

· 通信与信息工程 ·

线性预测盲源提取算法应用于阵列雷达的分析

饶妮妮¹, 王祥林¹, 周 博¹, 程宇锋², 王 刚¹

(1. 电子科技大学生命科学与技术学院 成都 610054; 2. 中国雷华电子技术研究所 江苏 无锡 214063)

【摘要】通过深入分析阵列雷达的杂波/干扰抑制问题, 提出应用基于线性预测的有噪盲源提取算法来提取阵列雷达的回波信号, 实现杂波/干扰的同时抑制, 最终提高阵列雷达的目标探测能力。在建立逼真的阵列雷达接收信号模型的基础上, 通过仿真分析了该算法提取阵列雷达回波的能力和改善阵列雷达的目标探测能力。结果表明, 该算法提取雷达回波信号的效果理想, 平均相关系数大于0.93; 当运动目标的归一化多普勒频率大于 ± 0.1 Hz时, 阵列雷达的检测概率接近1, 验证了该算法的可行性和有效性。

关键词 阵列雷达; 回波提取; 线性预测; 有噪盲源提取; 目标检测

中图分类号 TN71

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.001

Application Analysis of Blind Source Extraction Algorithm in Array Radar Based on Linear Prediction

RAO Ni-ni¹, WANG Xiang-lin¹, ZHOU Bo¹, CHENG Yu-feng², and WANG Gang¹

(1. School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Institute of Leihua Electronic Technology of China Wuxi Jiangsu 214063)

Abstract By analyzing the rejection problems of interference/clutters from an array radar, a noisy blind source extraction algorithm based on linear prediction is proposed to extract the echo from array radar signals, realize the simultaneous rejection of interference and clutters and finally increase the target detection probability of radar. On basis of the realistic receiving signal model established for array radars, the performance of proposed algorithm for the echo extraction and the target detection is analyzed by the simulation. The results show that using the proposed algorithm, the effect of echo extraction is good and the correlation coefficient on average is more than 0.93. Also, the detection probability of array radar is close to 1 when the normalized Doppler frequencies of moving targets are larger than ± 0.1 Hz. The feasibility and the effectiveness of the proposed algorithm are therefore confirmed.

Key words array radar; echo extraction; linear prediction; noisy blind source extraction; target detection

阵列雷达系统在实战中接收的信号通常包括回波、杂波、干扰和内部噪声, 其信号环境十分复杂。

为了提高阵列雷达的目标探测能力, 近年来一些学者提出用盲源信号处理方法来抑制阵列雷达的杂波与干扰。文献[1]基于盲源分离技术从非均匀杂波环境中分离出雷达回波信号; 文献[2]利用盲源分离技术来抑制阵列雷达的干扰信号, 并提取出回波信号。尽管这些研究在理论上能够取得较好的效果, 但由于盲源分离技术的实时性很差, 因而限制了这类方法的实际应用。盲源提取(blind source extraction, BSE)^[3-9]通常利用独立分量分析技术, 从线性混合数

据中提取出相互独立的非高斯信号。与盲源分离相比, 盲源提取可以只提取一个感兴趣的信号, 因此计算量小、占用空间少^[10-11]。根据信号的特点, 盲源提取方法可用指定的顺序提取信号, 如广义归一化峭度的绝对值^[10]、非高斯性测度^[4-6]或线性可预测性所决定的顺序。为此, 文献[12]又在盲源分离的基础上, 提出用盲源提取来实时分类阵列雷达回波信号。但文献[12]采用的算法在一些特殊情况下存在不能正确提取雷达回波的缺陷。此外, 上述研究的一个共性问题是在仿真中采用的阵列雷达接收信号模型不全面, 与实际模型相差较大, 影响实验结果的真

收稿日期: 2008-05-27; 修回日期: 2008-12-05

基金项目: 航空科学基金(20092080016)

