

两种改进的信道阶数估计算法*

田 营¹, 葛临东¹, 王 彬¹, 马艳清²

(1. 解放军信息工程大学 信息工程学院, 郑州 450002; 2. 解放军 73086 部队, 江苏 徐州 221004)

摘要: 在传统有效秩检测准则的基础上, 通过分析自相关矩阵特征值分解后的相邻三个特征值之间的约束关系, 重新构造目标函数, 得到了两种改进的有效秩检测准则, 提高了对信道阶数的估计性能。仿真实验给出了算法在不同信噪比和信道下的估计性能, 结果表明, 改进的准则比原算法对信噪比的要求降低了 10 dB 左右。

关键词: 有效秩检测准则; 信道阶数估计; 信道盲辨识

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)01-0119-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.033

Two modified algorithms for channel order estimation

TIAN Ying¹, GE Lin-dong¹, WANG Bin¹, MA Yan-qing²

(1. Institute of Information Engineering, PLA Information Engineering University, Zhengzhou 450002, China; 2. PLA 73086 Unit, Xuzhou Jiangsu 221004, China)

Abstract: In constructed order to overcome the shortcomings of traditional effective rank detection criterion, this paper presented two modified criterions, in which two new objective functions respectively based on the different constraints among three successive eigenvalues. Theoretical analysis shows that the proposed criterions improve the estimation performance. Simulation results present the performance and behaviour at various SNR and different channel conditions, and they show that the modified algorithms require lower SNR about 10 dB than traditional method.

Key words: effective rank detection criterion; channel order estimation; channel blind identification

信道阶数估计是基于循环平稳二阶统计量信道盲辨识的重要环节。现有的典型信道阶数估计方法包括信息论准则和有效秩检测准则方法。其中, 信息论准则包括 AIC^[1] 和 MDL 准则^[2]。基于信息论准则的信道阶数估计方法具有比较严格的约束条件: 数据样本必须是独立同分布的零均值高斯随机变量, 加性噪声是与信道输出信号不相关的高斯白噪声。事实上, 参与信道阶数估计的通信信号和加性噪声很难满足上述两个条件^[3], 使得估计效果较差^[4]。

为了克服信息论准则的缺点, Liavas 等人^[5] 基于数值分析理论, 利用子空间之间范角 (canonical angle) 的概念和不变子空间的扰动定理, 在把过模型协方差矩阵的列空间分解为信号子空间和噪声子空间时, 提出了一种能够获得最大稳定性分解的有效秩检测准则 (Liavas' criterion, LC)。与信息论准则相比, 该准则在中、高信噪比条件下估计精度提高、稳定性好, 但是在信噪比较低和信道条件较差时估计效果都不够理想^[6]。Awan 等人^[7] 对 LC 准则进行了改进, 在一定程度上降低了运算量, 但是估计性能没有改变。

除了上述几种经典估计方法, 还有一些其他算法, 如文献 [8] 采用多时移相关矩阵 (multiple shift correlation matrix) 的迹与其共轭值表示信道冲激响应的首尾值之比, 通过设定门限来判定信道主要部分的有效阶数, 尽管该算法不利用特征值分解, 克服了信道条件的限制, 运算量较小, 但它的估计性能依赖于设定的置信区间。Via 等人^[9] 通过盲辨识与盲均衡算法构

建两个具有不同单调性的代价函数来估计信道的阶数, 算法依赖于具体的信道盲辨识与盲均衡算法, 且需要多次广义特征值分解, 复杂度太高。文献 [10] 采用线性预测盲辨识算法, 通过设定门限来估计信道的阶数, 估计精度受门限值影响较大。刘媛涛等人^[11] 提出了一种新的基于噪声功率的信道阶数估计算法, 它对信噪比和信道条件要求都比较低, 但由于在判定信道阶数时, 间接利用了门限值, 估计性能不稳定。

本文在 LC 准则基础上, 通过分析连续三个特征值之间的约束关系, 重新构造目标函数, 提出两种改进的有效秩检测准则, 提高了在低信噪比和较差信道条件下对信道阶数的估计性能。理论分析和仿真实验结果验证了算法的有效性。

