

一种部分信道状态信息下提高频谱效率的方法^{*}

苏 钢¹ 朱光喜^{1,2} 刘应状¹ 王德胜¹

(华中科技大学电信系 武汉 430074)¹ (武汉光电国家实验室(筹) 武汉 430074)²

摘 要 在已知精确信道状态信息的情况下,使用自适应调制等技术能改善 OFDM 系统的性能。然而,反馈信息传输延时导致的信道估计噪声和多普勒频移,使得实际的时变衰落信道条件中不可能获得完全精确的信道状态信息。本文利用多个“过期的”信道估计值,使用扩展自相似过程模型来修正当前的信道估计值。仿真分析表明,在衰落信道条件下,新方法能有效地改善自适应 OFDM 系统平均频谱效率。

关键词 衰落信道,部分信道状态信息,扩展自相似,平均频谱效率

A Novel Method to Achieve Average Spectral Efficiency with Imperfect CSI

SU Gang¹ ZHU Guang-Xi^{1,2} LIU Ying-Zhuang¹ WANG De-Sheng¹

(Dept. of Electronic and Information Engineering, HUST, Wuhan 430074)¹ (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430074)²

Abstract Accurate channel state information (CSI) is required at the transmitter to achieve the benefits for adaptive OFDM system. But imperfect CSI arises from both noisy channel estimates and Doppler shift in rapidly fading channels, which may also be outdated due to a delay in getting the CSI to the transmitter. The use of multiple estimates is then proposed to improve the performance based on extended self-similar process, which enables the system to achieve average spectral efficiency of rapidly fading channels significantly.

Keywords Rapidly fading channel, Imperfect channel state information, Extended self-similar process, Average spectral efficiency

1 引言

在高速无线数据传输中,正交频分复用(OFDM)技术^[1]以其强有力的抗频率选择性衰落能力而受到越来越多的关注。一种提高系统性能的有效方法是采用自适应调制技术,每个子信道的调制方式由该子信道的信道特性来确定。但是,在自适应 OFDM 系统中发射机需要精确的信道状态信息,一般假设发送端所获的信息是理想的。在无线通信中,由于信道是时变、受噪声干扰的,信道的估计值是不精确的。另外,估计信道特性和确定调制方式将产生较大延时,信道的时变特性将对自适应调制的性能带来巨大影响。此时信道的状态信息仅仅是部分已知的,因此全面分析信息不确定性的影响,合理利用信道的部分状态信息,对自适应 OFDM 系统具有重要的实际意义。

在保证系统性能的条件下,利用改进信道估计和信道预测技术,使用具有鲁棒性的自适应算法可以削弱不可靠信息对性能的影响。文[2]采用一阶有限状态 Markov 模型来描述信道时变,选择最大值的方案用于下次传输。文[1,3]和[4]利用衰落过程的自相关函数,可由“过期的”信道估计信息推算出当前的信道状态信息。文[5]对部分信道信息带来的数据估计误差,使用线性泰勒近似法进行分析。这些方法可以改善衰落信道性能,但是并不适用于快衰落信道。本文主要分析部分信道状态信息下的时变快衰落信道,然后利用扩展自相似过程模型修正信道估计误差,并结合系统的平均频谱效率进行了仿真分析。

2 扩展自相似过程

所谓扩展自相似过程^[6](ESS, extended self similarity),是分数布朗运动的推广(也称为渐近分数布朗运动^[6]),指一个零均值随机过程 $B_f(t)$ 满足 $B_f(t)=0$ 及式(1)的扩展自相似性:

$$\text{VAR} [B_f(s+p) - B_f(s)] = f(p) \text{VAR} [B_f(t+1) - B_f(t)] = f(p) \delta_f^2 \quad (1)$$

其中 $\text{VAR}(\cdot)$ 表示过程的方差。一般将这一过程简记为 $B_f: p \rightarrow 1$ 。扩展自相似过程 $B_f(t)$ 存在下述重要性质:

性质 1 $B_f(t)$ 的增量

$$x_f(k, \Delta x) = B_f[\Delta x(k+1)] - B_f(\Delta x k), k \in Z$$

是平稳的,式(2)是其相关函数:

$$r_{x_f}(k, \Delta x) = \frac{\delta_f^2}{2} \{f[\Delta x(k+1)] + f[\Delta x(k-1)] - 2f(\Delta x f)\} \quad (2)$$

性质 2 当 $f(p) = |p|^{2H}$, $0 < H < 1$ 时,这一过程则退化为由分数布朗运动定义通常的自相似过程^[6]。

性质 3 扩展自相似过程可以具有长相关性,也可以具有短相关性,这由定义该过程的参数及函数 $f(\cdot)$ 决定。

3 信道模型

K 个子载波的等价低通复衰落系数可以近似表示为^[1]

$$c(f^i, t) = \sum_{n=1}^N A(n) \exp\{j[2\pi f_d(n)t + \varphi_i(n)]\}, \quad i=1, 2, \dots, K \quad (3)$$

^{*} 国家“863”计划(编号 2003AA12331005 和 2006AA01Z277)和国家自然科学基金(编号 60496315)资助。苏 钢 博士生,主要研究方向为自适应 MIMO-OFDM 传输系统;朱光喜 教授,博士生导师,主要研究方向为宽带多媒体通信等;刘应状 博士后,副教授,主要研究方向为宽带无线通信和多媒体技术等;王德胜 博士,副教授,主要研究方向为 MIMO-OFDM 无线通信等。

其中 $A(n)$ 是第 n 条多径幅度, $f_d(n)$ 是多普勒频移。 $c(f, t)$ 的分布近似于零均值复高斯随机变量, 因此幅度 $|c(f, t)|$ 是 Rayleigh 分布^[1]。假设一个 OFDM 信号有 K 个子载波, 一个符号周期为 T_s , 相邻的子载波频率间隔为 Δf_s 。同时假设每个子载波的信道带宽远小于相干带宽, 并且在一个 OFDM 符号周期内信道状态信息不发生改变, 但是在符号间发生变化。第 n 个符号块的第 k 个子载波的等效信道复增益 $H_s[n, k]$ 按式(3)的时变频率选择性信道模型(时域和频域采样间隔分别是 T_s 和 Δf_s), OFDM 解调之后的接收信号表示为:

$$X[n, k] = H_s[n, k]a[n, k] + w[n, k] \quad (4)$$

其中 $a[n, k]$ 是第 k 个子载波的复基带符号, $w[n, k]$ 是复高斯白噪声。令下式表示基于 MMSE 准则的信道状态信息的精确估计:

$$\tilde{H}_s[n, k] = H_s[n, k] + \tilde{w}[n, k] \quad (5)$$

其中 $\tilde{w}[n, k]$ 是白高斯噪声的估计误差。基于 K 个子载波的前 p 个观察值的第 k 个子载波和第 n 个采样点的信道状态预测估计可以写为

$$\hat{H}[n, k] = \sum_{i=1}^p \sum_{m=1}^K d_i^*(j, m) \tilde{H}[n-j, k] \quad (6)$$

使得最小均方 $E_{(j, m)}[|(H[n, k] - \hat{H}[n, k])|^2 | \{A, \theta, \pi\}]$ 最小的最优滤波器系数 $d_o(j, m)$ 可以通过正交原理观察多个子载波得到。当然, 如果不考虑系统复杂度, 也可以利用邻近子载波来减少噪声的影响。简化的算法仅利用目标子载波的“过期的”观察值就足够获得最优 MMSE 性能^[1]:

$$\hat{H}[n, k] = \sum_{j=1}^p d_j^*(n) \tilde{H}[n-j, k] \quad (7)$$

对于第 n 个符号块的第 k 个子载波(假设为 QAM 调制), 其频谱效率由下式计算^[1]:

$$\beta[n, k] = \log_2 \left[\frac{c_2 \frac{E_s}{N_0} |H[n, k]|^2}{\ln \frac{c_1}{P_{wr}}} + 1 \right] \quad (8)$$

其中常数 c_1 为 0.2, 常数 c_2 为 1.6, $\frac{E_s}{N_0}$ 是信噪比, P_{wr} 是平均误比特率。系统的平均频谱效率即所有子载波频谱效率的算术平均。

