

无线信道低采样率修正 K 步前向预测算法

王宏远, 余国文

(华中科技大学电信系数字视频与通信中心, 武汉 430074)

摘 要: 在无线衰落信道自相关函数循环平稳突变特性分析基础上, 本文提出一种基于预测插值的实时外推修正 k 步前向预测算法, 在最小均方误差基础上推导了预测解析式, 并进行了误差分析. 功率控制下 Jakes 多径衰落信道恒包络预测仿真结果表明了该算法的有效性.

关键词: 二阶统计量; 循环平稳; 长期信道预测; 循环平稳区

中图分类号: TN929. 533 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 03-0477-03

Modified K-Step Fading Predicting Algorithm on Radio Fading Channel

WANG Hong-yuan, YU Guo-wen

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Based on the analysis about cyclostationary inflection from the autocorrelation of samples in radio fading channel, a modified real time K-step channel fading predicting algorithm is proposed. Mathematic derivation, and also error analysis, are finished based on MMSE criteria. Simulating results show that the proposed algorithm with power control loop can reduce the prediction error and obtain BER improvement in wireless Jakes channel.

Key words: second-order statistic; cyclostationary; long term channel predicting; cyclostationary area

1 引言

自适应功率控制, 自适应调制以及传输链路快速自适应等都是近年来广泛研究的旨在优化无线资源, 提高无线多径衰落信道频谱效率, 增加传输容量的自适应传输技术, 它们在高速多媒体传输系统中能够获得良好的系统性能^[1~3]. 上述自适应技术的研究中, 信道状态及其变化趋势能够准确估计和预测的假设条件被广泛采用, 这在实际传输系统中由于无线多径信道的快衰落和随机性而难以满足, 导致系统性能下降. 为实现无线信道短时和长时状态的准确预测目标, 针对无线多径衰落信道的时变性和随机性, 众多学者进行了广泛而深入的研究. Ekman 等详细讨论了信道预测的最小二乘解并进行了误差分析^[4], Lars Lindbom 则提出了 Weiner LMS 算法以改善信道估计的效率和精度^[5]. Hallen 等将满足 Nyquist 采样频率的低采样技术和 K 步前向预测算法应用到衰落信道长期预测算法中^[6,7], 但遗憾的是随着预测阶数的增加和预测时间的增长, 信道衰落预测精度急剧下降, 导致无线信道传输状态预测时效降低.

针对信道衰落长期预测误差增加问题, 本文在文献[6, 7]基础上, 对无线信道输出信号的二阶统计特性进行了进一步分析和讨论. 注意到其循环平稳特性的突变性是信道衰落预测效率降低的原因, 在此基础上, 根据衰落信道采样数据相关的分段特性, 本文讨论了长时信道衰落预测误差随阶数和时间增加的产生原因, 并提出进一步延长预测时间的适合高速移动环境下的修正 K 步预测算法, 同时推导了该算法预测误

差解析式. 恒包络系统衰落特性修正 K 步预测算法盲仿真结果表明, 同等阶数 AR 自回归模型, 最小均方误差估计 (LMS) 算法情况下, 该算法在延长信道预测时间的同时, 能够减小预测误差, 降低无线多径传输信道中的误码率.

2 无线多径信道散射模型

无线多径信道散射模型^[6]是一类广泛采用的信道模型, 该模型将基带接收信号等效为 N 个不同位置散射体产生的不同频率、相位的正弦信号的叠加:

$$c(t) = \sum_{n=1}^N A_n e^{-j(2\pi f_n t + \phi_n)} \quad (1)$$

其中 $f_n = (v_n \cos \theta_n) / \lambda_c = f_{dn} \cos \theta_n$, 这里下标 n 表示与某个特定散射体对象相关的多径信号, 该散射体的相对运动速度为 v_n , 调制载波信号的频率是 f_c , 波长是 λ_c . 该路径上接收信号的幅度为 A_n , 相对相移为 ϕ_n . 各路径中接收信号的波动频率 f_n 产生于散射体相对运动导致的多普勒频率, f_{dn} 是 n 路径上最大多普勒频率, 它决定了信道包络最大变化程度. 实验表明中等数量的 N 值, 就可以比较准确的描述无线传输过程中基带接收信号的衰落情况^[8].

3 K 步预测算法及误差分析

假设无线传输信道发送符号为 $s(k)$, 等效信道衰落系数 $c(k)$, 信道中仅存在离散加性高斯白噪声 $v(k)$, 则 k 时刻接收端信道采样信号 $y(k) = c(k)s(k) + v(k)$.

