所示. 在图 9(a) 中, $u_1 = u_2 = 0.10$.

在图 10 中, 所加的为高斯噪声, 信噪比 $SNR=10\text{dB}$. 当 $u_1 = u_2 = 0.10$ 和 $u_1 = u_2 = 0.12$ 时 Capon_FLOS 的结果分别如图 10(a)、图 10(b) 所示. Capon 的结果如



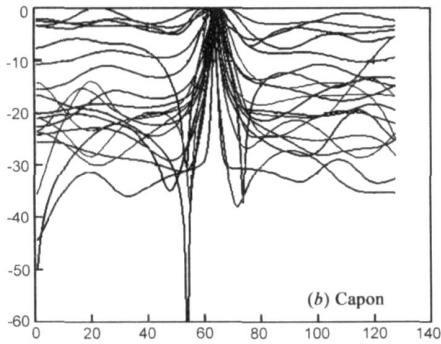


图9 在加性 $S\alpha S$ 噪声 ($\alpha=0.9$) 下, Capon_FLOS 和 Capon 的结果图 10(c) 所示。

图9 表示在 $S\alpha S$ 噪声环境下, Capon_FLOS 的性能好于 Capon。图 10 表示在高斯噪声情况下, Capon_FLOS 与 Capon 的性能差不多。

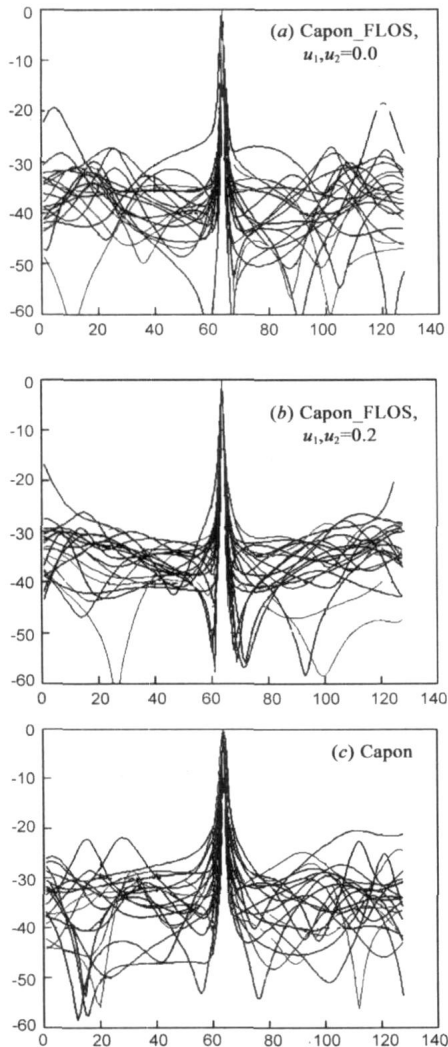


图 10 在高斯噪声 ($SNR=10dB$) 下, Capon_FLOS 和 Capon 的结果

31.4 对计算机仿真结果的分析

从仿真实验可知, 基于分数低阶统计模型的自适

应滤波器组谱估计方法在 $0 < A < 2$ 时性能好。在 $S\alpha S$ 噪声环境下, 基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法的性能优于基于二阶和一阶统计的自适应滤波器组谱估计方法, 这是由于基于分数低阶统计模型的方法是基于更精确的噪声模型^[7,9,10,6]; 在高斯噪声情况下, 基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法的性能类似于基于二阶和一阶统计的自适应滤波器组谱估计方法, 这说明了本文方法的适应性较强。

4 结论

本文提出了一些基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法。采用分数低阶协方差的自适应滤波器组谱估计方法在 $S\alpha S$ 噪声环境下性能优异。基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法在 stable 噪声环境下比基于二阶和一阶统计的自适应滤波器组谱估计方法的性能优越。在高斯噪声环境下, 基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法与基于二阶和一阶统计的自适应滤波器组谱估计方法性能差不多。基于分数低阶协方差的自适应滤波器组谱估计方法可以解释为对数据的幅度限制预处理。基于分数低阶统计模型的自适应滤波器组谱估计方法是重尾噪声环境下, SAR 超分辨率成像的有前途的方法。

