

基于Kalman滤波的MIMO时变信道估计

李林海, 于宏毅, 胡捍英

(信息工程大学信息工程学院, 郑州 450002)

摘要: 研究了一种基于 Kalman 滤波的 MIMO 时变信道估计与跟踪问题。利用衰落信道功率谱统计特性的先验信息, 将信道冲击响应近似为一个低阶自回归滑动平均过程, 通过信道传输函数逼近信道功率谱的幅频特性, 建立时变衰落单径信道的状态方程, 导出 MIMO 信道状态模型参数, 并通过 Kalman 滤波跟踪信道的时变特性。理论分析和仿真试验表明, 该算法在时变信道下具有较好的性能, 和传统信道估计方法相比, 接收机性能有了较大的改进。

关键词: 时变信道; 卡尔曼滤波; 信道估计

MIMO Time-varying Channel Estimation Based on Kalman Filtering

LI Lin-hai, YU Hong-yi, HU Han-ying

(College of Communication Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450002)

【Abstract】 This paper proposes a novel algorithm which uses the Kalman filtering based on Clarke's model to track the Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) time-varying multi-path fading channel. The channel transport function approximates the square root of the spectrum density, and a state-space model for the fading channel can be built based on the channel transport function. Combining the prior information of the time-varying fading channel power spectral density, MIMO channel state-space model can be obtained. Theoretical analysis and simulations show the algorithm is effective for the estimation of the fading channel when the performance of the channel estimation is presented in terms of the Mean-Square Error(MSE).

【Key words】 time-varying channel; Kalman filtering; channel estimation

1 概述

多输入多输出(MIMO)通信系统与单天线通信系统相比, 信道容量和频谱利用率呈线性增加的趋势, 它已成为新一代移动通信技术的主要研究方向, 然而仍有大量空时信号处理问题需要解决, 尤其当遇到MIMO时变信道时, 信道跟踪问题就显得更为复杂。为了获得良好的接收性能, 这就要求信道估计器完成时变衰落信道的有效跟踪。叠加于信息序列之上的隐训练序列信道估计方法^[1-2]受到了关注。训练序列不再占用专门的时隙, 没有传输速率的损失, 从而有效地提高了频带利用率。文献[1]在发送端叠加周期大于信道阶数的隐训练序列, 利用接收信号的循环平稳特性, 通过均值运算得到信道估计值, 然而该方法只适用于接收信息序列均值为零的情况。在隐训练序列^[1-2]的基础上, 本文提出一种基于卡尔曼滤波的隐训练序列信道估计方法, 在没有带宽损失的情况下跟踪估计信道参数。文献[3]使用高阶统计量估计出信道模型参数后, 通过卡尔曼滤波算法跟踪信道的时变特性。文献[4]提出了一种适合于FIR信道估计的周期导频方案, 把信道建模为一阶统计模型后进行信道估计。文献[3-4]跟踪信道所用模型, 没有考虑信道功率谱的先验信息。而对基于衰落信道功率谱特性先验信息的时变信道跟踪的研究较少。在文献[5-8]的基础上, 本文根据Clarke模型功率谱逼近的传递函数 $H(z)$, 按照状态空间分析法, 由传递函数推导出时变信道的状态方程, 从而导出MIMO信道的状态模型参数, 通过卡尔曼滤波(KF)算法跟踪信道的时变特性。

2 系统模型

考虑一个有 M 个发射天线和 N 个接收天线的 MIMO 无

线通信系统。第 i 个发射天线上的信息序列为 $u_i(k)$, 假设 $u_i(k)$ 为零均值。在第 i 个发射天线上, 训练序列 $c_i(k)$ 被同步叠加于信息序列, 从而得到发射序列 $s_i(k) = u_i(k) + c_i(k)$, 假设训练序列与信息序列是不相关的。从第 i 个发射天线到第 j 个接收天线之间的信道可以被建模为一个 ARMA 滤波器 $h_{ji} = [h(0), h(1), \dots, h(L-1)]^T$, 其中, L 为信道最大阶数, 则第 j 个接收天线上的等效基带接收信号为

$$r_j(k) = \sum_{i=1}^M \sum_{l=0}^{L-1} h_{ji}^l(k) s_i(k-l) + v_j(k) \quad (1)$$