1 系统模型

对单个基带信号来说, 采用分数间隔采样 (即过采样), 或用 M 元天线阵来接收, 可以得到如图 1 所示 SIMO (single input multiple output) 模型。其中, 信道是由发送端脉冲成型滤波器、物理传输信道和接收滤波组成的复合信道, 等效于阶数为 L 的 FIR 滤波器。噪声方差为 σ_v^2 且独立于输入信号。考虑连续 N 个抽样组成的接收序列, 可得到系统的矩阵形式如下:

$$X_n^{(i)} = H_N^{(i)} S_N + V_n^{(i)} \quad 1 \leq i \leq M \quad (1)$$

其中: $X_n^{(i)} = [x_n^{(i)}, x_{n-1}^{(i)}, \dots, x_{n-N+1}^{(i)}]^T$ (2)

$$S_n = [s_n, s_{n-1}, \dots, s_{n-N+1}]^T \quad (3)$$

收稿日期: 2011-02-27; 修回日期: 2011-05-20 基金项目: 河南省基础与前沿基金资助项目 (082300413205)

作者简介: 田营 (1985-), 男, 河南遂平人, 硕士研究生, 主要研究方向为信道盲辨识与盲均衡技术 (ty604235@yahoo.com.cn); 葛临东 (1946-), 男, 安徽怀远人, 教授, 博导, 主要研究方向为软件无线电、通信信号盲处理技术; 王彬 (1971-), 女, 河南郑州人, 讲师, 博士, 主要研究方向为信道盲辨识与盲均衡技术、调制识别技术; 马艳清 (1986-), 男, 安徽亳州人, 参谋, 本科。

$$V_n^{(i)} = [V_n^{(i)}, V_{n-1}^{(i)}, \dots, V_{n-N+1}^{(i)}]^T \quad (4)$$

滤波矩阵 $H = [(H_N^1)^T, (H_N^2)^T, \dots, (H_N^M)^T]^T$ 满足信道可辨识条件,其中:

$$H_N^{(i)} = \begin{bmatrix} h_0^{(i)} & h_1^{(i)} & \dots & h_L^{(i)} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & h_0^{(i)} & h_1^{(i)} & \dots & h_L^{(i)} & \dots & \\ \dots & & & & & & 0 \\ 0 & \dots & 0 & h_0^{(i)} & h_1^{(i)} & \dots & h_L^{(i)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

接收序列 $X_n = [X_n^{(1)T}, X_n^{(2)T}, \dots, X_n^{(M)T}]^T$ 的自相关矩阵 R_{XX} 可表示为

$$R_{XX} = HR_s H^H + R_v \quad (6)$$

其中: R_s 和 R_v 分别为信号和噪声的自相关矩阵。

对 R_{XX} 进行特征值分解,得到按降序排列的 $M \cdot N$ 个特征值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{M \cdot N}$ 。由于 R_s 满秩,因此, $HR_s H^H$ 部分的秩是 $L + N$,由此可得出:

$$\begin{aligned} \lambda_i &> \sigma_v^2 \quad (i = 1, 2, \dots, L + N) \\ \lambda_i &= \sigma_v^2 \quad (i = L + N + 1, \dots, M \cdot N) \end{aligned} \quad (7)$$

其中: σ_v^2 是噪声方差。记 R_{XX} 中较大的 $L + N$ 个特征值对应的特征向量张成信号子空间,剩余特征值对应的特征向量张成噪声子空间。

2 信道冲激响应有效阶数估计

2.1 Liavas 准则

针对信息论准则存在的问题, Liavas 等人基于数值分析的理论提出了一种新的有效秩检测准则。该方法使用两个子空间之间范角的概念和不变子空间的扰动结果,在把过模型自协方差矩阵的列空间分解为信号子空间和噪声子空间时,提出了一个能够获得最大稳定性分解的准则。采用数值分析的方法,用两子空间范角的余弦表征它们之间的欧氏距离,由此可以得到具有相同维数的信号子空间和观测子空间的距离函数:

$$r(q) = \begin{cases} \frac{\lambda_{q+1}}{\lambda_q - 2\lambda_{q+1}} & \text{if } \lambda_{q+1} \leq \frac{\lambda_q}{3} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

