

基于谱峰斜率进行变步长搜索的 DOA 估计方法

樊文倩, 李 舰

(西北大学 信息科技与技术学院, 陕西 西安 710127)

摘要:针对经典 Capon 方法存在计算量和存储量庞大、运行时间长、精准度不高的问题,提出一种低复杂度变步长的搜索算法。该方法首次搜索使用大步长的 Capon 算法,根据谱峰值确定波达方向(DOA)检测范围并求出其斜率值;然后根据斜率首次小于零确定谱峰在其左侧,记斜率小于零点为 P ,并从点 $P-2$ 处开始向右进行变步长搜索;最后进行变步长的迭代逼近,得出期望信号的估计角度。所提方法避免了谱峰穷尽搜索,降低了计算量。仿真实验证明,在相同的信噪比下,所提算法准确性的精准度有近 9 倍的改善;在不同的信噪比下,所提算法的分辨成功率更高;同时,所提算法的均方根误差均明显优于经典的 Capon 算法。

关键词: 波达方向估计; Capon 算法; 变步长; 阵列信号处理

中图分类号: TN911.72 文献标识码: A 文章编号: 1000-8829(2021)09-0048-05

doi: 10.19708/j.ckjs.2021.09.007

DOA Estimation Algorithm with Variable Step-Size Search Based on Spectral Peak Slope

FAN Wen-qian, LI Jian

(School of Information Science and Technology, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: Aiming at the problems of the classic Capon method with huge amount of calculation and storage, long running time and low accuracy, a low-complexity variable-step search algorithm is proposed. This method uses the large-step Capon algorithm for the first search. The detection range of the Direction of Arrival(DOA) determined according to the spectral peak, and the spectral peak slope in this range is obtained. Then, based on the slope being less than zero for the first time, the spectral peak is determined to be on its left, the point where the slope is less than zero is maked as P , and the right-hand step search begins at point $P-2$. Finally, an iterative approximation of variable step length is performed to obtain the estimated angle of the desired signal. The proposed method avoids the exhaustive search of spectral peaks and reduces the amount of calculation. Simulation experiments show that under the same signal-to-noise ratio, the accuracy of the proposed algorithm is improved by nearly 9 times, under different signal-to-noise ratios, the resolution success rate of the proposed algorithm is higher than that of the traditional Capon algorithm. Moreover, the root-mean-square error of the proposed algorithm is significantly better than the classic Capon algorithm.

Key words: direction of arrival estimate; Capon algorithm; variable step size; array signal processing

波达方向(Direction of Arrival, DOA)估计^[1-2]是对传感器阵列接收的数据进行分析处理,估计目标的方位或俯仰信息,是雷达、声纳、无线通信等领域的关

键技术^[3-4]。作为高分辨 DOA 估计的经典方法,Capon 算法^[5-6]通过固定步长的谱峰进行穷尽搜索,获得目标的角度信息^[5-7]。该方法存在计算量和存储量

收稿日期: 2021-08-18

引用格式: 樊文倩, 李舰. 基于谱峰斜率进行变步长搜索的 DOA 估计方法[J]. 测控技术, 2021, 40(9): 48-52.

FAN W Q, LI J. DOA Estimation Algorithm with Variable Step-Size Search Based on Spectral Peak Slope [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(9): 48-52.

庞大、运行时间长、实时性差的问题^[8-9]。通常情况下,固定步长^[10-11]难以协调计算量和收敛速度之间的内在矛盾。大步长可以简化计算复杂度,但难以获得高的估计精度,小步长增加了计算负担,却有利于提高分辨性能。变步长算法通常包含大步长的粗搜索和小步长的精搜索过程,可较好地平衡收敛速度和估计精度。

文献[12]深入研究了变步长理论,在低信噪比的微弱信号和大误差复杂场景下,提出一种改进的变步长最小均方算法,提出了步长因子和误差之间的函数关系,使步长因子对时变系统具备跟踪能力,该自适应算法对干扰滤除效果十分显著。文献[13]提出一种分级迭代变步长算法,很好地解决了收敛速度与稳态误差之间的矛盾,该算法对盲源分离具有更稳更快的分离速度和稳态性能。