4 信道估计修正

表 1 802.11a 无线网络的典型信道参数

场景	室内	室外
载波	5GHz	2GHz
带宽	20MHz	5MHz
子载波	64	1024
rms 扩展时延	0.2us	5us
最大扩展时延	0.8us	20us
OFDM 块长度	3.2us	204.8us
最高移动速度	16km/h	96km/h
$f_{D\tau_D}$	0.03	0.11

文[1]给出证明, 在自适应 OFDM 系统里, 可以设计合理的信道估计器, 使得 MSE 在 -15dB 以上的时候, 影响性能的最关键因素不是信道估计噪声, 而是信道状态信息的延迟。信道的脉冲响应在信号的符号周期内变化。由于多普勒扩展引起的频率分散(时间选择性衰落), 将导致信号的畸变。一般使用多普勒频移 f_d 和信道信息延迟 τ_D 的乘积来区分衰落

程度。表 1 是 802.11a 无线网络的典型信道参数指标。室内环境下的 $f_{D\tau_D}$ 一般小于 0.05, 频谱效率的下降几乎可以忽略^[1], 系统性能损失很小。如果无线系统使用更高的载波频率, 室外环境下, $f_{D\tau_D}$ 可能超过 0.1。特别是由于终端移动速度更快, 导致更高的多普勒频移, $f_{D\tau_D}$ 能达到 0.2 以上, 时变衰落将严重降低系统的性能。

4.1 基于自相关的修正

在完全获知理想信道状态信息条件下, 信道估计函数 $H'[n, k]$ 仅仅是真实信道状态信息函数 $H[n, k]$ 的延迟。容易推广到更一般的情况下, 两者的相关函数可以表示为

$$E\{H[n-i\Delta n, k]H^*[n-j\Delta n, k]\} = J_0(2\pi f_D(j-i)\tau_D) \quad (9)$$

利用衰落过程的自相关函数, 可以直接将只有一个估计值的条件概率密度函数扩展为由多个以前信道估计值为条件的概率密度函数。例如, 假设已知两个“过期的”信道估计值分别是 $\tilde{H}(n-2, k)$ 和 $\tilde{H}(n-1, k)$, 并假设两者之间的延迟也为 τ_D , 同时假定 $\tilde{H}(n-2, k)$ 、 $\tilde{H}(n-1, k)$ 和 $H(n, k)$ 是联合正态分布的。因此, 根据式(9)可得 $H(n, k)$ 和 $\tilde{H}(n-1, k)$ 、 $\tilde{H}(n-2, k)$ 的相关系数分别为 $\rho_1 = J_0(2\pi f_D\tau_D)$ 和 $\rho_2 = J_0(2\pi f_D 2\tau_D)$, 可得在 $\tilde{H}(n-2, k)$ 、 $\tilde{H}(n-1, k)$ 已知条件下, $H(n, k)$ 的概率密度函数为复高斯函数^[1], 且均值为

$$s = \frac{\rho_1(1-\rho_2)\tilde{H}(n-1, k) - (\rho_2^2 - \rho_2)\tilde{H}(n-2, k)}{1-\rho_1^2}$$

方差是

$$\sigma^2 = \frac{(1-\rho_2)(1+\rho_2-2\rho_1^2)}{1-\rho_1^2}$$

在很多场景下, 不同时刻的多个估计值是可以用于修正当前的信道估计值^[1]。例如, 接收机可以存储多个 OFDM 训练队列, 或者在某段比较短的时间内接收机收到同一个发射机的多个数据包。仿真显示, 对室内的慢衰落信道环境(例如, 当 $f_{D\tau_D}$ 小于 0.05), 使用 1 到 2 个过去的信道就可以获得比较满意的效果; 然而对室外的快衰落信道(例如, 当 $f_{D\tau_D}$ 为 0.2), 需要使用 5 个以上“过期的”信道状态信息^[1], 对当前信道估计值的修正效果才比较理想。