其中, $v_j(k)$ 为加性高斯白噪声。

$$\begin{aligned} r(k) &= [r_1(k) \ r_2(k) \ \dots \ r_N(k)]^T \\ s(k) &= [s_1(k) I_N \ \dots \ s_M(k) I_N \ \dots \ s_1(k-L+1) I_N \ \dots \ s_M(k-L+1) I_N] \\ h(k) &= [h_{11}^0(k) \ \dots \ h_{1N}^0(k) \ \dots \ h_{M1}^0(k) \ \dots \ h_{MN}^0(k) \ \dots \ h_{11}^{L-1}(k) \ \dots \\ &\quad h_{1N}^{L-1}(k) \ \dots \ h_{M1}^{L-1}(k) \ \dots \ h_{MN}^{L-1}(k)]^T \\ v(k) &= [v_1(k) \ v_2(k) \ \dots \ v_N(k)]^T \end{aligned}$$

则

$$r(k) = x(k) \cdot h(k) + v(k) \quad (2)$$

时变衰落系数 $h_{ji}(k)$ 为复随机过程, 并假设随机衰落过程是白稳态过程, 它的随机特性完全由均值和协方差确定。同时 MNL 个衰落过程相互统计独立, 互不相关。随机过程 $h_{ji}(k)$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60472064); 河南省自然科学基金资助项目(0511010700)

作者简介: 李林海(1977-), 男, 博士研究生, 主研方向: 协作通信, 移动通信中的信道估计; 于宏毅、胡捍英, 教授、博士生导师

收稿日期: 2007-05-28 **E-mail:** cj_llh@163.com

的时间自相关特性由最大多普勒频移 f_D 决定^[5], 即

$$R(\tau) = E\{h_{ji}(k)h_{ji}^*(k-\tau)\} \sim J_0(2\pi f_D \tau) \quad (3)$$

其中, $J_0(\cdot)$ 是第一类零阶贝塞尔函数。对每个信道抽头都有一个多普勒谱来描述其系数随时间的变化, 即

$$S_{h_{ji}h_{ji}}(f) = \begin{cases} \frac{1}{\pi f_D} \frac{1}{\sqrt{1-(\frac{f}{f_D})^2}} & |f| < f_D \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

每对收发天线之间的信道抽头系数像上述 $h_{ji}(k)$ 一样, 是零均值复高斯随机过程, 时间自相关如式(3)所示。

3 ARMA 滤波器设计

本文采用IIR滤波器来近似式(4)中幅频响应的平方根, 或将式(4)转化为离散频率逼近其谱的平方根^[5]。将滤波器级联来设计 $2K$ 阶IIR滤波器。采用迭代优化程序即椭圆算法来确定最佳实系数 $a_k, b_k, c_k, d_k, k=1, 2, \dots, K$ 和标量因子 A , 滤波器的幅度响应为

$$H(z) = A \prod_{k=1}^K \frac{1 + a_k z^{-1} + b_k z^{-2}}{1 + c_k z^{-1} + d_k z^{-2}} \quad (5)$$

获得传递函数 $H(z)$ 后, 就可以按照状态空间分析法, 由传递函数推导状态方程, 从而导出 $h_{ji}(k)$ 的状态模型。由于二阶ARMA模型能较好地模拟信道的动态特性^[7], 因此本文在仿真过程中将MIMO信道参数建模为多个二阶ARMA过程。每个信道抽头系数变化快慢是由多普勒速率, 即 M 个发射天线与 N 个接收天线间的相对速度所决定的, 假定每个信道抽头的多普勒速率都相等。

4 隐训练序列 MIMO 信道估计

以附带隐训练序列的多径 MIMO 接收信号为例, 其中每一条可分离多径的衰落过程在时域和频域分别服从式(3)和式(4), 其近似的信道传输函数如式(5)所示, 考虑第 l 个强径分支。将训练序列作为信道滤波器的输入, 接收端受衰落信道影响的隐训练序列 $r_{ji,c}^l(k)$ 为

$$r_{ji,c}^l(k) = \sqrt{\varepsilon_p} c_i(k) h_{ji}^l(k) + v_{ji,l}(k), l=1, 2, \dots, L \quad (6)$$