本文提出了一种低复杂度、变步长的搜索算法,首次搜索使用大步长的 Capon 算法进行搜索,根据谱峰首次搜索结果确定 DOA 检测范围,并求出该范围内的斜率值,根据斜率值首次小于零确定谱峰在其左侧,记斜率小于零点为 P ,所以取该斜率对应范围的左值,同时向左取 $P-2$ 点,并从 $P-2$ 点处开始向右进行变步长搜索,根据上一步的步长 $x=1$,选取步长函数进行变步长的迭代逼近搜索,并计算每个步长对应的谱峰函数的斜率值 K_i ,直到斜率值首次小于零,并取斜率值小于零的区间的左值,作为本次期望信号的估计角度 DOA。

1 数据模型及 Capon 算法

空间中 L 个窄带信号,同时入射到 M 个半波长的均匀线性阵列,阵元间 $d = \lambda/2$, P 个远场窄带信号以 λ 为波长入射到阵列,设各通道独立且附加加性高斯白噪声(AWGN),定义 DOA 为信号来向与阵列法线的夹角 θ ,以第一个阵元为参考点,在第 t 次快拍下阵元 m ($m=1,2,\dots,M$) 接收的 P 个信源的总响应表示为

$$x_m(t) = \sum_{p=1}^P S_p(t) e^{\frac{j2\pi}{\lambda}(m-1)d\sin(\theta)} + n_m(t) \quad (1)$$

式中, S_p 为第 P 个信源的复包络; n_m 为第 m 个阵元上的噪声,则阵列一次快拍的接收数据也可表示为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}(\theta) \mathbf{S}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (2)$$

式中, $\mathbf{x}(t)$ 为 $M \times I$ 维的接收数据向量; $\mathbf{S}(t)$ 为 $L \times I$ 维的信号向量; $\mathbf{n}(t)$ 为 $M \times I$ 维的加性高斯白噪声向量; $\mathbf{A}(\theta)$ 为 $M \times L$ 维导向矢量矩阵, 导向矢量 $\mathbf{a}(\theta_l)$ 定义为

$$\mathbf{a}(\theta_l) = [e^{jx_1\omega_l}, e^{jx_2\omega_l}, e^{jx_3\omega_l}, \dots, e^{jx_M\omega_l}]^T \quad (3)$$

式中, $\omega_l = 2\pi\sin\theta_l/\lambda$ 为第 l 个阵元接收信号的角频率; λ 为信号的中心波长; x_i ($i=1,2,\dots,M$) 为第 i 个阵元的坐标, 阵列输出的协方差矩阵表示为

$$\mathbf{R}_{xx} = E[\mathbf{x}^H \mathbf{x}(t)] = \mathbf{A} \mathbf{R}_s \mathbf{A}^H + \sigma_n^2 I \quad (4)$$

式中, $E(\cdot)$ 表示取数学期望; \mathbf{R}_s 为信号协方差矩阵; $\mathbf{x}^H(t)$ 表示的是接收数据 $\mathbf{x}(t)$ 的共轭转置。 σ_n^2 为附加加性高斯白噪声的功率。Capon 算法的全称为 Capon 最小方差算法,其空间谱定义表述如下^[9]:

$$P_{\text{Capon}}(\varphi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{R}_{xx} \mathbf{a}(\varphi)} \quad (5)$$

式中, $\mathbf{a}(\varphi)$ 为期望信号的方向; \mathbf{R}^{-1} 为 \mathbf{R} 矩阵的逆矩阵。

2 本文提出的算法

假设空间有 L 个窄带信号,同时入射到 M 个半波长的均匀线性阵列,阵元间 $d = \lambda/2$, P 个远场窄带信号以 $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_P]$ 入射到阵列,入射波长为 λ , 设各通道独立且附加的噪声是加性高斯白噪声, 定义 DOA 为信号来向与阵列法线的夹角 θ 。经典 Capon 超分辨 DOA 估计方法采用固定步长进行谱峰穷尽搜索,存在计算量和存储量庞大、运行时间长、精准度不高的问题。

