

基于改进卡尔曼滤波的水声通信 盲自适应多用户检测算法

李 扬¹, 曹自力², 王虹入³, 王中秋³

(1. 中国人民解放军 91872 部队, 北京 102442; 2. 青岛地区装备修理监修室, 山东 青岛 266001;
3. 山东省科学院海洋仪器仪表研究所 山东省海洋环境监测技术重点实验室, 山东 青岛 266001)

摘要: 针对水声通信网络中遇到的多用户检测中目标用户的多址干扰等检测问题, 提出了基于改进 Kalman 算法的盲自适应多用户检测算法, 解决了多用户检测中的多址干扰对水声通信信道用户变动时的干扰抑制问题; 仿真分析分别针对同步多用户、异步多用户通信过程, 对比了传统 Kalman 算法及改进的 Kalman 算法的性能差异, 通过仿真对比表明, 改进后的 Kalman 检算法不需要训练序列即可以实现同步和异步通信状态下的多水声目标用户的盲自适应检测, 改进后的算法目标检测的信干比比传统算法最大可提高 6 dB; 新算法对于水下多用户检测、区分, 准确、稳定的实现基于 CDMA 协议的快速水声通信具有重要意义。

关键词: 卡尔曼滤波; 多用户检测; 盲自适应; 水声通信

Blind Adaptive Multi-User Detection Method for Underwater Acoustic Communication Based on Improved Kalman Filter

Li Yang¹, Cao Zili², Wang Hongru³, Wang Zhongqiu³

(1. Chinese people's Liberation Army 91872 Troop, Beijing 102442, China; 2. Navy equipment repair and maintenance room in Qingdao area, Qingdao 266001, China; 3. Shandong Academy of Sciences, Shandong Provincial Key Laboratory of Ocean Environment Monitoring Technology, Qingdao 266001, China)

Abstract: In order to solve multi access interference (MAI) effect of multi-user blind detection in underwater acoustic communication networks, blind adaptive multi-user detection method based on improved Kalman filter algorithm was proposed. This method can suppress the MAI problem when the user number increases. Simulation was done for both traditional Kalman method and improved Kalman method in synchronous and asynchronous multi-user communication case, the simulation results show that the improved Kalman detection algorithm does not require training sequences that can realize synchronous and asynchronous communication state of multiple underwater acoustic target users of blind adaptive detection, improved Kalman filter algorithm can get higher SIR in target detection than the traditional algorithm by 6 dB in maximum. The new algorithm is of great significance for accuracy and stability of underwater acoustic communication based on CDMA protocol in multiuser detection and differentiation.

Keywords: Kalman filter; multiuser detection; blind adaptive; acoustic communication

0 引言

随着 21 世纪世界各国对海洋开发、海洋探索力度的加大, 催生了水声通信网络^[1-2]技术的较快发展, 以实现海洋信息的收集与监听。由于水声信道是迄今为止最为复杂的无线通信信道之一, 其固有的时一空一频变以及窄带、高噪、强多途、长时延传输等特征, 使水声通信和水声网络在性能上还难以满足人们在实际应用中的需求, 迫切需要能传得更快、更远, 能实现多用户检测的水声通信方法及技术, 用以准确有效地实现多用户的实时接入, 提高数据传输量及传输速率, 同时能够抵抗外部干扰, 提高通信效率和准确性。基于码分多址 (CDMA) 的无线水声通信盲自适应多用户检测技术是解决上述问题的有效手段^[3]。