其中, $c_i(k)$ 和 ε_p 分别是发送的隐训练周期符号序列和其发送功率; $h_{ji}^l(k)$ 是第 i 个发射天线到第 j 个接收天线之间信道的第 l 径信道参数; $v_{ji,l}(k)$ 是方差为 σ_n^2 的复加性高斯白噪声(AWGN), 由此得到符号区间信道参数的瞬时估计值为

$$\hat{h}_{ji}^l(k) = \frac{r_{ji,c}^l(k)}{c_i(k)\sqrt{\varepsilon_p}} = h_{ji}^l(k) + \frac{v_{ji,l}(k)}{c_i(k)\sqrt{\varepsilon_p}}, l=1, 2, \dots, L \quad (7)$$

由上式可见, 瞬时信道参数估计中含有噪声分量。为了得到统计意义上更好的信道估计, 一般可以采用信道估计处理器, 对瞬时估计进行进一步处理。本文根据近似逼近的信道传输函数, 推导衰落信道的状态方程, 对式(7)中获得的含噪声成分的瞬时信道参数作为观测量, 运用 Kalman 滤波有效跟踪信道参数的变化特性。

考虑传输函数阶数等于 2 的情况, 把离散 MIMO 信道参数表示成矢量形式, 信道的状态方程和观测模型为

$$\mathbf{h}(k) = \mathbf{D}\mathbf{h}(k-1) + \mathbf{w}(k) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{h}(k) = [\mathbf{h}^T(k) \mathbf{h}^T(k+1)]^T$ 为系统状态矢量, 即为 k 时刻的信道状态矢量; $\mathbf{w}(k)$ 为系统噪声矢量; $\mathbf{D}(k, k-1)$, $\mathbf{B}(k-1)$ 为系数矩阵。系数矩阵由式(5)中传递函数 $H(z)$ 的系数决定。

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} I_{MNL} & 0 \\ -d_1 \cdot I_{MNL} & -c_1 \cdot I_{MNL} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{v}(k) \quad (9)$$

$$\text{式(9)中, } \mathbf{C} = [A_0(b_1 - d_1)I_{MNL} \quad A_0(a_1 - c_1)I_{MNL}]$$

观测噪声矢量为

$$\mathbf{v}(k) = \mathbf{Z}(k) - \mathbf{C}(k)\mathbf{x}(k|k-1) \quad (10)$$

根据上面估计模型可知, 由状态的预测估计值和当前一步的观测值 $\mathbf{v}(k)$ (即去掉导频符号后叠加噪声的信道信息)两者来确定当前的状态估计值, 递推出的状态估计值 $\hat{\mathbf{x}}(k|k)$ 即为信道对发送序列的影响。

卡尔曼滤波算法如下:

$$\hat{\mathbf{x}}[k|k-1] = \mathbf{D}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}[k-1|k-1]$$

$$\hat{\mathbf{x}}[k|k] = \mathbf{D}(k, k-1)\hat{\mathbf{x}}[k-1|k-1] + \mathbf{K}(k)\mathbf{v}(k)$$

$$\mathbf{P}(k|k-1) = \mathbf{D}(k, k-1)\mathbf{P}(k-1|k-1)\mathbf{D}^T(k, k-1) +$$

$$\mathbf{B}(k-1)\mathbf{Q}(k-1)\mathbf{B}^T(k-1)$$

$$\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{C}^T(k)[\mathbf{C}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{C}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1}$$

$$\mathbf{P}(k|k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k)\mathbf{C}(k)]\mathbf{P}(k|k-1)$$

其中, $\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)$ 为 $\mathbf{x}(k)$ 的预测估计; $\mathbf{P}(k|k-1)$ 为预测误差方差阵; $\mathbf{K}(k)$ 为增益矩阵; $\mathbf{P}(k|k)$ 为滤波误差方差阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; $\mathbf{R} = \sigma^2 \mathbf{I}$ 为 $\mathbf{w}(k)$ 的方差阵; $\mathbf{Q}(k-1)$ 为 $\mathbf{v}(k-1)$ 的方差阵。

第 k 时刻的信道估计值为 $\hat{\mathbf{h}}(k) = [I_{MNL}, 0]\hat{\mathbf{h}}[k|k]$, 基于卡尔曼滤波的信道估计器输出的估计值与真实信道参数之间的均方误差是衡量其性能的一个指标, 为

$$MSE_k = \frac{1}{MNL} E\{[\hat{\mathbf{h}}(k) - \mathbf{h}(k)]^2\} \quad (11)$$