针对上述问题,本文提出一种低复杂度、变步长的搜索算法。首次搜索使用大步长的 Capon 算法进行均匀搜索,根据首次搜索的谱峰值确定 DOA 检测范围,并求出该范围内的谱峰斜率值;然后,根据斜率值首次小于零确定谱峰值位于斜率小于零区间的左侧,所以取该斜率对应范围的左值 P ,同时向左取 $P-2$ 点,并从 $P-2$ 点处开始向右进行变步长搜索;最后,选取步长函数 $x_1 = \frac{x}{x+1}$,根据 Capon 算法的步长 $x=1$,进行变步长的迭代逼近搜索,直到斜率值首次小于零,并取斜率值小于零的区间的左值作为本次期望信号的估计角度 DOA。

所提算法的具体实现步骤如下。

① 利用经典的 Capon 算法,先使用大步长的均匀搜索方法,根据 Capon 算法的谱峰公式^[9]

$$P_{\text{Capon}}(\varphi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\varphi) \mathbf{R}_{xx} \mathbf{a}(\varphi)}$$

粗略地估计出谱峰值的范围,并截取该范围,利用斜率公式

$$K_i = \frac{jpdf(i+1) - jpdf(i)}{(i+1) - i}$$

求出截取范围内的谱峰斜率值 K_i 。式中, $jpdf(i+1)$ 为第 $i+1$ 个点的角度谱峰值; $jpdf(i)$ 为第 i 个点的角度谱峰值。

② 根据上一步求得斜率值,找出截取范围内斜率首次小于零对应区间的左值 P ,由于谱峰值在 P 点左侧,所以向左取值 $P-2$,并从 $P-2$ 处开始向右进行变步长搜索。

③根据 Capon 算法的步长 $x=1$,选取步长函数 $x_1 = \frac{x}{x+1}$ 进行变步长的迭代逼近搜索,直到斜率首次小于零,并取斜率小于零的区间的左值作为本次期望信号的估计角度,即为期望值用户的 DOA。

3 仿真分析

3.1 仿真条件

本文的所有仿真实验均是在装有 Inter® Core™ 2 Duo CPU E8400@3.00 GHz 和 6.00 GB 的 RAM, MatlabR2018ade PC 机上实现的,本文提出的算法属于初期的理论阶段,因此所有的数据均采用理想的、假设的数据来进行验证。

在 Matlab 中进行大量的仿真实验,分别从 RMSE、算法复杂度和分辨成功率这 3 个方面对所提算法进行性能评价。假设阵列天线为 18 阵元的均匀线性阵列,阵元间距为半波长,期望信号的来波方向是 36.7° 。均匀线阵所加载的误差均值为零,方差为正态分布的随机值,并且每个阵元的误差单独加载,针对每种变量进行试验,每次采用 100 次 Monte Carlo 独立实验的平均结果,将其均方根误差作为评估阵列数据处理误差对算法性能影响的依据。

3.2 改进算法的仿真实验

在仿真实验中,假设有 18 个均匀线性排列的阵元,阵元间距为 $\lambda/2$,信号之间相互独立,信噪比为 -6,期望信号的来波方向为 36.7° 。

第 1 步:用 bc 表示步长,取 $bc=5$,采用经典的 Capon 算法在 $[1^\circ, 90^\circ]$ 间进行谱峰粗搜索,仿真结果如图 1 所示,得到粗略的谱峰范围为 $[30^\circ, 40^\circ]$,截取谱峰范围 $[30^\circ, 40^\circ]$,并求出该范围内每个点对应的斜率值,仿真结果如图 2 所示。