作者简介: 饶妮妮(1963-), 女, 博士, 教授, 主要从事信号与信息处理及其在生物医学、雷达和通信中的应用等方面的研究。

实性。如文献[1]等在仿真中采用的信号模型没有考虑干扰信号的存在,文献[12]的模型虽然考虑了干扰信号,但却没有考虑非均匀杂波的情况。盲源提取算法通常分为基于高阶累积量的方法和基于二阶累积量的方法两种。前者利用源信号的峭度;后者利用源信号的线性可预测性,包括感兴趣的源信号具有的固定周期,其典型的应用有胎儿心电信号的提取^[13]等。从适用性的角度,盲源提取算法还有无噪与有噪之分。文献[14]建议了一种适用于有噪情况的盲源提取算法,并从理论上证明了该算法提取特定需要信号的正确性,但没有给出该算法的应用实例。

本文通过深入分析阵列雷达的杂波/干扰抑制问题和文献[14]提出的盲源提取算法后,建议应用该算法来提取阵列雷达的回波信号,实现杂波/干扰的同时抑制,最终提高阵列雷达的目标探测能力。在建立逼真的阵列雷达接收信号模型的基础上,通过仿真,分析该算法提取阵列雷达回波的能力和改善阵列雷达的目标探测能力,并证实本文研究思路的可行性和有效性。

1 基于线性预测的有噪盲源提取算法

基于线性预测的有噪盲源提取算法结构如图1所示^[14]。在该算法结构中, $y(t)$ 是提取出的信号, $e(t)$ 是输出误差,即:

$$y(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(t) \quad (1)$$

$$e(t) = y(t) - \mathbf{b}^T \mathbf{y}(t) \quad (2)$$

式中 \mathbf{w} 为混叠矩阵,假设各个源信号是瞬时混叠; $\mathbf{x}(t)$ 为 t 时刻输入的 n 维归一化(均值为零,方差为1)的观测随机信号,同时有:

$$\mathbf{b} = [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_p] \quad (3)$$

$$\mathbf{y}(t) = [y[t - \Delta t] \ y[t - 2\Delta t] \ \cdots \ y[t - p\Delta t]]^T \quad (4)$$

$$\mathbf{x}(t) = [x_0(t) \ x_1(t) \ \cdots \ x_{n-1}(t)]^T = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (5)$$

式中 \mathbf{A} 为 $m \times n$ 混合矩阵; $\mathbf{s}(t)$ 为 $n \times 1$ 的源信号矩阵; Δt 为数据采样间隔; p 为FIR/IIR滤波器阶数。源信号矩阵可表示为:

$$\mathbf{s}(t) = [s_0(t) \ s_1(t) \ \cdots \ s_{n-1}(t)]^T \quad (6)$$

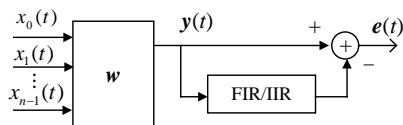


图1 基于线性预测器的BSE结构图

盲源提取的目的就是找到一个向量 \mathbf{w} ,使得 $y(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{x}(t) = \mathbf{w}^T \mathbf{A}\mathbf{s}(t)$ 是某个特定源信号 $s_k(t)$ 的估计,即求式(1)中 \mathbf{w} 的最合适值,使得目标函数

$J(\mathbf{w})$ 达到最小,然后根据 \mathbf{w} 提取出信号,即有:

$$J(\mathbf{w}) = \frac{E\{e^2(t)\}}{E\{y^2(t)\}} \quad (7)$$

该算法的实现框图如图2所示。

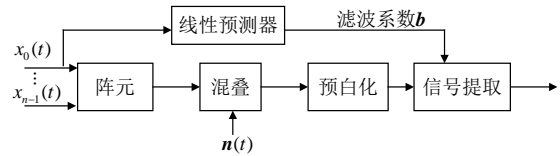


图2 盲源提取算法提取信号的实现方框图

为了提高算法的鲁棒性和收敛速度,需对观测数据先作白化处理。求解白化矩阵的具体方法是:如果观测向量 \mathbf{x} 的自相关矩阵 $\mathbf{R}_x = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\}$ 的特征值分解(eigenvalue decomposition, EVD)或奇异值分解(singular value decomposition, SVD)为 $\mathbf{R}_x = \mathbf{P}\mathbf{D}\mathbf{P}^T$,其中 \mathbf{P} 为特征矩阵, $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$ 为对角矩阵,其对角元素为特征值,则白化矩阵为 $\mathbf{U} = \mathbf{P}\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{P}^T$ 。白化的信号为 $\mathbf{z} = \mathbf{U}\mathbf{x}$,且有 $E\{\mathbf{z}\mathbf{z}^T\} = \mathbf{U}\mathbf{A}E\{\mathbf{s}\mathbf{s}^T\}\mathbf{A}^T\mathbf{U}^T = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{A}^T\mathbf{U}^T = \mathbf{I}$ 为单位矩阵。为方便起见,本文假设 \mathbf{x} 已经白化,即 $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\} = \mathbf{I}$ 。

2 盲提取阵列雷达回波信号的方法

基于高阶累积量的盲源提取算法通常利用信号的峭度信息,且计算量较大。基于二阶累积量的算法往往利用信号的时序结构,计算量相对较小。由于雷达回波信号具有明显的时序结构(有明显的周期),因此基于二阶累积量的算法更适合用于雷达回波信号的提取。在相关的算法中,文献[14]提出基于线性预测的有噪盲源提取算法,它是一种基于AR模型的二阶累积量算法。若已知源信号的AR模型,则该算法可以从混合信号中提取出源信号。由于雷达回波信号与发射波具有相似的时序结构,可以通过计算发射信号的AR模型作为回波信号的近似估计,因此本文提出采用该算法来提取雷达回波信号。

为了达到盲源提取的要求,即阵元数目 m 大于独立信号源个数 n ,假设 $n=4$ 、 $m=5$ 。当提取雷达回波时,采用发射信号模型来计算回波信号的AR模型参数。

根据图2所示算法的实现方框图,本文设计的雷达回波信号提取方法描述如下:(1) 将包含回波、杂波、干扰和噪声混叠的接收信号进行预白化。(2) 根据发射信号,用线性预测器估计待提取信号的AR模型,得到 P 阶有限冲击响应(finite impulse response, FIR)滤波系数 \mathbf{b} 。(3) 利用 \mathbf{b} 和预白化后的数据提取出回波信号。(4) 评估提取结果。为了评估盲源提取方法提取雷达回波的效果,本文引入被提取的雷达回

波信号 y_i 和原始雷达发射信号 s_j 之间的相关系数 ρ_{ij} , 即:

$$\rho_{ij} = \sqrt{\frac{|E(y_i s_j)|^2}{E(|y_i|^2)E(|s_j|^2)}} \quad (8)$$

若相关系数等于或接近1, 则表示提取出来的信号与原信号越相似, 失真度就越小, 提取效果越理想; 若相关系数接近于0, 则表示提取效果不理想。

由于基于线性预测的盲源提取算法能够将有用的回波信号与杂波/干扰信号分离, 使雷达系统在低噪声背景下对被提取的回波做后续处理, 如检测目标或提取目标参数等, 这个处理过程实质是一种滤除杂波和干扰的过程。被提取的回波中虽然还包含有极少量的杂波和干扰, 但这些残余杂波和干扰对后续处理的影响极小, 因而该算法有效地提高了雷达的目标探测能力。