5 仿真研究与结果分析

对本文提出的基于卡尔曼滤波的 MIMO 信道跟踪算法进行数据仿真。无线信道为瑞利衰落型加高斯白噪声, 其参数根据 Clark 模型产生, 实验环境是一个 2 发 2 收的 MIMO 通信系统, 发射端到接收天线之间的信道阶数均为 2。信息序列采用 QPSK 调制方式。训练序列叠加在信息序列之上, 是与信息序列不相关的高斯分布复随机序列。考察了在信噪比变化过程中, 算法对 MIMO 时变信道的跟踪性能, 用归一化均方误差(NMSE)作为衡量信道跟踪有效性的依据。仿真中假设接收机已获得了精确的码片、比特和帧同步。

本文方法与文献[9]的算法进行了比较, 同时还对比了专门分配一段时隙给训练序列的传统信道估计算法。仿真时发现, 卡尔曼滤波迭代次数超过 2 以后, 增益系数增加很小; 迭代次数超过 6 次, 增益系数基本保持不变, 最佳估计对应的误差协方差也保持不变。

图 1 比较了基于 Kalman 滤波的信道估计方法在不同 $f_D T$ 时, 收发终端之间的相对移动产生不同多普勒频移, 反映 Kalman 滤波跟踪信道的变化特性。在不同 $f_D T$ 时, 基于 Kalman 滤波均能很好地跟踪信道的变化特性, 对不同的多普勒频移 200 Hz 和 100 Hz, 分别对应移动速度为 108 km/h 和 50 km/h。其几乎获得相同的均方误差(均方误差为 3 000 个突发的统计值)。这种信道跟踪算法在高速移动环境下仍然具有较小的均方差。图 2 是在多普勒频移分别为 100 Hz 和 200 Hz 时, 基于卡尔曼滤波信道估计和传统信道估计方法在不同信噪比下的均方差。由算法仿真结果可知, 基于卡尔曼滤波的信道估计方法较传统信道估计方法对信道时变特性的跟踪更准确。图 3 是在多普勒频移分别为 50 Hz, 100 Hz, 200 Hz 时, 基于卡尔曼滤波信道估计方法在不同信噪比下的误码率。同时比较了在不同多普勒频移环境下两种信道估计方法的系统