第 2 步:根据斜率值首次小于零的左侧为谱峰的特点,找到斜率值首次小于零的区间的左值 37,同时再向左取值 35,并从点 35 处开始向右进行变步长的谱峰搜索。

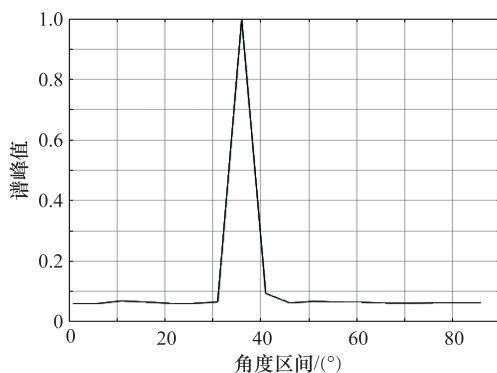


图 1 步长为 5 的谱峰粗搜索

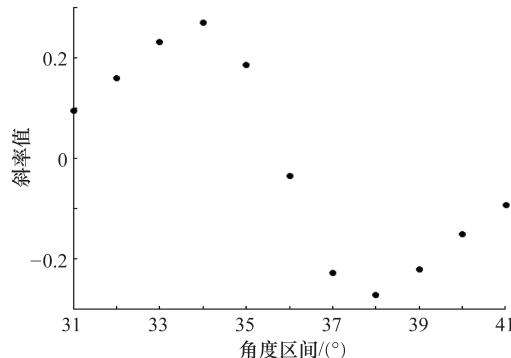


图 2 $31^\circ \sim 41^\circ$ 间谱峰斜率值

第 3 步:根据 Capon 算法的步长 $x=1$,选取步长函数 $x_1 = \frac{x}{x+1}$ 进行变步长的迭代逼近搜索,直到求得的谱峰斜率值首次小于零,并取斜率值小于零的区间的左值作为本次期望信号的估计角度。所提算法的整个流程图如图 3 所示。

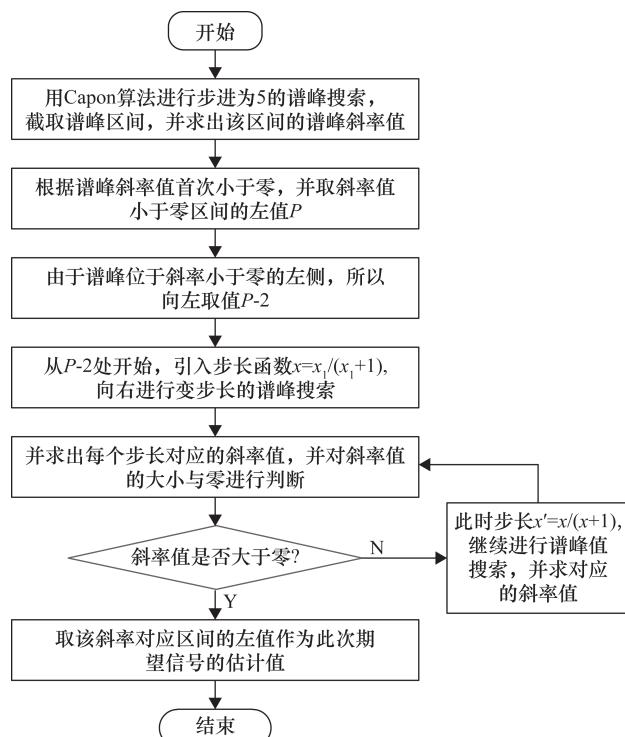


图 3 算法流程图

3.3 RMSE 的仿真结果

在均匀线阵中,每个仿真实验均取 $P=100$ 次 Monte Carlo 独立实验的平均结果, $N=10$ 为变量的数目,对于入射信号 θ 与估计值 $\hat{\theta}$ 的均方根误差 (Root-Mean-Square Error, RMSE) 定义为

$$RMSE = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left[\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (\hat{\theta}_{np} - \theta)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