CDMA 技术允许多个用户同时共用整个频带, 具有较强的抗多径干扰能力且保密性强。由于水声信道的复杂性, 当移动用户和基站之间的通信因某种不可预知的强干扰 (如新的多径出现、环境变化、新的干扰用户出现等) 而突然恶化时, 盲自适应多用户检测技术^[4]可在不需要知道系统参数及用户重新发送训练序列的情况下, 使系统恢复正常, 这一特性对于水声无线通信及水声通信网络发展, 特别是军用场合具有极大的吸引力和较好的发展前景^[5]。对于多用户水声通信过程中的多用户盲估计检测, 目前研究较少, 本文提出了基于改进 kalman 滤波的盲自适应多用户检测算法, 用于 CDMA 多用户水声通信过程中遇到的多径、多用户多址干扰等问题的解决。在仿真分析中, 设计了 kalman 盲自适应检测算法作为检测机对多用户水声通信过程中用户变化进行检测, 对比了在同步、异步等多用户情况下的盲自适应检测效果, 验证了算法的有效性。

1 基于改进 Kalman 滤波算法的盲自适应检测算法构建

Kalman 滤波算法是一种状态域表达、可递推计算的滤波

收稿日期:2015-11-16; 修回日期:2016-01-07。

基金项目:山东省重点研发计划项目(2015GSF115018)。

作者简介:李 扬(1978-),男,湖北石首人,硕士,工程师,主要从事舰船电子装备维修保障方向的研究。

器,是一种高效率的递归滤波器(自回归滤波器),它能够从一系列的不完全包含噪声的测量中,估计动态系统的状态,可以不加修改的用于稳定或不稳定环境。在收敛性和跟踪容量上,要好于 LMS 算法和 RLS 算法。本文采用该算法用于水声通信多用户盲自适应检测,以获得更高效的多用户检测。

1.1 改进的 Kalman 盲自适应检测算法构建

参照 GSC (Generalized Sidelobe Canceler) 的框架和限制性检测机,根据初始目标用户 1 的扩频序列,给出单位响应, Kapoor^[6] 等专家给出了与 LMS 不同的线性检测机的表达式,关于用户 1 的典范表示:

$$c_1(n) = s_1 - C_{1,mult}w_1(n) \quad (1)$$

其中: $w_1(n)$ 为 $c_1(n)$ 的自适应部分,而 $N \times (N-1)$ 的矩阵 $C_{1,mult}$ 的列组成了 s_1 的零空间,即 $\langle s_1, C_{1,mult} \rangle = 0$ 。该表达式与 LMS 中使用的典范类似,所以可以获得:

$$MOE(c_1) = E\{\langle c_1, y \rangle^2\} = E\{(c_1^T(n)y(n))^2\} \quad (2)$$

$$MSE(c_1) = E\{(A_1 b_1 - \langle c_1, y \rangle)^2\} \quad (3)$$

在一个时不变的 CDMA 系统中,最优线性接收机或权重矢量 c_{opt1} 是不变的,设 w_{opt1} 是相对于 c_{opt1} 在公式 (1) 的权重矢量,可以得到状态方程 $w_{opt1}(n+1) = w_{opt1}(n)$ 。定义: $e(n) = \langle c_1, y \rangle = c_1^T(n)y(n)$, 由于 $e(n)$ 的均值为 0, 方差为:

$$\text{cov}\{e(n)\} = E\{e^2(n)\} = A^2 + MSE(c_1(n)) \quad (4)$$

将公式 (2) 代入 (4) 得到:

$$e(n) = s_1^T y(n) - y^T(n)C_{1,mult}w_1(n) \quad (5)$$

令 $\tilde{y}(n) = s_1^T y(n)$, 并且令 $d^T(n) = y^T(n)C_{1,mult}$ 。当 w_1 得到 w_{opt1} , 则公式 (5) 可以用下面的观察方程表示:

$$\tilde{y}(n) = d^T(n)w_{opt1}(n) + e_{opt}(n) \quad (6)$$

状态方程和观察方程 (6) 构成了用户 1 的动态模型。可以用给定的测试方程矩阵 $d^T(n)$, 使用观测的数据 $\tilde{y}(n)$, 找到状态矢量 w_{opt1} 在 $n \geq 1$ 时的最小均方估计, 来描述盲多用户检测的 Kalman 问题。与传统 Kalman 模型相比, 新的模型有如下特征:

(1) 状态矢量为 $w_{opt1}(n)$, 状态方程 $F(n+1, n)$ 是一个 $N \times N$ 的单位阵, 过程噪声是一个零矢量;

(2) 观察矢量为标量 $\tilde{y}(n) = s_1^T y(n)$, 观察矩阵简化成矢量 $d^T(n) = y^T(n)C_{1,mult}$ 。

从传统动态系统模型和用户 1 动态系统规模的对应关系, 利用标准 Kalman 算法, 可以得到稳定态同步系统盲自适应多用户检测的 Kalman 算法:

$$g(n) = K(n, n-1)d(n)[d^T(n)K(n, n-1)d(n) + \xi_{min}]^{-1} \quad (7)$$

$$K(n+1, n) = K(n, n-1) - g(n)d^T(n)K(n, n-1) \quad (8)$$

$$\hat{w}_{opt1}(n) = \hat{w}_{opt1}(n-1) + g(n)[\tilde{y}(n) - d^T(n)\hat{w}_{opt1}(n-1)] \quad (9)$$

$$c_1(n) = s_1 - C_{1,mult}\hat{w}_{opt1}(n) \quad (10)$$

一般, 目标用户输出的最大 SIR 要大于 10 dB, 即 $MMSE_{\xi_{min}}$ 通常要小于 0.1, 指定信号在第 n 个间隔的接收幅值为 A_1 , 则可以近似取 $\xi_{min} = A_1^2$ 为位置的 ξ_{min} 估计。Haykin^[7] 研究表明, 一个未知的动态系统能被建模成为一个一阶 Markov 过程, 权重矢量 w_{opt1} 的横向滤波器可表示为:

$$w_{opt1}(n+1) = \alpha w_{opt1}(n) + v_1(n) \quad (11)$$

其中: α 为模型固定参数, $v_1(n)$ 为过程零均值相关矩阵 Q_1

的噪声矢量, 因此, Kalman 滤波算法可以改变成:

$$K(n+1, n) = K(n, n-1) - g(n)d^T(n)K(n, n-1) + Q_1 \quad (12)$$

$$\hat{w}_{opt1}(n) = \alpha \hat{w}_{opt1}(n-1) + g(n)[\tilde{y}(n) - d^T(n)\hat{w}_{opt1}(n-1)] \quad (13)$$

对于一个慢时变的 CDMA 水声通信系统, 可以假设 α 非常接近 1, Q_1 矩阵的每一个元素很小。因此, 虽然在慢时变的环境中, 建议 Kalman 算法在 $\xi_{min} = A_1^2, \alpha \approx 1, Q_1 = 0$ 的条件下, 仍然可以得到比较好的性能。

1.2 算法收敛性分析

在稳态条件下, 我们得到信息矩阵更新方程如下:

$$K^{-1}(n+1, n) = K^{-1}(n, n-1) + \frac{d(n)d^T(n)}{\xi_{min}} \quad (14)$$

根据给定的状态方程, 在上式中取 $n = 1, 2$, 可以得到:

$$K(2, 1) = \xi_{min} (\xi_{min} K^{-1}(1, 0) + d(1)d^T(1))^{-1} \quad (15)$$

$$K(3, 2) = \xi_{min} (\xi_{min} K^{-1}(1, 0) + \sum_{k=1}^2 d(k)d^T(k))^{-1} \quad (16)$$

根据该过程, $n = 3, 4, \dots$, 可以得到如下的普遍形式:

$$K(n+1, n) = \xi_{min} (\xi_{min} K^{-1}(1, 0) + \sum_{k=1}^n d(k)d^T(k))^{-1} \quad (17)$$

设 $R_d = E\{d(n)d^T(n)\}$, 定义:

$$\hat{R}_d = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d(k)d^T(k) \quad (18)$$