3 仿真实验

3.1 信号模型的建立

假设阵列雷达系统有 m 个接收阵元, 阵元间距离为 d , 有 n 路窄带信号 ($n < m$), $\mathbf{r}(\theta_i)$ 为在方向 θ_i 上对窄带信号的天线响应, 则有 $\mathbf{r}(\theta_i) = [1, e^{j\phi_i}, \dots, e^{j(m-1)\phi_i}]^T$, 其中 $\phi_i = 2\pi d \sin \theta_i / \lambda$, λ 为其波长, 则雷达接收信号的数学模型为:

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{H} \sum_{i=1}^n \mathbf{r}(\theta_i) s_i + \mathbf{n}(t) = \mathbf{A} \mathbf{s}(t) + \mathbf{n}(t) \quad (9)$$

式中 $\mathbf{x}(t)$ 为雷达接收到的观测信号; \mathbf{A} 为 $m \times n$ 混叠矩阵, 它为天线阵元响应函数 $\mathbf{R} = [\mathbf{r}(\theta_1), \mathbf{r}(\theta_2), \dots, \mathbf{r}(\theta_n)]$ 和传播过程中的混叠矩阵 \mathbf{H} 的乘积; $\mathbf{s}(t)$ 为包含回波、干扰和杂波等的源信号; $\mathbf{n}(t)$ 为 $m \times 1$ 维的噪声信号, 通常视为高斯白噪声。假设各信号间相互独立且与噪声也相互独立。

3.1.1 收发信号模型

雷达的信号形式很多, 不失一般性, 本文采用基本的雷达发射信号, 它在时间域可表示为:

$$s(t) = a(t) \cos(\omega_0 t + \theta(t)) \quad (10)$$

式中 $s(t)$ 为时间的实函数, 称为实信号, 一般都是窄带信号; ω_0 为载频; $a(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别为幅度调制函数和相位调制函数, 它们相对于 $\cos \omega_0 t$ 都是缓慢的。回波信号为:

$$s(t - \tau) = a(t - \tau) \cos[\omega_0(t - \tau) + \theta(t - \tau)] \quad (11)$$

式中 τ 为回波相对于发射信号的双程延迟。对于一般的窄带雷达信号, 距离变化率系数和距离加速度系数对信号包络的影响很小, 因此, 回波信号只

存在延迟和频移效应, 其包络的变化可以忽略不计。

3.1.2 干扰信号模型

雷达有源干扰分为压制式干扰和欺骗式干扰两类干扰样式, 每一类干扰样式又包含多种干扰信号形式。压制式干扰中的噪声调频干扰是目前应用最广泛的一种干扰信号形式。不失代表性, 本文仿真中选用该干扰样式, 其数学模型可表示为:

$$u_j(t) = U_0 \cos \left[\omega_j t + K_{\text{FM}} \int_0^t u_A(t') dt' \right] \quad (12)$$

式中 $u_A(t')$ 为调制噪声, 设为高斯限带白噪声, 其功率为 σ^2 ; K_{FM} 为调谐率。

3.1.3 杂波信号模型

杂波模型主要分机理模型、分布模型和关系模型3类^[15], 本文采用分布模型。常见的分布模型有瑞利分布、对数正态分布、韦伯分布和K分布, 这些典型分布的杂波可描述大部分雷达杂波。其中, 瑞利分布适用于描述气象杂波、箔条干扰、低分辨率雷达的地杂波; 对数正态分布适用于描述低入射角和复杂地形的杂波数据或者平坦区高分辨率的海杂波数据; 韦布尔分布适用于描述高分辨力雷达、低入射角情况下的一般海情的海浪杂波以及地物杂波; K分布适用于描述高分辨力雷达的非均匀杂波, 多见于对海杂波的描述。

3.1.4 噪声模型

雷达接收机噪声包括内部热噪声、电噪声以及外部噪声等, 通常视为高斯白噪声, 其概率密度为:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\delta}} \exp \left(-\frac{(x-a)^2}{2\delta^2} \right) \quad (13)$$