图 4 ~ 图 6 是两种算法在改变信噪比、阵元数和快拍数的情况下 RMSE 性能的实验仿真图。由仿真

图 4~图 6 可得,在信噪比、阵元数和快拍数改变的情况下,所提算法的 RMSE 更小,更接近期望信号角度。

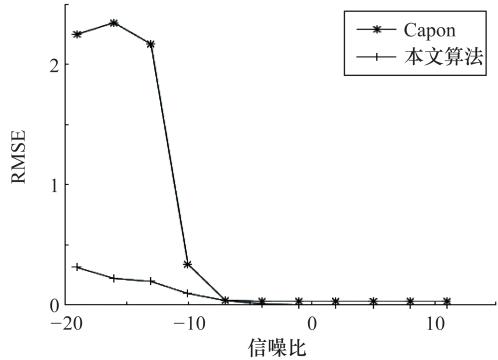


图 4 不同信噪比对 RMSE 的影响

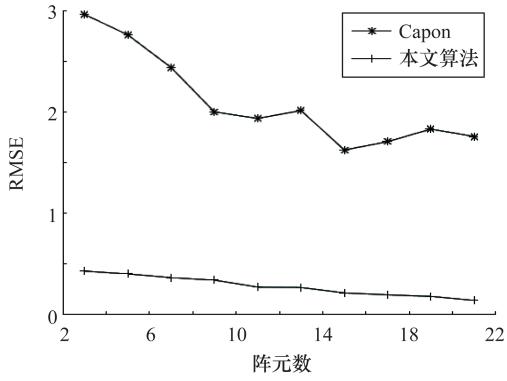


图 5 不同阵元数对 RMSE 的影响

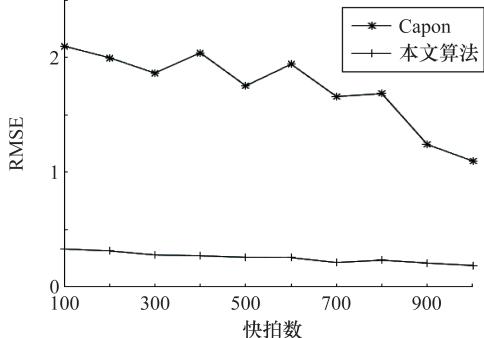


图 6 不同快拍数对 RMSE 的影响

3.4 算法的复杂度

通过算法复杂度分析本文所提算法性能,首先提出两个关于衡量算法复杂度的性能指标:① 时间复杂度,指执行算法所需要的运行时间^[15];② 运算复杂度,指程序里所包含的加减乘除、转置及求正弦等次数的和。本次实验通过比较所提算法和 Capon 算法的运行时间和 RMSE 来衡量两种算法的复杂度。实验结果如表 1 和表 2 所示。

从表 1、表 2 中得知,在一定条件下,所提算法在运行时间上并没有节省,而精度平均值是取 10 次 RMSE 的平均值来衡量的,因此在精度的准确性上精确了近 9 倍,计算过程如下:

表 1 两种算法运行 10 次的 RMSE 单位:(°)

实验次数	Capon 算法	本文算法
1	2.1693	0.2505
2	2.1861	0.2592
3	2.3207	0.2058
4	0.6905	0.0951
5	0.0407	0.0384
6	0.0307	0.0077
7	0.0300	0.0033
8	0.0300	0.0033
9	0.0300	0.0033
10	0.0300	0.0033

表 2 两种算法 RMSE 的平均值和运行时间

类别	精度平均值/(°)	运行时间/s
Capon	0.7588	130.5
本文算法	0.0870	247.2

$$\text{精度: } \frac{0.7588}{0.087} = 8.722$$

$$\text{时间: } \frac{130.5}{247.2} = 0.528$$

本文所提算法的最大贡献就是准确度的提高,通过比较两个算法的 RMSE 来进行衡量,传统的 Capon 算法的平均 RMSE 为 0.7588°,而本文提出通过引入步长函数,进行变步长的谱峰值搜索的方法求得的 RMSE 为 0.0870°,所以相对原有的算法,本文所提算法在精度的准确性上精准了近 9 倍。而精度是通过比较两个算法多次运行的 RMSE 来进行比较的。传统的 Capon 算法的一次运行时间为 130.5 s,而本文提出的方法进行谱峰搜索时一次运行时间为 247.2 s,所以相对原有的算法本文所提算法在运行时间上并没有节省,这也是所提算法的一个不足之处。

