

MIMO-OFDM 系统的盲信道估计算法综述

张 玲¹, 张贤达²

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266100; 2. 清华大学自动化系, 北京 100084)

摘 要: 本文首先介绍了 MIMO-OFDM 系统模型, 然后讨论了研究 MIMO-OFDM 移动通信系统信道估计的意义. 紧接着对 MIMO-OFDM 系统目前存在的几种典型盲信道估计算法进行分析和讨论. 最后总结和展望了 MIMO-OFDM 系统信道估计算法的研究方向和关键问题.

关键词: 移动通信; 信道估计; MIMO; OFDM

中图分类号: TN911. 23 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 6A-001-06

An Overview of Blind Channel Estimation Algorithms for MIMO-OFDM Systems

ZHANG Ling¹, ZHANG Xian-da²

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China;
2. Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The system model of MIMO-OFDM system is introduced at the beginning of the paper, and then the significance of channel estimation for MIMO-OFDM wireless systems is analyzed. Further, some typical blind channel estimation algorithms are discussed and analyzed. Finally, the research direction and some key problems about channel estimation of MIMO-OFDM systems are summarized in this paper.

Key words: mobile communication; channel estimation; MIMO; OFDM

1 引言

作为第四代移动通信系统(4G)的关键技术之一, MIMO-OFDM 技术正成为通信信号处理领域的研究热点. MIMO-OFDM 技术将空间分集、频率分集以及时间分集有机地结合在一起, 可以大大提高无线通信中的信道容量和传输速率, 并能有效抵抗衰落、抑制干扰和噪声. 在实际应用中, 为了进一步提高系统的频谱效率, MIMO-OFDM 系统通常采用幅度非恒定的调制方式, 例如 16QAM 等, 在这种情况下, 接收端需要信道状态信息(CSI)才能进行相干解调. 另外, 空时编码的译码也需要有精确的信道状态信息才能完成. 因此, 信道估计是 MIMO-OFDM 系统接收机设计的一项主要任务.

有关 OFDM 系统的信道估计已有较多的研究, 通常可以分为基于导频符号的方法^[1-4](包括利用训练序列的方法^[5-7])、决策反馈的方法和盲估计方法三类. 研究表明, 上述这些算法大多在 OFDM 系统中取得较好的性能, 但很多并不适用于 MIMO-OFDM 系统的情况, 因为

MIMO-OFDM 系统采用多个发射接收天线, 其接收信号是多个发射天线发送信号的衰落与加性噪声的叠加. 若采用上述算法估计信道, 对于某个特定的发射接收天线对, 来自于其他天线的信号即为干扰, 信号噪声功率比常常在 0dB 以下, 从而带来很大的估计误差, 导致系统性能急剧下降. 因此, MIMO-OFDM 系统中的信道估计是一个充满挑战且极具意义的研究领域.

非盲的信道估计方法需要训练序列或导频符号, 这必然占用一定的有效带宽, 从而使系统的传输效率降低. 为了解决这些问题, 研究信道估计的盲算法最富有吸引力. 盲信道估计方法不需要训练序列, 可利用的只有接收信号及其统计特性和发射信号的一些性质. 重要的是盲信道估计方法能够自适应地跟踪信道的动态变化. 因此, 盲信道估计方法有很多的优点是其他一些估计方法所不能满足的.

基于以上因素, 现在更多的研究学者和团体都在重视 MIMO-OFDM 系统的盲信道估计算法的研究. 目前这一领域的工作还不够完善和深入, 还有诸多待解决的问

收稿日期: 2007-06-11; 修回日期: 2007-10-29

基金项目: 国家自然科学基金重大项目“未来移动通信系统关键理论与技术研究”(No. 60496311)

题.本文的主要工作是对目前 MIMO-OFDM 系统的几种典型的盲信道估计算法进行分析和讨论,同时对信道估计方面的关键技术和待研究的问题进行总结和展望.