误码率。从图 3 可以看出,在不同多普勒频移下,基于卡尔曼滤波的信道估计算法对系统性能改进很明显。即使在较高多普勒频移环境下,仍能获得较好的误码率性能。

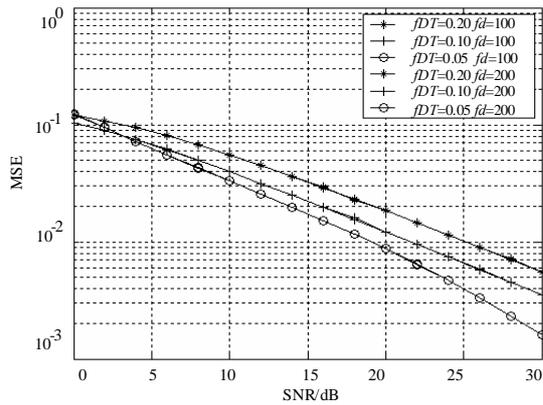


图 1 基于卡尔曼滤波信道估计算法在不同多普勒频移时的均方差

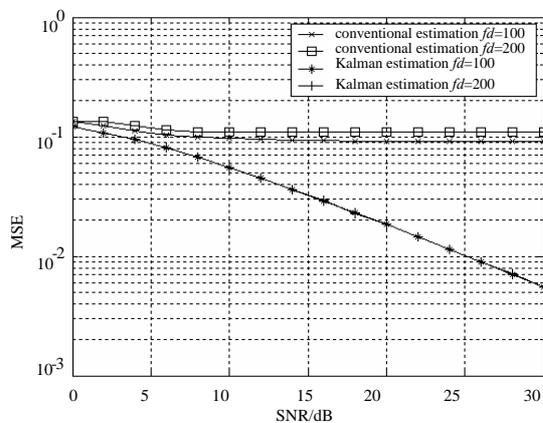


图 2 卡尔曼滤波信道估计和传统信道估计的均方差

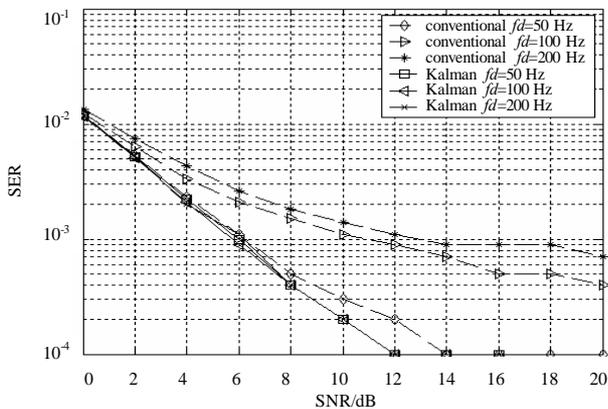


图 3 卡尔曼滤波信道估计和传统信道估计的误码率

本文提出了基于卡尔曼滤波 MIMO 信道跟踪时变信道的方法,在信道传输函数的建立时,由于充分利用了时变信道功率谱统计特性的先验信息,使得信道模型能更准确地反映信道的时变特性,在用卡尔曼滤波的方法来跟踪信道时,在均方误差和系统误码率性能方面都有较大改进。

6 结束语

针对 MIMO 时变衰落信道,本文利用 Clarke 模型功率谱的先验信息,将 MIMO 时变频率选择性信道建模为一个 ARMA 过程,推导出了信道的状态方程,接着利用 kalman 滤波器来跟踪信道的时变特性。它充分利用已获得的信息,由于不需要给隐训练序列专门分配时隙,因此该算法可以在没有带宽损失的情况下可以很好地估计出信道参数。

参考文献

- [1] Orozcolugo A G, Lara M M, McLernon D C. Channel Estimation Using Implicit Training[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2004, 52(1): 240-254.
- [2] Tugnait J K. MIMO Channel Estimation Using Super-imposed Training[C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications. Santa Clara, UA, USA: [s. n.], 2004.
- [3] Tsatsanis M K, Giannakis G B, Zhou G. Estimation and Equalization of Fading Channels with Random Coefficients[J]. Signal Processing, 1996, 53(2): 211-229.
- [4] Zhou G T, Viberg M. A First-order Statistical Method for Channel Estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(3): 57-60.
- [5] Komninakis C. A Fast and Accurate Rayleigh Fading Simulator[C]//Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference. Lodon: IEEE Globecom Press, 2003.
- [6] Steiglitz K. Computer-aided Design of Recursive Digital Filter[M]. [S. l.]: IEEE Press, 1972: 143-149.
- [7] Komninakis C, Fragouli C. Multi-input Multi-output Fading Channel Tracking and Equalization Using Kalman Estimation[J]. IEEE Trans. on Signal Processing, 2002, 50(5): 1065-1076.
- [8] Jun T, Luxi Y. A First-order Statistical Method for Time-variant MIMO Channel Estimation[C]//Proc. of the 5th IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications. Calgary, Canada: [s. n.], 2004.
- [9] Gong Yanfei. MIMO Channel Tracking Based on Kalman Filter and MMSE-DFE[C]//Proceedings of Communications, Circuits and Systems. Kobe, Japan: [s. n.], 2005.

(上接第 13 页)

员欺骗和管理者欺骗,并且成员子密钥可以重用,在新增成员和共享密钥时具有良好的扩展性,其实现性能优于目前已有的方案。

参考文献

- [1] Shamir A. How to Share a Secret[J]. Communications of the ACM, 1979, 22(11): 612-613.
- [2] Blakley G R. Safeguarding Cryptographic Keys[C]//Proceedings of American Federation of Information Processing Societes Conference. Montvale, NJ: AFIPS Press, 1979: 313-317.

- [3] Harn L. Efficient Sharing(Broadcasting) of Multiple Secrets[J]. IEE Computers and Digital Techniques, 1995, 142(3): 237-240.
- [4] Chen Liqun, Gollmann D, Mitchell C J, et al. Secret Sharing with Reusable Polynomials[C]//Proceedings of the 2nd Australasian Conference on Information Security and Privacy. Canberra, Australia: [s. n.], 1997: 183-193.
- [5] Shi Ronghua. A Multisecret Sharing Authenticating Scheme[J]. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(5): 552-556.
- [6] Wang Guilin. Analysis and Improvement of a Multisecret Sharing Authenticating Shceme[J]. Journal of Software, 2006, 17(7): 1623.