将初始值 $K(1, 0) = I$ 和公式 (18) 代入公式 (17), 可以得到:

$$K(n+1, n) = \xi_{min} (\xi_{min} I + n\hat{R}_d)^{-1} \quad (19)$$

在慢时变的通信环境中, 过程噪声矢量 Q_1 的相关矩阵是一个空矩阵, 公式 (14), (17) 和 (19) 成为了渐进表达式。因为 $w_1(n)$ 得到了相对于最优抽头权重矢量 c_{opt1} 权重矢量估计, 即 $w_1(n) = \hat{w}_{opt1}(n)$, 可以令

$$\xi(n) = MOE(w_1(n)) = MOE(\hat{w}_{opt1}(n)) \quad (20)$$

在稳定 CDMA 水声通信系统中, 当 n 足够大的时候, Kalman 算法的平均输出能量 $\xi(n)$ 通过证明, 可以得到: $\xi(n) \leq \xi_{min}(1 + n^{-1}N)$, 其中, N 为 DS-CDMA 的处理增益。

1.3 矩阵 $C_{1,mult}$ 的求解

矩阵 $C_{1,mult}$ 的求解采用了正交子空间投影法求解。正交空间是指由正交(向量内积)这个度量概念的空间, 即被赋予对称双线性函数的空间, 比如我们的空间就是正交空间。两个空间正交即高维空间的两个子空间里所有的向量在高维空间内互相正交。比如三维空间里的直线和与之垂直的平面就是三维空间的两个正交子空间。

2 模型仿真及结果分析

系统仿真构建了一个 13 个用户的同步多用户通信系统, 设定用户 1 为目标用户。通信编码为扩频序列 $n = 5$ 的 gold 序列(扩频增益为 31), 系统比特信噪比 (E_b/N_0) 分别为: 用户 1 的信噪比 $SNR_1 = 0$ dB; 2-6 用户信噪比为 $SNR_{2-6} = 10$ dB; 7-12 用户信噪比为 $SNR_{7-12} = 20$ dB; 用户 13 的信噪比 $SNR_{13} = 30$ dB, 即存在很强的多址干扰。设信道噪声为高斯白噪声, 噪声方差为 $\sigma^2 = 0.01$ 。

2.1 同步多用户检测

正常多用户检测情况, 进行 KF 线性多用户检测机对目标信号的检测特性分析。目标用户及干扰用户信号接入顺序如图 1 所示。初始信号为目标用户 1 与多址干扰用户 2~7 同时发送; 在 400~900 点数据段, 通信状态变为目标用户 1 与多址干扰用户 2、3 同时发送; 在 900~1 500 点数据段, 通信状态变为目标用户 1 与多址干扰用户 2~9 同时发送; 在 1 500 点数据结束段, 通信状态变为目标用户 1 不再通信, 而多址干扰用户 2~13 同时发送。所有信号传输过程始终存在高斯白噪声。

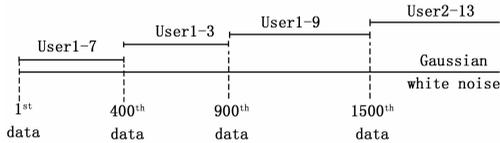


图 1 同步多用户通信信号序列

传统 Kalman 盲多用户检测机及改进的 Kalman 盲多用户检测机对图 1 所示的通信序列检测结果分别如图 2 所示。从图中可以看出, 两种 Kalman 算法均能够实现同步多用户通信时盲多用户检测, 两种算法均都不需要训练序列的训练, 可以直接进行盲检测。传统 Kalman 检测机的检测结果能够实现快速检测, 而改进后的 Kalman 检测机可以实现通信用户变动时的自适应, 而且当通信序列中含目标用户 1 时, 检测的信干比具有较大提升, 分别如图 2 中的 1~400 和 900~1 500 点数据之间曲线所示, 改进的 Kalman 检测机在 1~400 点数据的 6 个干扰用户影响下, 检测信干比 SIR 从 12 dB 提升到 18 dB, 而 900~1 500 点数据的 8 个干扰用户影响下, 检测信干比从 9 dB 提升到 15 dB, 检测性能具有明显提高。