2 MIMO-OFDM 系统模型

2.1 MIMO 系统简介

MIMO(多人多出)系统最大的优点是能够在多径传输环境中提高系统容量,从而大大提高通信系统的性能.早在 70 年代就有人提出将 MIMO 技术用于通信系统,但对移动通信系统中 MIMO 技术产生巨大推动的奠基工作是在 90 年代由 AT&T Bell 实验室的学者完成的^[8-11].MIMO 可以成倍地提高衰落信道下的信道容量.根据信息论的知识^[9],假定发送天线数为 N_t ,接收天线数为 N_r ,在每个天线发送信号能够被分离的情况下,有如下信道容量公式:

$$C = N_t \log_2(N_r/N_t \cdot \text{SNR}) \quad N_r \geq N_t$$

其中,SNR 是每个接收天线的信噪比.根据这个公式,对于采用多天线阵列发送和接收的系统,在理想情况下信道容量将随 N_t 线性增加,从而大大提高了信道容量.其系统原理框图如图 1 所示^[12].

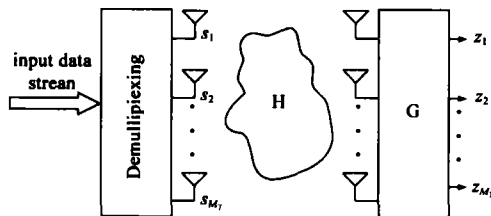


图 1 MIMO 系统原理图

MIMO 技术是一种通过多天线的配置充分利用信号的空间资源,有效提高衰落信道信道容量的方法.其主要目的是在多径散射分量比较丰富的环境中,使用多天线来提供空间分集,以对抗信号的衰落.

2.2 OFDM 基本信号模型^[13]

一个简单的 OFDM 发射机如图 2 所示:

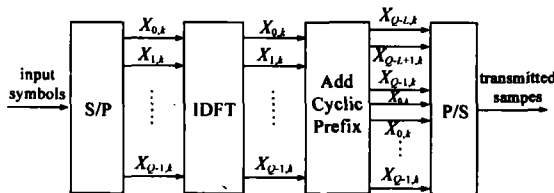


图 2

OFDM 系统的频域模型为:

$$Y_k[i] = X_k[i] H_k[i] + N_k[i], k = 0, \dots, Q-1 \quad (1)$$

2.3 MIMO-OFDM 系统的信号模型^[12,14]

OFDM 能将频率选择性衰落信道转化为若干平坦衰落子信道,在平坦衰落信道中引入空时编码技术,能

够大幅度地提高无线通信系统的信道容量和传输速率,并能有效的抵抗衰落、抑制噪声和干扰,因此将空时编码与 OFDM 相结合,构成 MIMO-OFDM 系统在未来的移动通信中具有非常广阔的发展前景.

假设一个 MIMO-OFDM 系统采用 N 根发射天线、 M 根接收天线,采用 K 个子载波调制,信道为频率和时间选择性衰落信道.每个空时码(STC)码词包含 P 个连续的 OFDM 码字,每个 OFDM 码字包含 NK 个 STC 符号.假设信道在一个 OFDM 码字内保持不变(一个时隙内),仅在码字间变化,且不同发射-接收天线对之间衰落过程是不相关的.接收端经过匹配滤波、采样和 DFT 后,接收信号为

$$y[p, k] = H[p, k]x[p, k] + z[p, k] \quad p = 1, \dots, P; k = 0, \dots, K-1 \quad (2)$$

其中 $H[p, k] \in C^{M \times N}$ 为第 p 个时隙、第 k 个子载波的复信道频率响应矩阵, $x[p, k] \in C^N$ 和 $y[p, k] \in C^M$ 和分别表示第 p 个时隙、第 k 个子载波的发射信号和接收信号, $z[p, k] \in C^M$ 为复高斯白噪声.

3 盲信道估计方法

本节的主要工作是对目前 MIMO-OFDM 系统的几种典型的盲信道估计算法进行综述.同时对各种估计方法存在的问题进行分析和讨论,从而明确未来需要研究和解决的问题.

3.1 子空间方法

子空间算法用于 MIMO-OFDM 系统的信道估计在近几年开始受到广泛的关注,发表了一些重要的成果^[15-20].本节对子空间跟踪这一重要的方法进行讨论,分析该方法的理论、特性及其应用.