通过最优化 $r(q)$ 来确定协方差矩阵秩的大小,进而得到信道阶数的估计值:

$$\hat{L}_{LC} = \arg \min_q \{r(q)\} - N \quad (9)$$

LC 最大的优点是估计性能比较稳定,对数据量的鲁棒性较好,但它对信噪比的要求很高,特别是信道的冲激响应含有较小的不可忽略的头部和拖尾时;另外,由于 LC 需要先求出距离函数 $r(q)$ 的所有值,再通过它的最大值求信号子空间维数 q ,当信道阶数和过采样因子很大时,导致算法的运算量急剧增加。

2.2 改进的信道阶数估计算法

由式(8)变形可得

$$r(q) = \begin{cases} \frac{1}{\frac{\lambda_q}{\lambda_{q+1}} - 2} & \text{if } \frac{\lambda_q}{\lambda_{q+1}} \geq 3 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

使 $r(q)$ 最小,等价于使 λ_q/λ_{q+1} 最大。如果至少存在一个使 $\lambda_q \geq 3\lambda_{q+1}$ 的指标 q ,则秩的估计值可写为^[5]

$$\hat{q} = \arg \max_q \frac{\lambda_q}{\lambda_{q+1}} \quad (11)$$

式(11)间接表明,LC 以相邻特征值之比来检测自协方差矩阵的有效秩,也就是说,LC 基于这样一个事实,在所有相邻特征值之比中,信号子空间的最小特征值与噪声子空间最大的特征值之比是最大的,而两子空间其他相邻特征值之比不会很大,根据这一事实可以确定信号子空间的维数。但是,有些信道的冲激响应含有较小的不可忽略的头部和拖尾,发射信号经过这样的信道后,信号子空间的特征值变化比较剧烈,部分相邻特征值的比值有可能非常大,此时,LC 准则不能把信号子空间与噪声子空间分开,而会错误地把信号子空间的一部分划为噪声子空间。例如,图 2 是信噪比为 30 dB 时,信号通过文献[2]中的信道后,由接收数据自协方差矩阵得到的特征值降序图。该信道的主体部分两边含有较小的头部和尾部,实际阶数是 5,平滑滤波窗口宽度取 10。理论上,自协方差矩阵的有效秩是 15。根据式(11), $\lambda_{15}/\lambda_{16}$ 应该是最大的,但实际上,如图 2 所示, $\lambda_{12}/\lambda_{13}$ 比 $\lambda_{15}/\lambda_{16}$ 还大,此时使用 LC 准则得到的有效秩为 12,信道阶数的估计值为 2,结果是错误的。为此本文提出两种改进算法,以提高对这种信道阶数进行估计时的正确率。

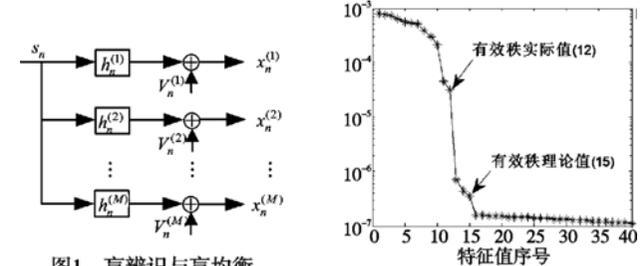


图1 盲辨识与盲均衡的SIMO信道模型

图2 接收信号特征值降序图

2.2.1 改进的信道阶数估计算法 1

理论上,噪声子空间中的特征值是相等的,反映了噪声功率的大小;实际中,由于有限数据效应,它们并不相等,但它们之间差值比较小。根据上述分析,受 LC 准则使用特征值之比以及 NP 算法^[11]使用噪声功率的变化率来估计信道阶数这一思想的启发,本文使用相邻特征值的变化率之比作为新的目标函数来估计信号子空间的有效秩,具体描述如下:

$$r_1(q) = \begin{cases} \frac{\lambda_q - \lambda_{q+1}}{\lambda_{q+1} - \lambda_{q+2}} = \frac{-k(q)}{-k(q+1)} & \lambda_{q+1} \neq \lambda_{q+2} \\ 1 & \lambda_{q+1} = \lambda_{q+2} \end{cases} \quad (12)$$