在采用 MMSE (最小均方误差) 准则和全极点 AR 模型进行信道衰落线性预测时, $c(k)$ 可以由前面 p 个信道衰落系数

估计得到,以矢量形式表示为:

$$\mathbf{c}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{D}_k^T = \sum_{j=0}^{p-1} d_{kj} \mathbf{c}_{k-j} \quad (2)$$

其中 $\mathbf{C}_k = (c_{k0}, \dots, c_{k(p-1)})$ 是 k 时刻信道衰落系数矢量, $\mathbf{D}_k = (d_{k0}, d_{k1}, \dots, d_{k(p-1)})$ 是 k 时刻信道衰落系数估计矢量,并在 MMSE 准则下进行更新

$$\mathbf{D}_{k+1} = \mathbf{D}_k + \mu e_k \mathbf{c}_k \quad (3)$$

这里 $e_k = c_k - \hat{c}_k$ 是信道衰落预测误差, μ 是信道衰落系数估计矢量 \mathbf{D} 的搜索步长,它决定了预测算法的收敛速度和稳定性,本文根据接收采样数据自相关矩阵对角化最大系数值来确定^[8]搜索步长: $0 < \mu < 1/\lambda_{\max}$.

该算法最小均方误差 MMSE 取决于信道衰落采样数据自相关的线性组合^[7]:

$$MSE(k, p) = E[|e|^2] = 1 - \sum_{j=0}^{p-1} d_j r_{k+j} \quad (4)$$

其中, $r_m = E[c_n c_{n+m}^*]$ 是采样自相关.

我们注意到理想情况下,输入信号平稳时,信道输出采样信号的自相关函数是零阶 Bessel 函数: $r(\tau) = J_0(2\pi f_m \tau)$, 呈现周期平稳特性,其周期性由 Doppler 频率决定,而与信道采样和预测阶数 K 无关.因此理想条件下任意 k 时刻信道衰落可以根据前面 p 个采样数据的自相关值进行精确预测.

而实际无线多径信道输出采样自相关则会产生突变. Jake's 信道采样数据自相关函数的一个实例如图 2 所示.因此根据该信道采样数据自相关函数突变性,粗略地我们可以依突变点位置将信道输出自相关分成两部分:循环平稳数据区(时间 $t < t_h$)和突变数据区(时间 $t > t_h$).在循环平稳数据区,自相关函数与理想情况相似,表现出强烈的 Doppler 周期性,虽然自相关函数

呈振荡衰减趋势,仍可以利用已知的 p 个信道衰落值对 k 时刻信道衰落进行 K 阶线性预测,这也是文献[6, 7]中 K 步预测算法在信道衰落短时预测中能够成功实施的原因.然

而随着预测时间和阶数 K 的进一步增加,自相关函数将进入非循环平稳的突变区,其自相关函数规律性丧失,导致信道衰落预测误差急剧增加,乃至信道衰落的不可预测.

4 修正 K 步预测算法

上述无线衰落信道采样数据自相关函数分析结果表明,信道衰落预测过程中应尽可能将信道预测置于二阶统计量的循环平稳区,以最大限度获取衰落信道自相关信息,提高预测精度.为此我们提出如图

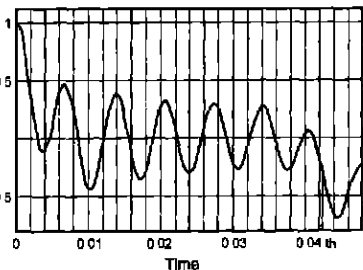


图 1 实际测试自相关值分布

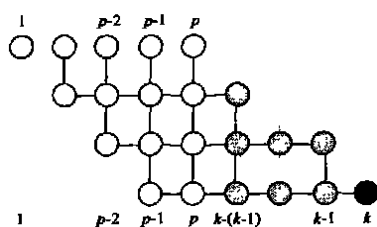


图 2 修正 K 步前向预测算法模型

2 所示实时修正 K 步前向信道预测模型,其工作过程简述如下:

- (1) 设定无线信道衰落预测的采样数据点数 p , 前向预测阶数 K ;
 - (2) 在一个信道采样周期里,利用 p 个采样数据以速率 T/K 对 m 时刻 ($m \in K$) 信道衰落进行插值预测;
 - (3) 利用前面 p 个采样数据及 m 时刻预测数据对下一时刻数据进行预测;
 - (4) 重复步骤 3, 直至 k 时刻信道衰落预测结果;
 - (5) 更新信道衰落系数估计矢量和信道衰落系数矢量.
- 显然上述线性预测算法对 k 时刻的信道衰落预测值为:

$$\hat{c}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{D}_k^T = \sum_{j=0}^{p+K-2} d_j c_{k-j} = \sum_{j=0}^{p-1} d_{kj} c_{k-j} + \sum_{j=1}^{K-1} \tilde{d}_{kj} \tilde{c}_j \quad (5)$$

其中 k 时刻信道衰落系数估计矢量 \mathbf{D}_k 由两部分组成:信道采样数据估计矢量 ($d_{k0}, d_{k1}, \dots, d_{k(p-1)}$), 和信道预测修正矢量 ($\tilde{d}_{k1}, \tilde{d}_{k2}, \dots, \tilde{d}_{k(K-1)}$), 分别应预测信道衰落估计系数 c_{k-j} 和子预测信道衰落估计系数 \tilde{c}_j . 仍然按式(3)动态更新信道衰落系数估计 \mathbf{D} .