文献[19]给出了基于子空间的 MIMO-OFDM 系统的盲信道估计算法.考虑一个有 n_T 根发射天线, n_R 根接收天线的系统.总的子载波个数(FFT 点数)是 K .则有如下接收信号模型

$$Y(i) = HS(i) + V(i) \quad (3)$$

其中, H 是 MIMO 信道频率响应, $V(i)$ 是经过 DFT 后的 AWGN 噪声向量.

考虑频域的 M 个发送的数据块 $S_i = [S^T(i), S^T(i-1), \dots, S^T(i-M+1)]^T$, 时域表示为 $X_i = [X^T(i), X^T(i-1), \dots, X^T(i-M+1)]^T$. 定义 $\tilde{W} = I_M \otimes \tilde{W}$, 则

$$X_i = \tilde{W}S_i \quad (4)$$

则

$$r_i = \tilde{H}X_i + n_i = \tilde{H}\tilde{W}S_i + n_i = AS_i + n_i \quad (5)$$

其中 \tilde{H} 的定义见文献[19], $A = \tilde{H}\tilde{W}$, n_i 是加性高斯白噪声向量,其均值为 0, 方差矩阵为 $\sigma^2 I_{(MN-L)n_r}$. 我们的目的是由接收数据 r_i 估计 MIMO 信道矩阵 H . 用子空

间的方法进行盲信道估计。

H 能够被辨识的充分条件是式(5)中的矩阵 A 列满秩. 已经证明^[15] 如果 $L n_R \leq MK(n_R - n_T) + MP n_R$, 则 A 列满秩. 这可以通过选择适当长度的循环前缀 P 或者适当数量的数据块 M 来满足条件. 假设有 J 个接收数据块, 写成矩阵形式 $R = [r_M r_{M+1} \cdots r_J]$, 则有

$$R = \tilde{H}WS + v \quad (6)$$

其中 $S = [S_M S_{M+1} \cdots S_J]$ 为发送数据矩阵, $v = [n_M n_{M+1} \cdots n_J]$ 是加性高斯白噪声矩阵. 接收信号的自相关矩阵 $R_R = E\{RR^H\}$, 对其进行奇异值分解得到与最大的 $MK n_T$ 个特征值对应的特征向量组成的矩阵 $U \in C^{(MN-L)n_R \times MK n_T}$, $G \in C^{(MN-L)n_R \times [M(Nn_R - Kn_T) - Ln_R]}$ 是与 $M(Nn_R - Kn_T) - Ln_R$ 个最小的特征值对应的特征矩阵. 则 U 和 G 分别张成信号子空间和噪声子空间, 它们互相正交. 若采用噪声子空间方法, 则有

$$\begin{aligned} g_m^H \tilde{H}W &= 0 \quad m = 1, 2, \cdots, \\ M(Nn_R - Kn_T) - Ln_R &= n_G \end{aligned} \quad (7)$$

为了得到 MIMO 信道 H 的估计, 将式(7)写为

$$\tilde{W}g_m^H H = 0 \quad (8)$$

由上式即可求得 MIMO 信道的估计值. 但实际中, 由于噪声的存在, 只能得到 G 的估计. 在实际问题中常采用不同的准则得到信道的最优估计, 而且还能得到自适应的优化算法, 例如基于 LS 和 MMSE 等信道估计优化准则.

对于子空间算法还有一些不同的改进, 最终目的都是使得信道的估计值更准确. 文献[17]提出了 MIMO-OFDM 信道估计的两阶段法. 在第一阶段对信道进行初始估计, 第二阶段, 利用恒模算法自适应跟踪信道变化, 从而给出信道比较精确的估计. 子空间算法对于信道变化不是很快的情况能够很好地估计出信道的值. 它利用接收数据的二阶统计量, 然后进行奇异值分解. 但该方法也存在缺点, 最好能够利用发射信号的一些信息, 估计效果会更好. 此外, 计算量比较大. 而且还有一些假设条件在实际中还未必成立. 因此对于子空间方法还有待做更深入的研究.