其中: $k(q) = \lambda_{q+1} - \lambda_q$ 是特征值的一阶前向差分,表示相邻两个特征值的斜率。通过最优化目标函数式(12),可以检测接收数据过模型自协方差矩阵的有效秩为

$$\hat{q} = \arg \max_q r_1(q) = \arg \max_q \frac{\lambda_q - \lambda_{q+1}}{\lambda_{q+1} - \lambda_{q+2}} \quad (13)$$

当 $1 \leq q < L + N$ 时,受信噪比和信道条件的影响,信号子空间相邻特征值之间的变化率可能比较大,但相邻变化率的比值不一定最大;当 $q > L + N$ 时,由于噪声子空间的特征值相差很小,且基本上在同一个数量级,如图 2 所示,它们的变化率基本一致,因此由式(13)得到的 $r_1(q)$ 趋于 1。当 $q = L + N$ 时,式(13)的分子 $\lambda_q - \lambda_{q+1}$ 反映了信号子空间的最小特征值与噪声子空间的最大特征值之间的落差,表示由信号子空间到噪声子空间的过渡,分母 $\lambda_{q+1} - \lambda_{q+2}$ 反映了噪声子空间最大的两个特征值之间的变化率。因为噪声子空间相邻特征值相差很小,所以它们之间的直线斜率趋于零,导致 $r_1(q)$ 在该点取值最大。为避免出现分母等于 0 的情况,对目标函数进行约束,令 $\lambda_{q+1} = \lambda_{q+2}$ 时目标函数 $r_1(q)$ 的值为 1。

因此,可以使用式(13)来估计信号子空间的维数。与 LC 准则不同的是,式(12)使用后续相邻特征值的变化率来约束当前相邻特征值的变化率,不受式(11)中 $\lambda_q \geq 3\lambda_{q+1}$ 的限制,适用范围比较广。

2.2.2 改进的信道阶数估计算法 2

对式(12)中的特征值取对数,可以得到新的目标函数:

$$r_2(q) = \begin{cases} \frac{\log_{10} \lambda_q - \log_{10} \lambda_{q+1}}{\log_{10} \lambda_{q+1} - \log_{10} \lambda_{q+2}} & \lambda_{q+1} \neq \lambda_{q+2} \\ 1 & \lambda_{q+1} = \lambda_{q+2} \end{cases} \quad (14)$$

通过最优优化式(14),也可以检测接收信号过模型自协方差矩阵的有效秩。为便于分析,对上式进行变形可得

$$r_2(q) = \frac{\log_{10} \left(\frac{\lambda_q}{\lambda_{q+1}} \right)}{\log_{10} \left(\frac{\lambda_{q+1}}{\lambda_{q+2}} \right)} = \log_{10} \left[\left(\frac{\lambda_q}{\lambda_{q+1}} \right)^{\frac{1}{\log_{10} \left(\frac{\lambda_{q+1}}{\lambda_{q+2}} \right)}} \right] \quad (15)$$

为避免不必要的对数运算, $r_2(q)$ 可以简化为

$$r_2(q) = \begin{cases} \left(\frac{\lambda_q}{\lambda_{q+1}} \right)^{\frac{1}{\log_{10} \left(\frac{\lambda_{q+1}}{\lambda_{q+2}} \right)}} & \lambda_{q+1} \neq \lambda_{q+2} \\ 1 & \lambda_{q+1} = \lambda_{q+2} \end{cases} \quad (16)$$

改进算法 2 可以解释如下:当 $1 \leq q < L + N$ 时,信号子空间相邻特征值之比可能会比较大,式(16)的指数部分并不是趋近于无穷大的值,使得目标函数值并未达到最大值;当 $q > L + N$ 时,由于相邻两特征值之比趋近于 1,因此,式(16)中的底数部分也趋于 1,使得目标函数值在整体上很小;当 $q = L + N$ 时,式(16)中的底数部分反映了信号子空间的最小特征值与噪声子空间的最大特征值之比。根据上述对 LC 准则的分析,该比值理论上应该是最大的,由于实际中受信噪比和信道条件的影响,该比值有可能不再是最大值,但是式(16)指数部分中的 $\lambda_{q+1}/\lambda_{q+2}$ 表示噪声子空间最大的两个特征值之比,它是大于 1 而又趋近于 1 的值,取对数后是趋近于 0 的正数,再取倒数,使得指数部分趋近于无穷大,用该值来对上述较大的底数部分进行指数约束,可使得目标函数 $r_2(q)$ 的值达到最大值。为避免无意义的运算,对目标函数 $r_2(q)$ 采用与改进算法 1 相同的约束,令 $\lambda_{q+1} = \lambda_{q+2}$ 时目标函数 $r_2(q)$ 的值为 1。