假设信道低采样率条件下落入循环平稳区的数据个数是 $M(k+p > M > p)$, 将其分解为循环平稳区数据和突变区数据两类, 则式(5)进一步推导为:

$$\hat{c}_k = \sum_{j=k+p-M}^{k-1} \tilde{d}_{kj} \tilde{c}_j + \sum_{j=0}^{M-1} d_{kj} c_{k-j} \quad (6)$$

仍然在 MMSE 准则下利用全极点 AR 模型进行线性预测, 此时信道预测误差为:

$$MSE(\tilde{k}, p) = E[|e|^2] = E[|c_k - \hat{c}_k|^2] \quad (7)$$

根据误差信号与采样信号的正交性, 式(7)进一步推导为:

$$MSE(\tilde{k}, p) = 1 - \sum_{j=0}^M d_j r_{k+j} - \sum_{j=k+p-M}^{k-1} \tilde{d}_{kj} \tilde{r}_{k-j} \quad (8)$$

其中, $r_m = E[c_n c_{n+m}^*]$, $\tilde{r}_m = E[\tilde{c}_n \tilde{c}_{n+m}^*]$.

上述分析也同时表明,具有同样循环平稳区内采样数据情况下,与式(2)和(4)所示普通 K 步预测算法预测值和预测误差相比,修正 K 步预测算法等效循环平稳区平移,因而更加有效利用循环平稳区内信道衰落采样信号,表现在最小均方误差中误差消除分量的增加.

5 算法仿真与结果

为验证修正 K 步预测算法对预测误差的改善作用,我们以门限自适应功率控制环的恒包络系统为例进行了仿真实验.恒包络系统的等效基带信息具有恒定包络,容易证明恒包络系统加性白色高斯噪声 n_k 信道中, Nyquist 采样可以直接获得无线信道衰落状况,与具体发射序列无关,亦即信道衰落采样和预测是盲的,无需导频序列的辅助.另外功率控制环路采用的是简单功率控制算法^[6].

仿真实验中其他参数如下: Jake 衰落信道, 加性高斯白噪声(功率谱密度 N_0), 最大多普勒频率 100Hz, 信道采样率 $f_s = 500\text{Hz}$. 考虑到视频传输领域的应用, 信源数据率 1MHz, BPSK 调制, 非相关解调. 整个传输过程中未采用任何形式的信道编码和交织.

上述仿真条件下信道预测和跟踪结果示于图 3。可以看到修正算法能够很好地对信道衰落进行估计和预测。更进一

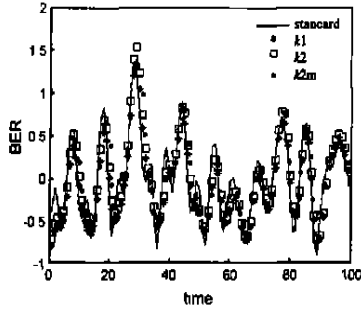


图 3 K 步预测算法 ($k=1,2$ 分别以 $k1, k2$ 表示) 和修正 K 步预测算法 (以 $k2m$ 表示, $\sim \sim$) 信道估计与预测结果与标准信道衰落比较. SNR = 20, 功率控制门限 $\text{th}=0.2$, 自适应 LMS 预测.

总体上看, 信噪比较低时由于采样数据被噪声污染严重, 信道衰落估计和预测较为困难, 系统误码率较高, 修正算法的误码率改善效果不明显, 但是在多谱勒频率较低时已有所体现. 随着信噪比的提高, 修正预测算法对系统传输误码率的改善作用逐渐显著, 即使是在多谱勒频率较高时亦是如此. 原因在于低采样率情况下, 随着 K 值的增加, 虽然远端采样数据将落入自相关函数突变区, 数据相关性的降低导致循环平稳区信道衰落系数估计矢量有效集缩小, 预测精度下降, 误码率增加, 但修正预测算法, 由于 $K-1$ 个 p 阶单步预测数据的插值导入, 使得信道衰落系数估计矢量有效集有扩大趋势, 因而能够改善预测精度.