3.2 Monte Carlo 方法

Monte Carlo 方法作为一种迭代式的信号处理方法, 适用于一类更为广泛的系统模型. 它适用于非线性非高斯模型, 因此在无线通信中应用该方法能解决更符合实际的问题. 下面简单介绍 Monte Carlo 方法^[24, 25].

在很多的信号处理问题中需要由观测样本 $Y \triangleq \{y_1, y_2, \cdots, y_m\}$, 对系统未知状态 $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_n\}$ 作出某种统计推断. 一般来说, 观测是 Y 未知状态 X 和未知参数 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \cdots, \theta_l\}$ 的函数, 而所有未知量 (X, Θ) 服从先验分布 $p(X, \Theta)$, 贝叶斯推理即是求这些未

知量的后验概率分布:

$$p(X, \Theta | Y) \propto p(Y | X, \Theta) p(X, \Theta) \quad (9)$$

若对 X 的某一分量 x_i 感兴趣, 则需计算 $E\{h(x_i) | Y\}$ (其中 $h(\cdot)$ 表示某一函数), 即

$$\begin{aligned} E\{h(x_i) | Y\} &= \int h(x_i) p(x_i | Y) dx_i \\ &= \int h(x_i) \int p(X, \Theta | Y) dX_{[-i]} d\Theta dx_i \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $X_{[-i]} \triangleq X \setminus x_i$. 式(10)的积分在实际中通常难以计算, Monte Carlo 方法是解决这种问题的有效手段.

假设我们能从式(9)的联合分布产生随机样本(不要求相互独立):

$$(X^{(1)}, \Theta^{(1)}), (X^{(2)}, \Theta^{(2)}), \dots, (X^{(n)}, \Theta^{(n)})$$

或者可以从边缘后验概率分布 $p(X | Y)$ 产生样本: $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(n)}$. 则可用这些样本近似计算(10)中的边缘后验概率密度 $p(x_i | Y)$:

$$E\{h(x_i) | Y\} \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n h(x_i^{(j)}) \quad (11)$$

计算式(11)的方法分为批处理的 Markov Chain Monte Carlo (MCMC)方法, 以及自适应处理的 Sequential Monte Carlo (SMC)方法.

MCMC 是一类能从目标分布 $p(x)$ 产生样本的算法的总称, 其基本思想是通过运行稳态分布为 $p(x)$ 的马尔可夫链来产生样本.

将 Monte Carlo 方法用于无线信道估计和字符检测^[26-29] 是一个很好的估计方法, 能够解决更符合实际情况的一类系统模型. 文献[26, 27]用 Monte Carlo 方法对信道和字符进行联合估计. 文献[29]是对发射字符进行估计的 SMC 平滑方法. 平滑比滤波要用到更多的数据, 因此我在考虑该平滑方法也可以用于信道的估计, 使得估计误差更小. Monte Carlo 方法用来估计 MIMO-OFDM 信道目前的文献还不是很多, 因此还是一个很不完善的领域.

3.3 其他方法

此外, 信道估计还有很多方法, 例如最大似然方法, 基于代价函数的梯度算法, 利用空时编码技术的估计方法^[30]等.

4 斜投影方法

目前斜投影方法还没有应用到 MIMO-OFDM 系统的信道估计中, 但是斜投影作为一种非常有效的信息处理方法有能力推广到解决更复杂的问题. 因此, 斜投影方法是值得我们深入研究的. 这里介绍斜投影在 MIMO 系统信道估计中的应用, 以起到抛砖引玉的作用.

信号估计的实质是提取期望信号, 抑制其他干扰、杂波或者噪声. 投影分析是解决这类问题的有效的数学工具之一. 向量或矩阵到子空间的投影可以分为正

交投影和斜投影两类.当两个子空间正交时,可以采用正交投影进行参数最优估计或者信号最优滤波.而当两个子空间非正交时,正交投影不再有效,这时可以使用斜投影达到提取一个子空间的期望信号,并同时完全抑制其在另一个子空间分量的目的.斜投影作为正交投影算子的一种扩展,在处理信号估计等一些实际问题时是一种普遍适用的数学工具,现在正越来越受到研究者的重视,成为了信号处理和无线通信领域的研究热点^[21-23].