因此,也可以使用式(16)来估计信号子空间的维数,进而求得信道的有效阶数。由式(14)~(16)可以看出,该算法不仅体现了与本文改进算法 1 之间的关系,也体现了与 LC 之间的联系,改进算法 2 既是改进算法 1 中对特征值求对数后的结果,又包含了 LC 使用特征值之比的内在本质。另外,该算法的有效性也不受 $\lambda_q \geq 3\lambda_{q+1}$ 限制,适用范围更广。

在估计信道阶数时,平滑滤波窗口满足 $N \geq L + 1$,因此信号子空间的维数满足 $N < q \leq 2N$ 。为了避免不必要的运算,只需在 $N + 1 \leq q \leq 2N$ 内求取 $r_1(q)$ 和 $r_2(q)$ 即可,这样可以降低算法的运算量。

为方便表达,称本文改进算法 1 为 modified Liavas' criterion 1,记为 MLC1;称改进算法 2 为 modified Liavas' criterion 2,记为 MLC2。它们的实现步骤总结如下:

a) 取平滑滤波窗口 N 大于实际信道的阶数,估计接收信号的自协方差矩阵,并对其进行奇异值分解得到 $\lambda_i (1 \leq i \leq MN)$ 。

b) 在 $N + 1 \leq q \leq 2N$ 范围内,根据式(12)和(16)计算 $r_1(q)$ 和 $r_2(q)$ 。

c) 判断 $r_1(q)$ 和 $r_2(q)$ 取最大值时对应的 q 值,并记为 \hat{q} ,

再使用式(9)得到信道阶数的估计值。

3 仿真结果及性能分析

为了验证本文算法的性能,实验中与 LC 准则进行了比较。实验中输入信号的调制类型为 16QAM,数据量分别取 $T_1 = 200$ 、 $T_2 = 1\ 000$ 和 $T_3 = 2\ 000$,信道来自文献[12,13],记为信道 1 和信道 2,其幅度响应分别如图 3(a) 和(b) 所示,它们的信道阶数 L 分别是 4 和 5,过采样因子 M 都是 4。实验结果均为 100 次蒙特卡罗仿真之后的平均值。

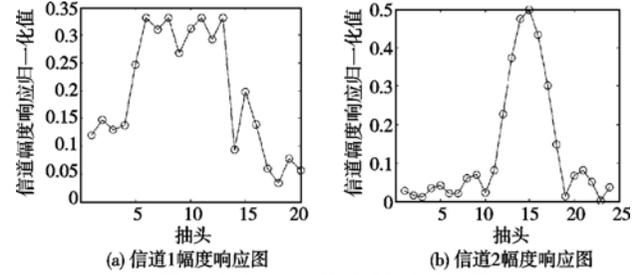


图3 实验用信道的时域幅度响应图

图 3(a) 所示信道 1 的时域幅度响应变化比较缓慢,相对大小差别不是很严重,对信道阶数的估计来说,信道质量比较好;图 3(b) 所示信道 2 时域幅度响应中含有较小的首部和尾部,幅度衰落较大,信道质量不好,给阶数的正确识别带来一定的难度。