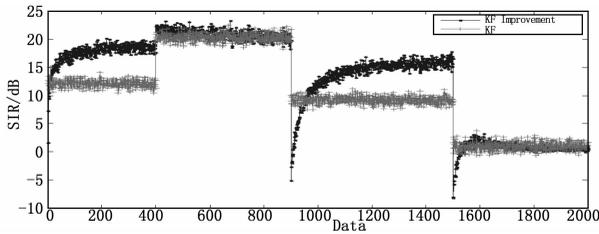


图 2 传统 Kalman 算法与改进 Kalman 算法检测同步多用户信号的 SIR 检测结果对比

2.2 异步多用户检测

对于异步信号情况, 其检测流程与同步流程类似, 仅解相关器由同步相关器更换为异步相关器。异步多用户检测仿真分析, 目标用户仍为用户 1, 目标用户及干扰用户信号接入顺序如图 3 所示。初始信号为多址干扰用户 3~7 持续到 1 200 数据点; 在 300 点数据时, 目标用户 1 异步加入通信序列持续到 1 200 数据点; 1 200 数据到结束, 用户 2 及用户 8~13 分别加入通信序列直到通信结束。所有信号传输过程始终存在高斯白噪声。

传统 Kalman 盲多用户检测机检测及改进的 Kalman 盲多用户检测机对图 3 所示的异步通信序列检测结果分别如图 4 所示。从图中可以看出, 与同步通信序列检测结果类似, 两种 Kalman 算法均能够实现异步多用户通信时盲多用户检测, 两种算法均都不需要训练序列的训练, 可以直接进行盲检测。传

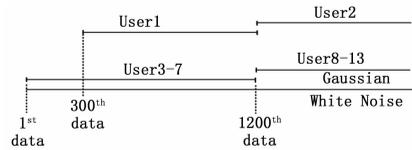


图 3 异步多用户通信信号序列

统 Kalman 检测机的检测结果能够实现快速检测, 而改进的 Kalman 检测机可实现通信用户变动时的自适应, 而且当通信序列中含目标用户 1 时, 检测的信干比具有较大提升, 分别如图 4 中的 1~400 和 900~1 500 点数据之间曲线所示, 改进的 Kalman 检测机在 1~400 点数据的 6 个干扰用户影响下, 检测信干比从 12 dB 提升到 18 dB, 而 900~1 500 点数据的 8 个干扰用户影响下, 检测信干比从 9 dB 提升到 15 dB, 检测性能具有明显提高。

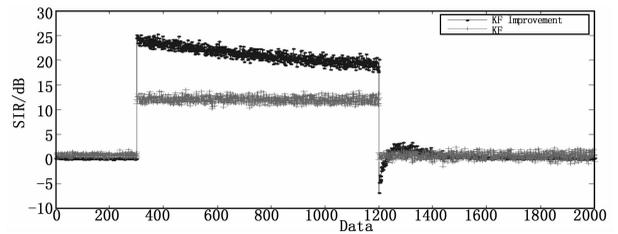


图 4 传统 Kalman 算法与改进 Kalman 算法检测异步多用户信号的 SIR 检测结果对比

3 结论

本文针对水声通信多用户检测提出了改进的 Kalman 线性盲多用户检测算法。分别通过同步多用户、异步多用户仿真实验分析, 与传统 Kalman 盲多用户检测算法进行了比较。通过对比表明:

- 1) 改进后的算法仍有较快的收敛速率, 当多用户水声通信过程中用户数发生变化, 可以快速的检测出用户的变化;
- 2) 改进的 Kalman 线性盲多用户检测算法与传统 Kalman 检测算法对比, 改进算法的检测结果的稳态输出信干比具有较大提升, 最大可提高 6 dB。