斜投影的子空间方法利用信道的结构特性,巧妙地把信号空间分成过去、现在和未来空间,构造出相应的 Z 空间进行斜投影运算,从而进行信道估计.斜投影方法用于无线信道估计和均衡问题是有其优势的.因为在无线通信中由于多径时延和各种衰落的影响,使得各子载波(或各个时刻的码元)之间不再正交,因此正交投影不再适用.但目前斜投影技术应用于 MIMO-OFDM 系统的信道估计成果还不多见,因此这是一个新的方向,值得我们去深入的研究.下面介绍斜投影算法在单输入多输出信道估计问题中的两种算法.

4.1 斜投影子空间信道估计算法一^[22]

该算法利用行空间的斜投影方法,在无噪声的单输入多输出信道模型的基础上推导的.系统模型为^[22]

$$\mathbf{X}_{a+1:i-1} = \mathbf{H}_L \mathbf{S}_{a-L:i-1}$$

从 i 时刻起接收信号空间分别分成过去、现在和未来三个子空间: $\mathbf{X}_{pa} = \text{Row}\{\mathbf{X}_{1:i}\}$, $\mathbf{X}_{pr} = \text{Row}\{\mathbf{X}_{i+1:i+L}\}$ 和 $\mathbf{X}_{fu} = \text{Row}\{\mathbf{X}_{i+L+1:i+2L}\}$. 这里利用的是行子空间.分别计算现在子空间元素沿着未来空间 \mathbf{X}_{fu} 到过去空间 \mathbf{X}_{pa} 和沿着过去空间 \mathbf{X}_{pa} 到未来空间 \mathbf{X}_{fu} 的斜投影 \mathbf{W}_1 和 \mathbf{W}_2

$$\mathbf{W}_1 = \mathbf{X}_{i+1:i+L} \mathbf{E}_{\mathbf{X}_{pa} | \mathbf{X}_{fu}}$$

$$\mathbf{W}_2 = \mathbf{X}_{i+1:i+L} \mathbf{E}_{\mathbf{X}_{fu} | \mathbf{X}_{pa}}$$

利用信道结构特点可以得到

$$\mathbf{W}_1 = \mathbf{H}_L(:, 1:L) \mathbf{S}_{i+1-L:i} \quad (12)$$

$$\mathbf{W}_2 = \mathbf{H}_L(:, L+1:2L) \mathbf{S}_{i+1:i+L} \quad (13)$$

构造如下的矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} , 由式(12)和(13)可推出其满足相应的信道关系:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1(1:(L-1)N, 2:j) - \mathbf{W}_1(N+1:LN, 1:j-1) \\ \mathbf{W}_1((L-1)N+1:LN, 2:j) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_L \end{bmatrix} [s_{i+1} \quad \cdots \quad s_{i+j-1}]$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}_2(1:M, 1:j-1) \\ \mathbf{W}_2(M+1:LM, 1:j-1) - \mathbf{W}_2(1:(L-1)M, 2:j) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} h_0 \\ \vdots \\ h_{L-1} \end{bmatrix} [s_{i+1} \quad \cdots \quad s_{i+j-1}]$$

其中 $\mathbf{W}(a:b, c:d)$ 表示从 a 到 b 行,从 c 到 d 列的矩阵块. \mathbf{P} 和 \mathbf{Q} 是 $NL \times j$ 矩阵,分别增添 $L \times j$ 的零矩阵,构造如下的新矩阵 \mathbf{T} ,显然满足

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{1 \times j} \\ \mathbf{P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{0}_{1 \times j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_0 \\ 2h_1 \\ \vdots \\ 2h_{L-1} \\ h_L \end{bmatrix} [s_{i+1} \quad \cdots \quad s_{i+j-1}]$$

这样对 \mathbf{T} 进行奇异值分解, $\mathbf{T} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H$. 因为对单输入多输出信道而言,源信号向量维数 $M=1$,所以奇异值个数理论上为 1, $\mathbf{U}(:, 1)$ 向量为相应信道响应参数组成的向量(差一个常数因子),这样就完成了信道估计.