3.5 分辨成功率的仿真结果

分辨成功率(Probability of Resolution, PR)即在一定条件下,取一个误差阈值,统计小于这个阈值的次数与总共实验的次数的比例。设所允许的角度估计误差门限值为 $\nabla\theta$,由于本次的实验的期望角度为 36.7°,精确到了小数点后一位,所以取 $\nabla\theta = 0.5$,仿真结果如图 7 所示,在 Q 次独立实验中 N 个 DOA 角度的估计值均满足式(7)的实验次数为 Q_1 次,则 $PR = (Q_1/Q)$,仿真结果如图 7 所示。

$$|\hat{\theta}_{np} - \theta| \leq \nabla\theta \quad (n=1, 2, \dots, 10; p=1, 2, \dots, 100) \quad (7)$$

当估计的角度为两个且两角度相距很近,分别为 θ_1 和 θ_2 且谱峰函数 $f(\cdot)$ 取值满足式(8),即认为 θ_1

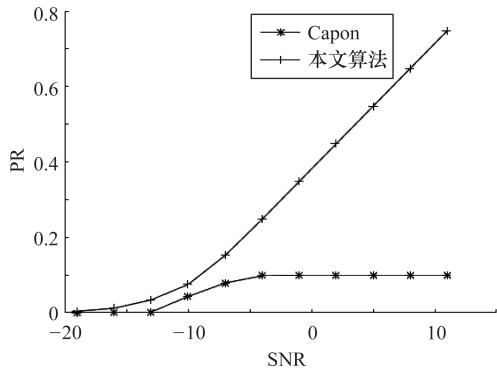


图7 误差门限为0.5时的PR

和 θ_2 分辨成功。同理存在多个信号时,且角度间相距很近时,记为 $\theta_i(i=1,2,\dots,n)$ 。

$$\frac{f(\theta_1)+f(\theta_2)}{2} > \frac{f(\theta_1+\theta_2)}{2} \quad (8)$$

$$\frac{f(\theta_1)+f(\theta_2)+\dots+f(\theta_n)}{n} > \frac{f(\theta_1+\theta_2+\dots+\theta_n)}{n} \quad (9)$$

通过仿真图7可得,估计一个角度时,所提算法的PR明显优于传统的Capon算法,当存在多个信号时,可以采用上述式(9)的方法。

4 结束语

本文提出一种低复杂度、变步长的谱峰搜索算法,首次搜索使用大步长的Capon算法进行均匀搜索,根据首次搜索的谱峰值确定DOA的检测范围,并求出该范围内谱峰值的斜率值,根据斜率值首次小于零确定谱峰值在其左侧,所以取该斜率对应范围的左值P,同时向左取P-2点,并从P-2处开始向右进行变步长谱峰搜索;最后根据Capon算法的步长 $x=1$,选取步长函数 $x_1 = \frac{x}{x+1}$ 进行变步长的迭代逼近搜索,直到斜率值首次小于零,并取斜率值小于零的区间的左值作为本次期望信号的估计角度。

本文所提算法采取简单的方法快速估计出期望信号的角度,在准确度上相比传统的Capon算法精准了近9倍,改善了定位的准确性,避免了穷尽的谱峰搜索。仿真实验表明:在相同信噪比下,所提算法的分辨率更高;同时所提算法的RMSE在信噪比、快拍数和阵元数变化的情况下,均明显优于经典的Capon算法,估计精度优于传统的Capon算法,更接近于期望信号。

虽然本文所提算法检测单次算法运行时间上高于传统的Capon算法,但是降低了算法的估计误差,减少了无效的谱峰搜索。因此本文所提算法通过引入步长函数,进行变步长迭代逼近搜索求斜率值的方法,求解出期望信号的DOA,避免了穷尽的谱峰搜索,更高效准确地估计出期望信号的DOA。

参考文献:

- [1] DEEP Y,HELD P,RAM S S,et al. Radar cross-sections of pedestrians at automotive radar frequencies using ray tracing and point scatterer modelling[J]. IET Radar, Sonar & Navigation,2020,14(6):833–844.
- [2] BASIKOLO T,ARAI H. APRD-MUSIC algorithm DOA estimation for reactance based uniform circular array[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2016,64(10):4415–4422.
- [3] CAPON J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis[J]. Proceedings of the IEEE,1969,57(8).
- [4] YANG X,HUANG S J. SAR stereo imaging algorithm based on Capon spectrum estimation[J]. Journal of Electronics (China),2008,25(6):817–821.
- [5] HANDEL P,STOICA P,SODERSTROM T. Capon method for doa estimation: accuracy and robustness aspects[J]. IEEE Winter Workshop on Nonlinear Digital Signal Processing,1993.
- [6] WU J X,WANG T,SUO Z Y,et al. DOA estimation for ULA by spectral Capon rooting method[J]. Electronics Letters,2009,45(1):84.
- [7] TAN Z,ELDAR Y C,NEHORAI A. Direction of arrival estimation using co-prime arrays:a super resolution viewpoint[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,62(21):5565–5576.
- [8] 王勇,姜义成. CAPON方法在ISAR成像中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(11):1751–1755.
- [9] WANG Y,JIANG Y C. ISAR imaging method based on CA-PON filter[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2007,39(11):1751–1755(in Chinese).
- [10] 李树清.Capon算法在矢量阵中的应用研究[J].泰山学院学报,2006,28(6):56–59.
- [11] LI S Q. Research on Capon algorithm used in vector sensor array[J]. Journal of Taishan University,2006,28(6):56–59(in Chinese).
- [12] HUANG W,YANG X,LIU D,et al. Diffusion LMS with component-wise variable step-size over sensor networks[J]. IET Signal Processing,2016,10(1):37–45.
- [13] 朱天敬,张斌,王宝杰.基于实值Capon和Prony算法的间谐波参数估计[J].黑龙江电力,2018,40(2):154–156.
- [14] ZHU T J,ZHANG B,WANG B J. Estimation of inter-harmonic parameter based on Capon and Prony algorithms[J]. Heilongjiang Electric Power,2018,40(2):154–156(in Chinese).
- [15] 林旭梅,刘振东,马士强,等.基于变步长LMS算法的交流阻抗测钢筋腐蚀[J].测控技术,2019,38(7):93–96.
- [16] LIN X M,LIU Z D,MA S Q,et al. Measurement of rebar corrosion AC with impedance method based on variable step size LMS algorithm[J]. Measurement & Control Technology,2019,38(7):93–96(in Chinese).

(下转第57页)