通过模型仿真分析对比, 验证了改进 Kalman 算法的有效性。本文提出的改进 Kalman 多用户盲自适应检测算法及设计的多用户检测机不需要训练序列即可实现自适应过程, 可以快速的实现收敛; 系统在用户通信变化过程中可以自动跟踪、迅速达到收敛。该检测算法的提出及检测准则的对比应用, 对于水下多用户检测、区分, 准确、稳定的实现基于 CDMA 协议的快速水声通信具有重要指导意义。

参考文献:

[1] 许肖梅. 水声通信与水声网络的发展与应用 [J]. 声学技术, 2009, 28 (6): 811-816.
 [2] 魏 昕, 赵 力, 李 霞, 等. 水声通信网综述 [J]. 电路与系统学报. 2009, 14 (6): 96-104.
 [3] Cui H J, Kong J J, Gerla M, et al. Challenges: Building Scalable and Distributed Underwater Wireless Sensor Networks (UWSNs) for Aquatic Applications [R]. University of Connecticut Technical Report UbiNet-TR05-02, 2005, 12.

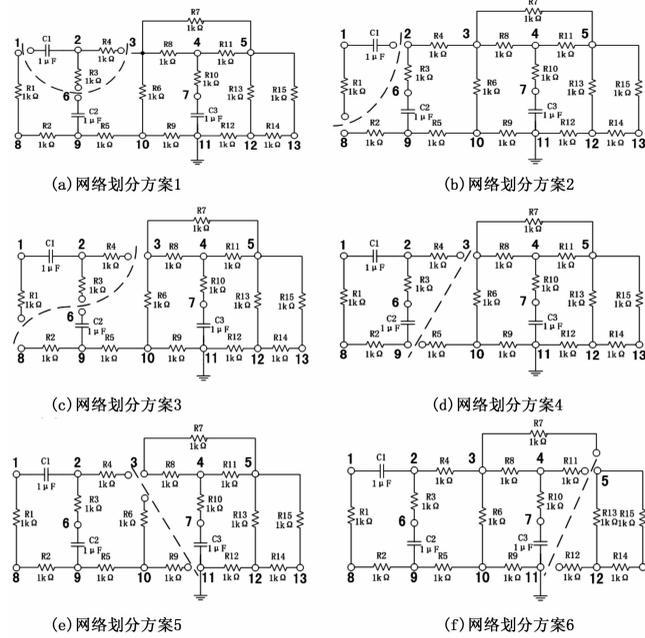


图 2 撕裂网络组合图

根据表 1 所列的计算结果，网络划分方案 5 中各项参数均为最优，因此方案 5 为该电路的最优子网络划分组合。

表 1 撕裂组合优选参数表

网络划分方案	撕裂结点	激励源数 g	元件标 准差 σ_e	测试点标 准差 σ_p	网络故障特 征灵敏度 S
1	1, 3, 6	3	6	3. 5	119.2 m
2	2, 8	2	7	4	211.4 m
3	3, 6, 8	3	5	2. 5	177.3 m
4	3, 9	2	3	1	188.2 m
5	3, 11	1	0	1	243.9 m
6	5, 11	1	5	3	239.3 m

在采用子网络撕裂法^[8,12-13]进行实测诊断时，可先根据本文方法对待诊断电路进行分析，优选最佳撕裂方案，再通过施加外部激励，实现网络“撕裂”，通过计算至和测量值的相互校验判定故障子网络。

需要注意的是进行网络撕裂的前提是保障目标电路元件故障全部可诊断，图 1 中如果按测试点 3、10 进行子网络划分，则会导致元件 R6 无法诊断，因此类似的换分方案都应尽量避免。此外，电路网络中可能存在不可撕裂结点，在进行方案优选时就需避开这些节点，选择最划分方案。假设图 1 电路网络中结点 3 为不可及结点，则可选方案将只有 2 和 6，通过比较优选方案 6 为最优撕裂方案。