4.2 基于扩展自相似的修正

在最近的一些无线信道特性的研究中, 已经发现信号多径分量信道增益之间具有一定的相关性^[7], 文[7]把分形理论引入多径衰落信道的研究, 尝试建立一种新的基于 FBM 的信道模型。实验结果表明, 与传统的随机模型相比, FBM 信道模型能更精确地拟合多径衰落。而基于 FBM 的扩展自相似模型相对更简洁, 可以使用小波变换法对自相似参数进行估计。但是由于小波方法过于复杂, 实际应用并不多。此外, 由于不易得知实际的边缘概率分布函数具体表达式, 所以在工程上可以利用迭代统计方法对自相似参数进行估计。依据已经观察到的流数据, 选择一个最能够匹配这组数据的模型。

从式(7)可知, 期望的响应和预测得的信道状态信息之间的误差是

$$e[n, k] = H(n, k) - \sum_{j=1}^p d_j^*(n) \tilde{H}(n-j, k) \quad (10)$$

因此, 所有子载波上平均均方误差 (AMSE) 是

$$J(n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |e[n, k]|^2 \quad (11)$$

图 1 是 K 个子载波联合预测估计的迭代框图, 其中 $ESS_k(k=1..K)$ 是第 k 个子载波的扩展自相似估计器, $\tilde{H}(\cdot)$ 代表“过期的”信道估计信息(序列), $H(\cdot)$ 是当前的信

道估计函数, $e(\cdot)$ 是估计误差 $J(n)$ 。根据式(11)计算平均均方误差 $J(n)$, 对信道估计和自相似参数进行修正。值得注意的是, 这种方法虽然与信道预测看似相似, 但是在这里我们强调的是要更好地利用估计误差的统计特性^[3], 而不是追求单一的信道预测增益。

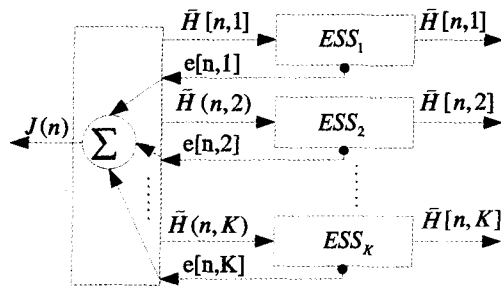


图1 K个子载波的信道估计修正

5 仿真分析

在仿真试验里, 假设信道的误比特率 P_{ur} 为 0.001^[1], 使用 Monte Carlo 法来统计自适应 OFDM 系统的平均频谱效率来对比快衰落信道条件下的系统性能。快衰落信道的 f_{DTD} 假设为 0.2, 对比基于 ESS 和 AC(自相关)算法的平均频谱效率。图 2、图 3 和图 4 分别对应利用 1 个、3 个和 5 个“过期的”信道估计值的平均频谱效率曲线, 三个图中的无标记的实线和虚线分别是理想自适应和无自适应调制下的平均频谱效率曲线; 标记“矩形”的曲线对应 ESS 算法, 标记“小圆圈”则对应自相关算法。从图 2 可以看出, 利用一个“过期的”估计值, 两种算法的修正效果都很差。图 3 显示, 如果利用三个“过期的”信道估计值, 在信噪比为 20dB 和 25dB 时, ESS 的平均频谱效率都超过了 AC, 约 1.19b/(s · Hz)。图 4 中两种算法的性能曲线几乎重合, ESS 性能略好, 都相当逼近理想自适应调制下的极限性能。