实验 1 LC 及改进算法对信道 1 阶数的识别情况

图 4 给出了三种算法对信道 1 阶数的估计结果,(a) 是算法的识别率随信噪比变化的曲线图,(b) 是算法对信道阶数的平均估计值随信噪比变化的曲线图。

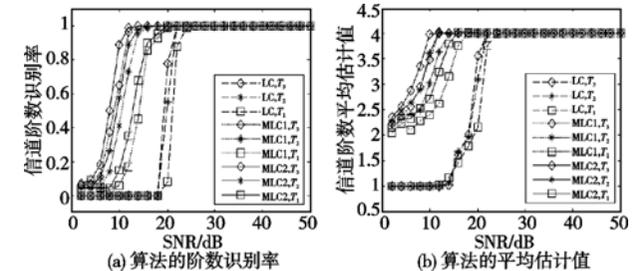


图4 LC及两种改进算法对信道1阶数识别结果

观察图 4(a) 可知,在相同条件下,与 LC 准则相比,本文改进算法对信噪比的要求明显较低,特别地,MLC2 比 MLC1 对信噪比的要求更低,但不是很明显;另外,LC 准则对数据量的变化具有较好的鲁棒性,而增加数据量可以提高改进算法对信道阶数的识别率,降低对信噪比的要求。图 4(b) 显示,这三种算法都不会出现过估计的现象,但随着信噪比的降低,算法对信道阶数欠估计比较严重,从而导致图 4(a) 中算法识别率的下降。

实验 2 LC 及改进算法对信道 2 阶数的识别情况

图 5 给出了三种算法对信道 2 阶数的估计结果,(a) 是算法识别率随信噪比变化的曲线图,(b) 是算法对信道阶数的平均估计值随信噪比变化的曲线图。图中对算法及数据条件的标志与实验 1 相同。

观察可得,图 5 与图 4 的结论基本相同。观察图 5(a) 可知,由于信道 2 的条件不如信道 1,LC 准则对其阶数的识别率达到 100% 时对信噪比的最低要求高达 48 dB,这在实际应用中是毫无意义的;而本文改进算法对信噪比的要求比 LC 准则低很多,MLC2 比 MLC1 的估计优势更加明显。观察图 5(b) 可

知,三种算法在较大信噪比范围内得到的信道阶数平均估计值都是 2,这是信道 2 主体部分的阶数,图中结果说明信噪比较低时,噪声对接收信号的影响淹没了信道较小冲激响应对发射信号的作用,使得对信道阶数的估计更加困难,算法仅能估计出信道主体部分的阶数,在对信道进行盲辨识时,如果信道较小冲激响应对发射信号的作用不可忽略时,该估计结果无效。

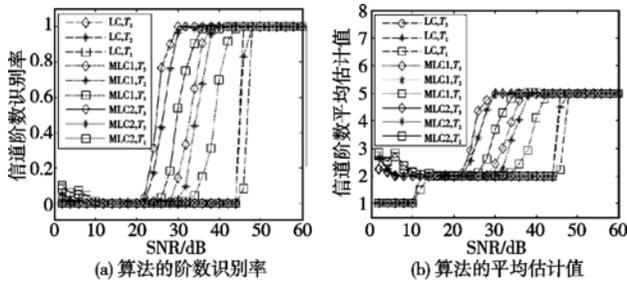


图5 Lc及两种改进算法对信道2阶数识别结果

比较图 4 和 5 可知,由于信道 1 比信道 2 的条件要好,所以同一算法对信道 1 的信噪比要求比较低,对信道 2 的信噪比要求却比较高;另外,对信道 1 进行阶数估计时,本文两种算法的识别率曲线相差不大,对信道 2 进行阶数估计时,MLC2 明显优于 MLC1,这说明在信道条件比较差时,MLC2 估计信道阶数的优势更加明显。

由上述实验结果及性能分析可以得到如下结论:尽管 LC 准则性能比较稳定,对数据量的变化具有较好的鲁棒性,但它对信噪比的要求比较高,实际应用中受到限制;MLC1 获得了比 LC 准则较好的估计性能,对信噪比要求比较低,性能也很稳定,当信道冲激响应含有较小的头部和拖尾时,MLC1 对信噪比和数据量的要求相应增高;而 MLC2 获得了比 LC 准则和 MLC1 算法更好的估计性能,对信噪比的要求最低,性能也很稳定,特别是当信道含有较小冲激响应值时,比 MLC1 对信噪比的要求还低,优越性也更明显,适用范围更广。