式中 a 为分布的中位数; δ^2 为分布的方差, 同时也表示噪声功率。

3.2 实验参数

仿真中, 雷达脉冲重复频率PRF取为10 kHz, 雷达波长 λ 取为0.05 m, 相干脉冲序列长度取为1 250点, 雷达工作频率取为500 MHz, 回波相对于发射信号的双程延迟 τ 取均值为0、方差为1的随机数; 干扰信号频率取为500 MHz, 调谐率 K_{FM} 取为2.2; 噪声采用均值为0、方差为1的高斯分布随机信号; 4种不同类型杂波参数的选取如表1所示。

表1 4种杂波的参数设置

分布类型	参数1	参数2
瑞利	$\sigma = 1.2$	—
对数正态	$\sigma_c = 0.6$	$\mu_m = 10$
韦布尔	$p = 1.5$	$q = 2$
K分布	$\nu = 2.0$	$a = 0.5$

3.3 实验结果与分析

3.3.1 回波信号提取能力分析

假设阵列雷达接收信号是由雷达目标回波、杂波、干扰和噪声等信号瞬时混叠而成。由于杂波有4种类型,所以实验针对不同类型的杂波进行了仿真。受篇幅限制,本文只给出了瑞利分布杂波与雷达目标回波、干扰和噪声混合后的实验结果。当杂波幅度服从瑞利分布时,取其序列长度为1 250点,在信杂比(信号功率/(杂波功率+干扰功率+噪声功率))为-30 dB时,原始信号和预白化后的信号分别如图3和图4所示,被提取出的回波信号如图5所示。经计算,被提取的回波信号与雷达发射信号的相关系数达到0.956 3,提取效果比较理想。

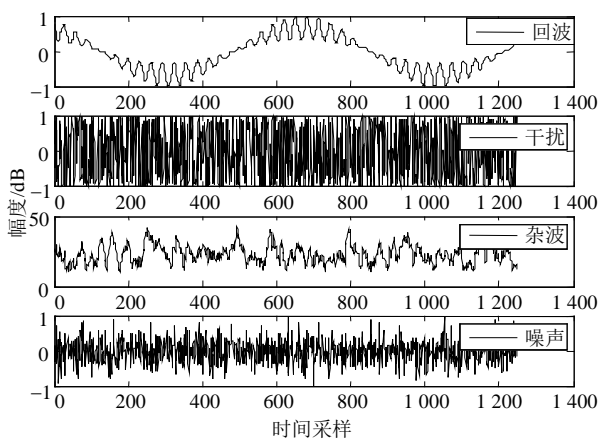


图3 原始信号(杂波为瑞利分布)

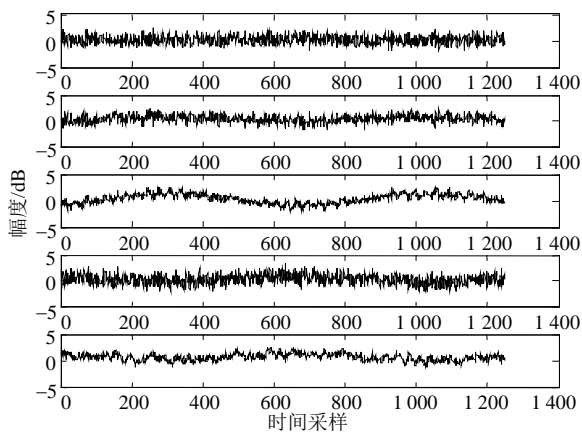


图4 混叠及预白化后的信号

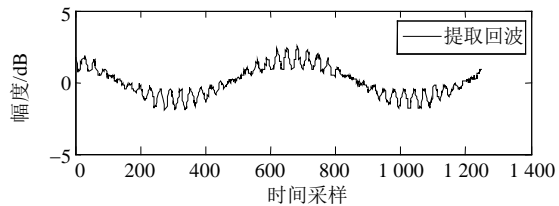


图5 被提取的雷达回波信号

保持雷达回波、雷达干扰和高斯噪声的产生方

式不变,改变杂波的类型,并对每一种类型的杂波进行多次实验,对所得相关系数进行平均,以便更有效地评估本文的方法,实验结果如表2所示。

表2 4种杂波分布情况下的回波提取效果

分布类型	实验次数	相关系数绝对值平均	系数大于0.95次数
瑞利	200	0.942 3	164
对数	200	0.938 5	168
韦尔尔	200	0.943 5	173
K分布	200	0.933 0	156