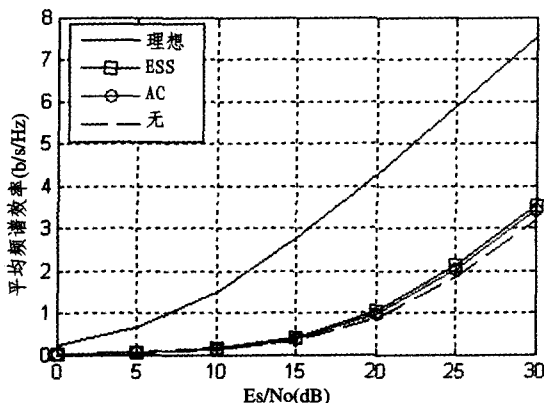


图2 利用1个“过期的”信道估计值的平均频谱效率曲线

考虑一般的情形, 假设随机变量 \hat{H} 和 $M \times 1$ 的随机向量 \tilde{H} 都符合零均值的高斯分布, 两者的协方差矩阵记为 $\begin{bmatrix} 1 & a^T \\ a & B \end{bmatrix}$ 。因此, 给定 \tilde{H} 条件下的 \hat{H} 符合高斯分布^[1], 且其均值和方差分别为 $s_H = a^T B^{-1} \tilde{H}$ 和 $\delta_H^2 = 1 - a^T B^{-1} a$ 。由于使用扩展自相似过程更精确地拟合衰落过程, 减少了方差 δ_H^2 。 δ_H^2 是决定系统平均频谱效率的关键因素^[1], 这一点与文[1]的结论是一致的。

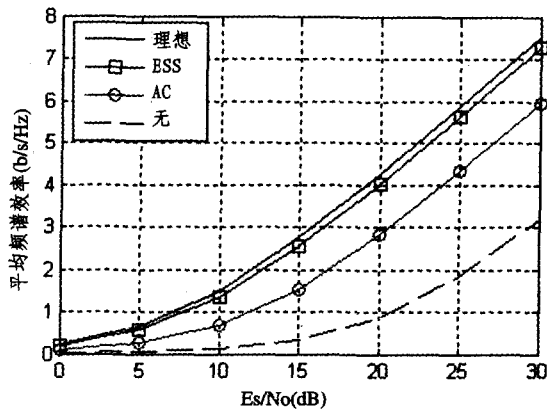


图3 利用3个“过期的”信道估计值的平均频谱效率曲线

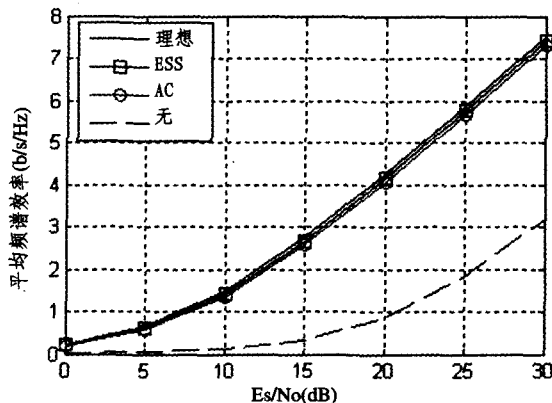


图4 利用5个“过期的”信道估计值的平均频谱效率曲线

结论 本文分析并讨论了时变快衰落信道中, 部分信道状态信息下, 自适应 OFDM 系统的信道信息的时延对系统的平均频谱效率的影响, 并提出利用扩展自相似过程修正估计误差, 减少了信道估计值的方差。仿真分析表明新方法可以减少对“过期”信道估计值数量的依赖, 减少了系统的复杂度, 这对于研究时变快衰落 OFDM 无线信道特性具有一定参考价值。

参考文献

- Ye Sigen, Blum R S, Cimini L J, Jr. Adaptive OFDM Systems with Imperfect Channel State Information. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(11): 3255~3265
- Yang J, Khandani A K, Tin N. Statistical Decision Making in Adaptive Modulation and Coding for 3G Wireless Systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(6): 2066~2073
- Goeckel D L. Adaptive Coding for Time-Varying Channels Using Outdated Fading Estimates. IEEE Transactions on Communications, 1999, 47(6): 844~855
- 肖建华, 张平. 非精确信道状态信息下 OFDM 系统中的自适应调制技术. 北京邮电大学学报, 2003, 26(3): 17~21
- Weber T, Sklavos A, Michael Meurer. Imperfect Channel-State Information in MIMO Transmission. IEEE Transactions on Communications, 2006, 54(3): 543~552
- 张军英, 石美红, 张强. 扩展自相似过程的表示及其性质. 通信学报, 2002, 23(9): 94~99
- 胡刚, 朱世华, 谢波. 多径衰落信道的分数布朗运动模型. 电子学报, 2003, 31(1): 8~12