参考文献:

- [1] Zhaoqiang Bi. Relaxation-based Methods for SAR Target Feature Extraction and Image Formation[D]. USA: University of Florida, 1999.
- [2] Erik G Larsson, Petre Stoica, Jian Li. Spectral estimation via adaptive filterbank methods: A unified analysis and a new algorithm[J]. Signal Processing, 2002, 82: 1991- 2001.
- [3] Jian Li, Petre Stoica. An adaptive filtering approach to spectral estimation and SAR imaging[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1996, 44(6): 1469- 1484.
- [4] J Capon. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proceedings of the IEEE, 1969, 57(8): 1408- 1419.
- [5] V Anastassopoulos, G A Lampropoulos, A Drosopoulos, M Rey. High resolution radar clutter statistics[J]. IEEE Trans Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1): 43- 60.
- [6] P Tsakalides, C L Nikias. High-resolution autofocus techniques for SAR imaging based on fractional low-order statistics[J]. IEEE Proc Radar, Sonar Navig, 2001, 148(5): 267- 276.
- [7] Panagiotis Tsakalides, Chrysostomos L Nikias. The robust covariance-based MUSIC (ROC-MUSIC) algorithm for bearing estimation in impulsive noise environments[J]. IEEE Trans Signal Processing, 1996, 44(7): 1623- 1633.

- [8] Tsung-Hsien Liu, Jerry M Mendel. A subspace-based direction finding algorithm using fractional lower order statistics [J]. IEEE Trans Signal Processing, 2001, 49(8): 1605- 1613.
- [9] Min Shao, Chrysostomos L Nikias. Signal processing with fractional lower order moments: Stable processes and their applications [J]. Proceedings of the IEEE, 1993, 81(7): 986- 1010.
- [10] Xinyu Ma, Chrysostomos L Nikias. Parameter estimation and blind channel identification in impulsive signal environments [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1995, 43(12): 2884- 2897.
- [11] Marilli Rupi, Panagiotis Tsakalides, Enrico Del Re, Christos L Nikias. Robust spatial filtering of coherent sources for wireless communications [J]. Signal Processing, 2000, 80: 381 - 396.
- [12] Ananthram Swami, Brian Sadler. TDE, DOA and related parameter estimation problems in impulsive noise [A]. Proceedings of the IEEE Signal Processing Workshop on Higher Order Statistics [C]. Banff, Alberta, Canada, 1997. 273- 277.
- [13] Xinyu Ma, Chrysostomos L Nikias. Joint estimation of time Delay and frequency delay in impulsive noise using fractional lower order statistics [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1996, 44(11): 2669- 2687.
- [14] Seong Rag Kim, Adam Efron. Adaptive robust impulse noise

filtering [J]. IEEE Trans Signal Processing, 1995, 43(8): 1855 - 1866.

- [15] G Samorodnitsky, M S Taqqu. Stable Non-Gaussian Random Processes Stochastic Models with Infinite Variance [M]. New York: Chapman and Hall, 1994.

作者简介:



边 勇 男, 1972 年出生于辽宁省北宁市, 2005 年在北京航空航天大学电子信息工程学院通信与信息系统专业获工学博士学位。现在加拿大卡尔加里大学 Geomatics 工程系攻读博士学位, 研究方向为极化干涉 SAR 信号处理, 干涉 SAR 信号处理、阵列信号处理、数字图像处理、数字信号处理等。

E-mail: bianyongcn@sohu.com



周荫清 男, 1936 年出生于湖南省湘潭市, 教授, 博士生导师, 中国电子学会会士, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 长期从事信息获取与处理、通信中的信号处理方法、数字图像处理、阵列信号处理等方面的研究工作。