从表2中可知,雷达回波的提取效果比较理想,相关系数绝对值平均在0.93以上,大于0.95的概率接近或大于80%;而且随着信杂比的提高,相关系数的平均值也会相应提高。

3.3.2 探测能力分析

本文通过开展阵列雷达信号处理系统仿真来分析本文盲源提取算法改善雷达检测目标的能力。仿真中,假设阵列雷达采用局域化广义似然比检测(JDL-GLR)算法,阵列雷达接收信号是由雷达目标回波、杂波、干扰和噪声等信号瞬时混叠而成,其中,杂波模型选择瑞利分布,系统信杂比设为-10 dB。实验分成未采用盲源提取和采用盲源提取两种情况,结果如图6所示。

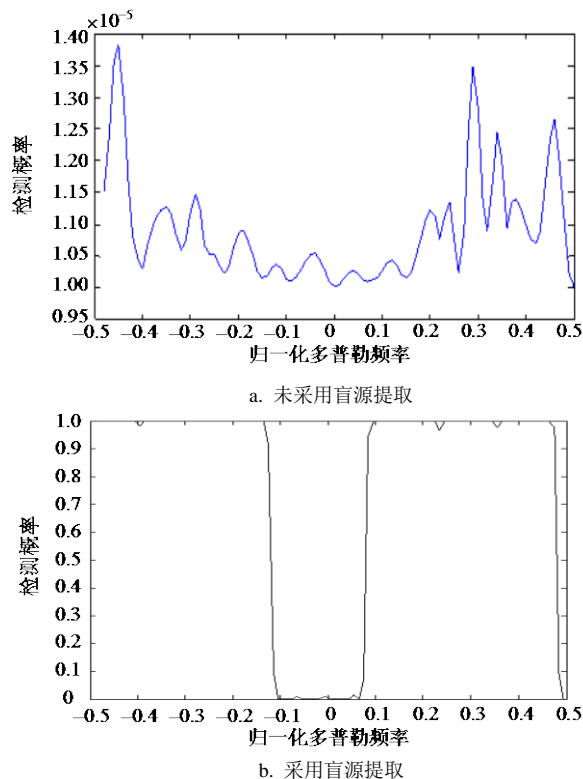


图6 阵列雷达的目标检测性能

JDL-GLR算法是一种常用的阵列雷达目标检测算法,但其检测性能依赖于被处理的杂波特性。当

杂波是均匀分布时, 该算法性能最优。由图6a可知, 未采用本文建议的盲源提取算法时, 由于实验中使用的杂波模型是瑞利分布, 属于非均匀分布, 此时雷达系统的目标检测性能很差。采用本文建议的盲源提取算法后, 当运动目标的归一化频率大于 ± 0.1 时, 雷达的检测概率接近于1, 具有优良的目标检测性能。由此可见, 本文的方法能够消除杂波、干扰和噪声的影响, 极大地改善雷达的目标探测能力。

4 结 论

本文通过深入分析阵列雷达的杂波/干扰抑制问题, 提出应用基于线性预测的有噪盲源提取算法来提取阵列雷达的回波信号, 实现杂波/干扰的同时抑制, 最终提高阵列雷达的目标探测能力; 在建立逼真的阵列雷达接收信号模型的基础上, 通过仿真, 分析了该算法提取阵列雷达回波的能力和改善阵列雷达的目标探测能力。结果表明, 该算法提取雷达回波信号的效果理想, 当被检测目标的归一化多谱勒频率大于 ± 0.1 时, 能使雷达的检测概率接近于1, 证实了本文方法的可行性和有效性。