- ZHANG H J, LIANG X M, LI Y. F-T synthesis products blending 0# national VI diesel oil and lubrication performance [J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(12): 2789–2792 (in Chinese).
- [5] 冉岚, 刘少友, 文正康. 影响聚氨酯油墨黏度及黏性的因素分析 [J]. 中国胶粘剂, 2014, 23(7): 57–58.
- RAN L, LIU S Y, WEN Z K. Analysis of factors affecting the viscosity and viscosity of polyurethane ink [J]. China Adhesives, 2014, 23(7): 57–58 (in Chinese).
- [6] 虞丽芳. 论油液黏度对液压系统工作效率的影响 [J]. 液压与气动, 1998(6): 32–34.
- YU L F. On the influence of oil viscosity on the working efficiency of hydraulic system [J]. Chinese Hydraulic & Pneumatic, 1998(6): 32–34 (in Chinese).
- [7] 陈丽, 陈颖超, 仰礼真. 2型糖尿病患者糖化血红蛋白与血黏度及外周动脉血流的相关性研究 [J]. 上海交通大学学报(医学版), 2019, 39(12): 1442–1450.
- CHEN L, CHEN Y C, YANG L Z. Correlation of hemoglobin A1c with blood viscosity and peripheral arterial blood flow in patients with type 2 diabetes mellitus [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Medical Science), 2019, 39(12): 1442–1450 (in Chinese).
- [8] 赵熹君, 王虹. 抗凝血酶Ⅲ检测与血黏度的关系 [J]. 国际检验医学杂志, 2016, 37(11): 1482–1483.
- ZHAO X J, WANG H. Relationship between AT-Ⅲ and blood viscosity [J]. International Journal of Laboratory Medicine, 2016, 37(11): 1482–1483 (in Chinese).
- [9] 李晶晶, 杨希文, 王建民, 等. 智能液位测量技术在毛细管黏度计自动检定过程中的应用 [J]. 计量技术, 2019(12): 39–43.
- LI J J, YANG X W, WANG J M, et al. Application of intelligent liquid level measurement technology in automatic verification of capillary viscometer [J]. Measurement Technique, 2019(12): 39–43 (in Chinese).
- [10] 吴阳平, 滕召胜, 林海军, 等. 基于电容传感器的毛细管黏度计液位自动检测方法 [J]. 传感技术学报, 2009, 22(7): 1061–1065.
- WU Y P, TENG Z S, LIN H J, et al. Automatic liquid level detection method for capillary-gravity viscometer based on capacitance sensors [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(7): 1061–1065 (in Chinese).
- [11] 李琴. 石油产品运动黏度全自动测定装置研究 [J]. 计量与测试技术, 2017, 44(4): 24–26.
- LI Q. Research on the full-automatic measuring device for the kinematic viscosity of petroleum product [J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44(4): 24–26 (in Chinese).
- [12] 胡国星, 张坤, 荀其宁, 等. 毛细管黏度计自动检定/校准系统的研制 [J]. 化学分析计量, 2014, 23(5): 105–107.
- HU G X, ZHANG K, XUN Q N, et al. Development of automatic calibration system for capillary viscometer [J]. Chemical Analysis and Meterage, 2014, 23(5): 105–107 (in Chinese).
- [13] 邢志红, 王凤伟, 宋洁, 等. 图像识别黏度计自动检测系统的设计与实现 [J]. 工业计量, 2014, 24(4): 29–31.
- XING Z H, WANG F W, SONG J, et al. Design and implementation of automatic detection system for image recognition viscometer [J]. Industrial Measurement, 2014, 24(4): 29–31 (in Chinese).
- [14] 陈惠钊. 黏度测量 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1994.
- CHEN H Z. Viscosity measurement [M]. Beijing: China Metrology Press, 1994 (in Chinese).
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. 工作毛细管黏度计检定规程: JJG 155—2016 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Work capillary viscosity check procedures: JJG 155—2016 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2016 (in Chinese).
- [16] 陈兵旗. 机器视觉技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- CHEN B Q. Machine vision technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018 (in Chinese).
- [17] 中国机械工业联合会. 黏度测量方法: GB/T 10247—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- China Machinery Industry Federation. Methods of viscosity measurement: GB/T 10247—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese).

(上接第 52 页)

- [13] 张延良, 师晨旭, 张伟涛, 等. 基于分级迭代变步长的自然梯度盲源分离算法 [J]. 测控技术, 2017, 36(1): 1–4.
- ZHANG Y L, SHI C X, ZHANG W T, et al. Natural gradient blind source separation algorithm with variable step-size based on hierarchical iteration [J]. Measurement & Control Technology, 2017, 36(1): 1–4 (in Chinese).
- [14] 李忱, 张越. 风廓线成像雷达仿真研究 [C]// 第 33 届中国气象学会年会论文集. 2016: 149–154.

LI C, ZHANG Y. Wind profile imaging radar simulation research [C]// The 33rd Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society. 2016: 149–154 (in Chinese).

- [15] 程世辉, 卢翠英. 算法的时间复杂度分析 [J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2007, 16(4): 20–23.
- CHENG S H, LU C Y. Analysis of algorithmic time complexity [J]. Journal of Henan Institute of Education (Natural Science Edition), 2007, 16(4): 20–23 (in Chinese).