4 结束语

本文针对 LC 准则对信噪比和信道条件要求比较高这一问题,在 LC 准则基础上提出了两种改进的有效秩检测准则,两种改进的准则分别采用相邻三个特征值之间不同的约束关系构建了新的目标函数,通过对目标函数最优化来估计自协方差矩阵的有效秩,进而估计信道的有效阶数。它们在保持较好稳定性的前提下,降低了算法对信道和信噪比的要求;同时限定了自变量的取值范围,避免了不必要的运算。通过仿真实验验证了两种改进准则的有效性,比较了它们对信道阶数的估计

性能。它们的估计性能明显优于 LC 准则,更重要的是 MLC2 比 MLC1 对信噪比和信道的要求最低,应用范围更广。

参考文献:

- [1] AKAIKE H. A new look at the statistical model identification [J]. *IEEE Trans on Automat Control*, 1974, 19(6): 716-723.
- [2] RISSANEN J. A universal prior for integers and estimation by minimum description length [J]. *Annals of Statistics*, 1983, 11(2): 416-431.
- [3] HAYKIN S. 自适应滤波器原理 [M]. 4 版, 郑宝玉, 译. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [4] LIAVAS A P, REGALIA P A. On the behavior of information theoretic criteria for model order selection [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2001, 49(8): 1689-1695.
- [5] LIAVAS A P, REGALIA P A, DELMAS J. Blind channel approximation: effective channel order determination [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1999, 47(12): 3336-3344.
- [6] GERSTACKER W H, TAYLOR D P. Blind channel order estimation based on second-order statistics [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2003, 10(2): 39-42.
- [7] AWAN M K, AFTAB M F, ZEE Shan. Channel order estimation in cyclostationarity based blind channel equalization [C]//Proc of the 9th International Multitopic Conference. 2005: 1-6.
- [8] UENG F B, YU S J. Blind equalization based on effective channel order determination for multiple FIR channels [C]//Proc of the 5th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. 2004: 382-385.
- [9] VIA J, SANTAMARIA I, PEREZ J. Effective channel order estimation based on combined identification/equalization [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2006, 54(9): 3518-3526.
- [10] GREEN P J, TAYLOR D P. Dynamic channel-order estimation algorithm [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2006, 54(5): 1922-1923.
- [11] 刘媛涛, 葛临东, 王彬. 一种基于噪声功率的信道有效阶数盲估计算法 [J]. *计算机工程*, 2008, 34(9): 133-135.
- [12] TONG L, XU Guang-han, KAILATH T. Blind identification and equalization based on second-order statistics; a time-domain approach [J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 1994, 40(2): 340-349.
- [13] MOULINES E, DUHAMEL P, CARDOSO J, et al. Subspace methods for the blind identification of multichannel FIR filters [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 1995, 43(2): 516-525.

(上接第 66 页)

- [9] 张天平, 刘友金, 苏选良. 基于模糊层次分析法的 ERP 系统柔性测度分析 [J]. *中国软科学*, 2010(7): 165-174.
- [10] 李春好, 孙永河. ANP 内部循环依存递阶系统的方案排序新方法 [J]. *管理科学学报*, 2008, 11(6): 25-34.
- [11] SAATY T L. *The analytic network process: decision making with dependence and feedback* [M]. Pittsburgh: RWS Publications, 2001.
- [12] SAATY T L. *Theory and applications of the analytic network process: decision making with benefits, opportunities, costs, and risks* [M]. Pittsburgh: RWS Publications, 2005.
- [13] 李春好, 孙永河, 段万春. 基于 DEA 理论的 ANP/BOCR 方案评价价值综合集成新方法 [J]. *中国管理科学*, 2010, 18(2): 55-61.
- [14] Chang Da-yong. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP [J]. *European Journal of Operational Research*, 1996, 95

- (3): 649-655.
- [15] XU Ruo-ning. Fuzzy least-squares priority method in the analytic hierarchy process [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 112(3): 359-404.
- [16] CSUTORA R, BUCKLEY J J. Fuzzy hierarchical analysis: the Lambda-max method [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 120(2): 181-195.
- [17] MIKHAILOV L. Deriving priorities from fuzzy pairwise comparison judgements [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2003, 134(3): 365-385.
- [18] WANG Ying-ming, ELHAG T M S, HUA Zhong-sheng. A modified fuzzy logarithmic least squares method for fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, 157(23): 3055-3071.