4.2 斜投影子空间信道估计算法二^[23]

文献[23]采用不同的方法构造投影空间,根据接收信号空间与发送信号空间同构,从 i 时刻起把接收信号空间分成一组现在空间 \mathbf{X}_{pa} , 两组过去空间 \mathbf{X}_{pa1} 、 \mathbf{X}_{pa2} 和未来空间 \mathbf{X}_{fu1} 、 \mathbf{X}_{fu2} , 它们和接收信号空间满足关系

$$\mathbf{X}_{pa1} = \text{Row}\{\mathbf{X}_{i-m+1:i-1}\} = \mathbf{S}_{pa1} = \text{Row}\{\mathbf{S}_{i-m-L+1:i-1}\}$$

$$\mathbf{X}_{pa2} = \text{Row}\{\mathbf{X}_{i-m:i}\} = \mathbf{S}_{pa2} = \text{Row}\{\mathbf{S}_{i-m-L:i}\}$$

$$\mathbf{X}_{pr} = \text{Row}\{\mathbf{X}_{i+1:i+L}\} = \mathbf{S}_{pr} = \text{Row}\{\mathbf{S}_{i-L+1:i+L}\}$$

$$\mathbf{X}_{fu1} = \text{Row}\{\mathbf{X}_{i+L+1:i+L+m}\} = \mathbf{S}_{fu1} = \text{Row}\{\mathbf{S}_{i+1+L+m}\}$$

$$\mathbf{X}_{fu2} = \text{Row}\{\mathbf{X}_{i+L+1+i+L+m}\} = \mathbf{S}_{fu2} = \text{Row}\{\mathbf{S}_{i+1+i+L+m}\}$$

则有空间的如下关系: $\mathbf{X}_{pa2} \cap \mathbf{X}_{fu2} = \text{Row}\{s_{i,j}\}$; $\mathbf{X}_{fu2} = \mathbf{X}_{fu1} \oplus \text{Row}\{s_{i,j}\}$; $\mathbf{X}_{pa2} \cap \mathbf{X}_{fu2} = \text{Row}\{s_{i,j}\}$; $\text{Row}\{\mathbf{X}_{i-m+1+i+L+m}\} = \mathbf{X}_{pa1} \oplus \mathbf{X}_{fu1} \oplus (\mathbf{X}_{pa2} \cap \mathbf{X}_{fu2})$.

那么对现在空间 \mathbf{X}_{pr} 中向量组 $\mathbf{X}_{i+1:i+L}$ 进行斜投影得: $\mathbf{X}_{i+1:i+L} \mathbf{E} = \mathbf{H}^H s_{i,j}$. 其中算子 \mathbf{E} 可以是以下任何一种投影算子: $\mathbf{E}_1 \triangleq \mathbf{E}_{\mathbf{X}_{fu2} | \mathbf{X}_{pa2}} \mathbf{E}_{\mathbf{X}_{pa2} | \mathbf{X}_{fu2}}$; $\mathbf{E}_2 \triangleq \mathbf{E}_{\mathbf{X}_{pa2} | \mathbf{X}_{fu2}} - \mathbf{E}_{\mathbf{X}_{pa1} | \mathbf{X}_{fu2}}$; $\mathbf{E}_3 \triangleq \mathbf{I} - (\mathbf{E}_{\mathbf{X}_{fu1} | \mathbf{X}_{pa2}} + \mathbf{E}_{\mathbf{X}_{pa1} | \mathbf{X}_{fu2}})$.

5 总结和展望

MIMO-OFDM 技术将空间分集、时间分集以及频率分集有机的结合起来,从而能够大大的提高无线通信系统的信道容量和传输速率,有效的抵抗信道衰落和抑制干扰.成为实现无线信道高速数据传输最具希望的解决方案之一,具有非常广阔的研究和发展前景.因此研究有效的 MIMO-OFDM 系统的信道估计算法是非常有实际意义的.