另外实验还表明 Doppler 频率较低时, 信道采样数据自相关函数值的波动性较弱, 信道循环平稳性相对较强, 因而修正算法的预测精度较高, 误码率改善程度也相应较高.

6 结论

本文在接收采样数据二阶统计特性基础上, 注意到其循环平稳特性突变是导致预测失效的根本原因, 通过提取采样数据与信道衰落数据间相关性信息, 提出了一种基于自相关函数插值的修正 K 步前向预测算法, 适用于高速无线信道. 衰落估计及预测误差的数学分析和无线 Jakes 信道恒包络系统衰落仿真结果表明了该算法在提高信道预测精度方面的有效性.

参考文献:

- [1] Thomas Keller, Laios Hanzo. Adaptive Multicarrier Modulation: A Convenient Framework for Time Frequency processing in Wireless Communication [A]. Proceedings of IEEE [C]. 2000, 88: 611–640.
- [2] H Matsuoka, S Sampei. Adaptive modulation system with variable coding rate concatenated code for high quality multimedia communication systems [A]. Proceedings of VTC [C]. 1996, 478–491.
- [3] J M Torrance, L Hanzo. Optimization of switching levels for adaptive

步, 在系统采用非相关解调时, 功率控制系统采用 K 步和修正 K 步预测算法所产生的误码率结果如图 4 和图 5 所示.

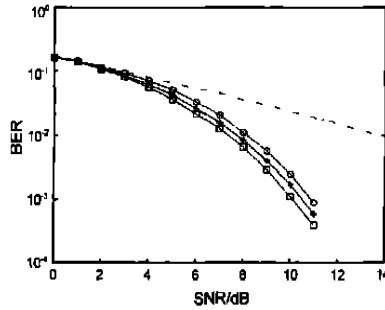


图 4 同等功率控制条件下, K 步预测算法 ($k=1$: \diamond $\sim \sim$ \diamond ; $k=2$: \circ $\sim \sim$ \circ) 与修正 K 步预测算法 ($k=2$: $*$ $\sim \sim$ $*$) 及未加功率控制算法普通 K 步预测算法 ($\sim \sim \sim$) 误码率性能与信噪比关系比较. 功率控制门限 $\text{th}=0.2$.

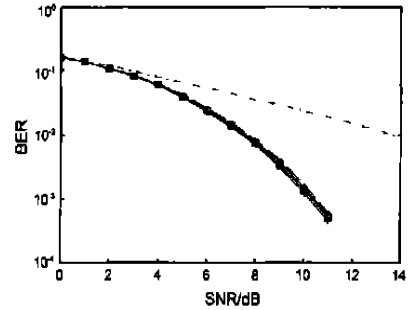


图 5 不同 Doppler 频率 (100Hz, 70Hz, 50Hz, 30Hz, 10Hz) 下功率控制修正 K 步预测算法及未加功率策略算法 ($\sim \sim \sim$) 误码率性能与信噪比关系比较. 功率控制门限 $\text{th}=0.2$.

modulation in slow rayleigh fading [J]. Electron Lett, 1996, 20 (32): 1167–1169.

- [4] Ekman T. Analysis of the LS estimation error on a Rayleigh fading channel [A]. Proceedings of VTC [C]. 2001, 1: 372–376.
- [5] Lars Lindbom. Tracking of time varying mobile radio channels. 1. The Wiener LMS algorithm [J]. IEEE Transactions on communications, 2001, 49 (12): 2207–2217.
- [6] Tugay Eyceoz, Alexandra Duah-Hallen. Adaptive Prediction, Tracking and Power Adjustment for Frequency Non Selective Fast Fading Channels [A]. Mini Conference of Communication Theory [C]. 1999, 1–5.
- [7] Hallen H. A physical model for wireless channels to provide insights for long range prediction [A]. Proceedings of MILCOM [C]. 2002, 1: 627–631.
- [8] Proakis J G. Digital Communications [M]. Mc. Graw Hill, New York, NY, third edition, 1995.

作者简介:



王宏远 男, 1946 年出生, 毕业于北京理工大学无线系, 1984–1985 年留美访问学者, 现为华中科技大学电子与信息工程系数字视频与通信中心主任, 教授, 博士生导师, 主要研究方向是多媒体通信, 信道辨识, 数字信号处理等. E-mail: wythywl@public.wh.hb.cn



余国文 男, 1967 年出生, 1996 年获华中科技大学通信与电子系统硕士学位, 现为华中科技大学电子与信息工程系 2000 级博士研究生, 主要研究方向是数字视频通信, 信道估计, 目标识别, 通信系统差错平台控制等.