4 结束语

针对模拟电路网络撕裂法的子网络划分问题，首先分析了网络撕裂的基本撕裂原则，之后在定性分析的基础上结合子网络划分的核心思想从置换激励源，元件、测试点、故障特征灵敏度四方面进行具体量化研究，给出了各撕裂组合的对比优选方法。最后通过仿真实验，验证了方法的可行性和有效性。该方法进一步加强了子网络撕裂故障诊断法的诊断效率，减小了测试消耗，提高了其工程应用价值。

参考文献:

[1] Lee S H, Park W J, Jung D Y. Similarity measure design and similarity computation for discrete fuzzy data [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18 (5): 1602 - 1608.

[2] Alexios D S, Michael G D, Alkis A H. Wavelet analysis for the detection of parametric and catastrophic faults in mixed - signal circuits [J]. IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 2011, 60 (6): 2025 - 2037.

[3] 潘 强, 杨 超. 基于多测试点多特征信息的模拟电路故障诊断 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (11): 2931 - 2934.

[4] 祝文姬, 何怡刚. 基于遗传 BP 网络的模拟电路故障诊断方法及其应用 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2009, 21 (9): 1283 - 1289.

[5] 左 磊, 侯立刚, 张 旺, 基于粒子群 - 支持向量机的模拟电路故障诊断 [J] 系统工程与电子技术, 2010, 32 (7): 1554 - 1556.

[6] 刘明刚, 施建礼, 吴中川. 大规模模拟电路故障诊断方法研究 [J]. 仪表技术, 2010 (3): 39 - 41.

[7] 齐 蓓, 何怡刚, 方葛丰, 等. 一种大规模模拟电路快速故障诊断新方法 [J] 计算机应用研究. 2013, 30 (11).

[8] 罗克龙, 何怡刚, 祝文姬, 等. 大规模直流模拟电路软故障区间诊断方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24 (2): 271 - 278.

[9] 唐圣学, 蔡红军, 李志刚. 基于小波与神经网络的模拟电路故障诊断融合方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2015, 46 (1): 128 - 134.

[10] 崔 江, 王友仁. 基于支持向量机与最近邻分类器的模拟电路故障诊断新策略 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31 (1): 45 - 50.

[11] 孙永奎. 基于支持向量机的模拟电路故障诊断方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

[12] 陈圣俭, 黄允华, 蔡金燕. 模拟电路子网络级故障诊断的新方法 [J]. 火力指挥与控制, 1997, 22 (1): 64 - 67.

[13] 陈圣俭, 黄允华, 蔡金燕. 容差模拟电路子网络级故障诊断的新方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 1998, 12 (2): 61 - 65.

[14] 王 凯, 刘 岩, 刘利强, 等. 基于子网络撕裂的非线性电路可测性分析 [J]. 电子科技, 2011, 24 (9): 125 - 126.

[15] 陈圣俭, 朱晓兵, 李广进, 等. 基于增益分析的撕裂点优选方法 [J]. 计算机工程与应用, 2013, 49 (S3): 114 - 117.

(上接第 157 页)

[4] 邬冬临, 刘宏立, 刘述钢. 基于子空间跟踪的盲自适应多用户检测技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (09): 1701 - 1704.

[5] Akyildiz I F, Pompili D, Melodia T. Underwater acoustic sensor networks: research challenges [J]. Ad Hoc Networks (Elsevier), 2005, 3: 257 - 279.

[6] Kapoor S, Gollamudi S, Nagaraj S, et al. Adaptive multiuser detection and beamforming for interference suppression in CDMA mobile radio systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology. 1999, 5 (5 - 48): 1341 - 1355.

[7] Haykin S. Adaptive filter theory [M]. 5th Edition, Prentice Hall, 2013.