与现有相关研究比较, 本文采用的盲源提取算法不同于现有的算法, 建立的雷达信号环境更复杂、更逼真, 在发展阵列雷达抗干扰信号处理新方法方面做了有益的探索。本文建议的盲源提取方法主要针对信号的瞬时混叠情况, 针对卷积混叠信号的盲源提取算法及其应用仍有待进一步的研究。

参 考 文 献

- [1] 肖文书, 张兴敢, 都思丹. 雷达信号的盲分离[J]. 南京大学学报, 2006, 42(1): 38-44.
XIAO Wen-shu, ZHANG Xing-gan, DU Si-dan. Blind separation of radar signals[J]. Journal of Nanjing University, 2006, 42(1): 38-43.
- [2] HUANG G M, YANG L X. A radar anti-jamming technology based on blind source separation[C]//7th International Conference on Signal Processing Proceedings (ICSP'04). [S.l.]: [s.n.], 2004: 2021-2024.
- [3] CICHOCKI A, THAWONMAS R, AMARI S. Sequential blind signal extraction in order specified by stochastics properties[J]. IEE Electronics Letters, 1997, 33: 64-65.
- [4] BARROS A K, CICHOCKI A. Extraction of specific signals with temporal structure[J]. Neural Computation, 2001, 13: 1995-2003.
- [5] ZHANG Z L, ZHANG Y. Robust extraction of specific signals with temporal structure[J]. Neurocomputing, 2006, 69: 888-893.
- [6] ZHANG Z L, ZHANG Y. Extraction of a source signal whose kurtosis value lies in a specific range[J]. Neurocomputing, 2006, 69: 894-899.
- [7] LU W, RAJAPAKSE J C. Approach and applications of constrained ICA[J]. IEEE Tran Neural Network, 2005, 16(1): 203-212.
- [8] LU W, RAJAPAKSE J C. ICA with reference[C]// Proceedings of International Conference on Third International Conference on Independent Component Analysis and Blind Source Separation. [S.l.]: [s.n.], 2001: 120-125.
- [9] LIU W, DANILO P. A class of novel blind source extraction algorithms based on a linear predictor[J]. IET Signal Processing, 2007, 1(1): 29-34.
- [10] CICHOCKI A, AMARI S. Adaptive blind signal and image processing[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2003.
- [11] 冶继民, 张贤达, 朱孝龙. 信源数目未知和动态变化时的盲信号分离[J]. 中国科学F辑: 信息科学, 2005, 35(12): 1277-1287.
YE Ji-min, ZHANG Xian-da, ZHU Xiao-long. Blind source separation with an unknown source number and dynamic variation[J]. Science in China Series F: Information Science, 2005, 35(12): 1277-1287.
- [12] HUANG G M, YANG L X. Radar signal sorting based on blind signal extraction[C]//ICSP'04 Proceedings. [S.l.]: [s.n.], 2004: 2120-2123.
- [13] 李 昕, 胡 波, 凌燮亭, 等. 基于盲信号分离的胎儿心电图提取[J]. 中国生物医学工程学报, 2002, 21(5): 461-465.
LI Xi, HU Bo, XIE L T, et al. FECG detection based on blind signal separation[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2002, 21(5): 461-465.
- [14] LIU W, MANDIC D P, CICHOCKI A. Blind second-order source extraction of instantaneous noisy mixtures[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2006, 53(9): 931-935.
- [15] 曹 晨, 王小谟. 关于雷达杂波性质研究的若干问题[J]. 现代雷达, 2001, 23(5): 1-5.
CAO Chen, WANG Xiao-mo. Some problems on radar clutter characterization[J]. Modern Radar, 2001, 23(5): 1-5.

编辑 黄 莘