由于未来移动通信系统高速率、高可靠性、大数据量的传输要求,研究低复杂度的算法成为很重要的一个方向.所以一些简化算法的研究就变得很有必要.对系统进行更为合理而有效的建模也是很重要的.只有设计出恰当的模型,再结合有效的信号处理方法,才能得到很好的信道估计算法来.

另外,对算法性能的分析也是很重要的.以 Monte

Carlo 方法为例,它在信道和字符估计以及最佳盲 Bayesian 接收机设计等问题中得到广泛应用. Monte Carlo 方法显著的优点是:(1)能达到较小的误码率(因为它是基于概率计算的 Bayesian 估计,能够进行软决策,与以往使用的硬决策相比性能大大提高);(2)在对无线信道进行估计时不需要训练序列;(3)是一种迭代式的算法.但现在大多文献中对信道估计的 Monte Carlo 算法没有给出性能方面的理论分析,大多局限于仿真实验.因此,对该算法的性能进行理论分析还是很有意义的.

参考文献:

- [1] Moon J K, Choi S I. Performance of channel estimation methods for OFDM systems in a multipath fading channels[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2000, 46 (1): 161 - 170.
- [2] Hsieh M, Wei Ch. Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels[J]. IEEE Transactions Consumer Electronics, 1998, 44 (1): 217 - 225.
- [3] Sandell M, Edfors O. A comparative study of pilot-based channel estimators for wireless OFDM[A]. Research Report Lulea, in Signal Processing [C]. Lulea University of Technology, 1996. 5 - 34.
- [4] Hoeher P, Kaiser S, Robertson P. Two-dimensional pilot-symbol aided channel estimation by Wiener filtering[A]. Proceeding IEEE International Conference Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. Munich, Germany, 1997. 1845 - 1848.
- [5] Beek J-J, Edfors O, Sandell M. On channel estimation in OFDM systems[A]. Proceeding IEEE 45th Vehicular Technology Conference[C]. Chicago, USA, 1995, 815 - 819.
- [6] Edfors O, Sandell M, Beek J J, Wilson S K, Borjesson P O. OFDM channel estimation by singular value decomposition[J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46 (7): 931 - 939.
- [7] Li Y (G), Cimini L J, Sollenberger N R. Robust channel estimation for OFDM systems with rapid dispersive fading channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(7): 902 - 915.
- [8] Telatar I E. Capacity of multi-antenna gaussian channels[J]. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10(6): 585 - 595.
- [9] Foschini G J. Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multielement antennas[J]. Bell Labs Technical Journal, 1996, 1(2): 41 - 59.
- [10] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A R. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction[J]. IEEE Transations on Inform. Theory, 1998, 44(2): 744 - 765.
- [11] Wolniansky P W, Foschini G J, Golden G D, Valenzuela R A. V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel[A]. Proceedings of URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics[C]. New York, NY, USA: IEEE, 1998, 295 - 300.
- [12] Paulraj A J, etc. An overview of MIMO communications - a key to gigabit wireless[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92 (2): 198 - 218.
- [13] Wang X, Poor H V. Wireless Communication Systems: Advanced Techniques for Signal Reception [M]. USA: PEARSON, 2004.
- [14] Lu B, Wang X. LDPC-based space-time coded OFDM systems over correlated fading channels: performance analysis and receiver design [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(1): 74 - 88.
- [15] Bai W, He C, etc. Blind channel estimation in MIMO-OFDM systems[A]. Proceeding of Global Telecommunications Conference[C]. IEEE Press, 2002, 1, 317 - 321.
- [16] Du J, Peng Q, Li Y. Adaptive blind equalization for MIMO-OFDM wireless communication systems [A]. International Conference on Communication Technology Proceedings [C]. IEEE Press, 2003, 1086 - 1090.
- [17] Du J, Peng Q, Zhang H. Adaptive blind channel identification and equalization for OFDM-MIMO wireless communication systems[A]. The 14th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communication Proceedings [C]. IEEE Press, 2003, 2078 - 2082.
- [18] Du J, Li Y. MIMO-OFDM channel estimation based on subspace tracking[A]. Proceedings of Vehicular Technology Conference[C]. VTC Spring, 2003, 1084 - 1088.
- [19] Fu H, Patrich H W, Sun S. Semiblind channel estimation for MIMO-OFDM[A]. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications Proceedings [C]. IEEE Press, 2004, 1850 - 1854.
- [20] Bai W, Bu Z. Subspace based channel estimation in MIMO-OFDM systems mobile radio applications[A]. Proceedings of Vehicular Technology Conference[C]. VTC Spring, 2004, 598 - 602.
- [21] Behrens R T, Scharf L L. Signal processing applications of oblique projection operators[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(6): 1413 - 1424.
- [22] Vandaele P, Moonen M. Two deterministic blind channel estimation algorithms based on oblique projections[J]. Signal Processing, 2000, 80(3): 481 - 495.
- [23] Yu X, Tong L. Joint channel and symbol estimation by oblique projections[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(12): 3074 - 3083.
- [24] Arulampalam M S, etc. A tutorial on particle filters for online

- nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(2): 174 - 188.
- [25] Djuric P M, etc. Particle filtering[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2003, 20(5): 19 - 38.
- [26] Bertozzi T, Ruyet D, etc. On particle filtering for digital communications[A]. IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications Proceedings [C]. IEEE Press, 2003, 570 - 574.
- [27] Scherb A, Zheng C. Comparison of methods for iterative joint data detection and channel estimation[A]. Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference[C]. VTC Spring, 2004, 98 - 102.
- [28] Kotecha J H, Djuric P M. Sequential monte carlo sampling detector for rayleigh fast-fading channels[A]. Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)[C]. IEEE Press, 2000, 61 - 64.
- [29] Andrieu C, Piechocki R J, McGeehan J P. Particle smoothing techniques with turbo principle for MIMO systems[A]. IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications[C]. IEEE Press, 2003, 561 - 564.
- [30] Yang J, Sun Y, etc. Channel estimation for wireless communications using space-time block coding techniques[A]. Proceeding of International Symposium on Circuits and Systems [C]. IEEE Press, 2003, 220 - 223.

作者简介:



张玲女, 1978年出生于山东省. 2007年7月毕业于清华大学自动化系并获得博士学位. 现在中国海洋大学任教. 研究方向为通信信号处理、智能信息处理.
E-mail: lingzhang03@mails.tsinghua.edu.cn



张贤达男, 1946年出生于江西省. 现任清华大学自动化系、清华信息科学与技术国家实验室教授、博士生导师. 研究方向为信号处理、模式识别. IEEE高级会员, 在国际权威杂志IEEE汇刊和Neural Computation上发表论文近40篇. 曾以第一获奖人获得国家自然科学奖和部级科技进步奖多项. 出版学术著作6部.

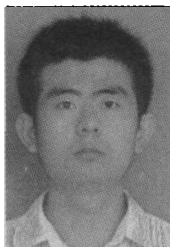
(上接第114页)

- [8] Mao Wenbo. Modern Cryptography: Theory and Practice[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [9] V Shoup. A Computational Introduction to Number Theory and Algebra[M]. Cambridge University Press, 2005.

作者简介:



孟涛男, 1961年5月出生, 1983年于国防科技大学获学士学位, 1988年于哈尔滨工业大学获工学硕士学位, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所博士研究生. 主要研究方向为阙下信道、隐藏通信、信息安全.
E-mail: gorgan@126.com



王建峰男, 1984年6月出生, 2006年于天津大学获得双学士学位, 现为哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所硕士研究生. 主要研究方向为数字签名中的阙下信道技术.
E-mail: flyy@tju.edu.cn



孙圣和男, 1937年10月出生, 1961年毕业于哈尔滨工业大学电机系研究生班, 现为哈工大教授、博导, 自动化测试与控制研究所所长. 研究方向为信号处理、数字水印、自动化测试.
E-mail: sunshenghe@hit.edu.cn