

OFDM 系统中时变信道参数的估计

崔会亮, 穆晓敏, 杨守义, 齐 林

CUI Hui-liang, MU Xiao-min, YANG Shou-yi, QI Lin

郑州大学 信息工程学院, 郑州 450001

College of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China

E-mail: huyun_1983@yahoo.com.cn

CUI Hui-liang, MU Xiao-min, YANG Shou-yi, et al. Parameters estimation of time-varying channel in OFDM system. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(3): 164-166.

Abstract: The wireless channel with time-varying distortion deteriorates the performance of communication systems seriously. So the parameters of time-varying channel have to be estimated exactly for the best design of system and equalization in the receiver. This paper proposes an algorithm to estimate the parameters of time-varying channel based on Wigner-Hough Transform (WHT) and parametric channel model, with a single-component Linear-Frequency Modulated (LFM) signal inserted into the symbols sending to detect the channel in the Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) system. In the algorithm, we employ the Minimum Description Length (MDL) criterion to detect the number of paths in the channel. Then WHT and FFT can detect and estimate the parameters of time-varying channel from the received pilot signals. The simulation results show that the proposed algorithm exhibits good performances.

Key words: time-varying distortion; LFM; MDL criterion; WHT; OFDM

摘 要: 无线信道中的时变衰落对通信系统的性能会产生极其恶劣的影响, 必须精确的估计出时变信道的参数以便更好的设计通信系统以及在接收端进行有效地均衡。提出了一种基于单分量线性调频(LFM)信号的时变信道参数估计方法。该方法通过发射单分量 LFM 信号作为正交频分复用(OFDM)系统的导频信号来探测时变信道, 在接收端用最小描述长度(MDL)标准来检测信道的多径数目, 并用 Wigner-Hough 变换(WHT)联合 FFT 进行时变信道参数估计。仿真结果表明该算法有良好的估计性能。

关键词: 时变衰落; 线性调频; 最小描述长度; Wigner-Hough 变换; 正交频分复用

文章编号: 1002-8331(2008)03-0164-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TN911

1 引言

随着无线移动通信技术的发展, 对快速移动中的高数据率通信提出了越来越高的要求。正交频分复用(OFDM)技术以其抗多径衰落和高频带利用率的优点而被广泛。

伴随快速移动和高数据率通信使得无线信道同时具有时间和频率双重选择性衰落, 而对时变信道参数的精确估计直接影响 OFDM 系统性能。OFDM 信道估计算法已有很多研究, 主要分为盲和半盲信道估计方法, 盲信道估计方法需要大量的观测数据, 不利于实时处理, 故实际中多使用发射训练序列的半盲信道估计方法。常用的方法有最小二乘(LS)算法, 最小均方误差估计(MMSE), 最大似然估计(MLE)^[1]等, 它们多是非参数化估计方法。时变信号的频率随时间而变化, 且具有很强的抗干扰能力, 而时频工具可以有效地分析信号在时频域的局部特性。所以近年来, 基于参数化信道模型, 以时变信号尤其是线性调频(LFM)信号作为导频信号, 利用其瞬时频率中包含的丰富信道信息^[2], 进行参数化信道估计的方法越来越受到人们的关

注。该方法早期由 S.Barbarossa 提出^[2], A.Papandreou-Suppappola 等人利用时频工具在这方面做了大量的工作^[3-5]。在文献[6]中, 使用了多分量 LFM 信号来估计时变信道的参数, 但需要作两次时频变换, 复杂度较高。

本文提出了一种基于参数化信道模型的时变信道参数估计方法。该方法通过发射单分量 LFM 信号作为 OFDM 系统的导频信号, 利用 MDL 标准检测信道的多径数目, 再利用 WHT 构造相关函数联合 FFT 来估计出信道的参数。

2 系统模型及相关公式

2.1 OFDM 系统模型

在 OFDM 系统中^[7], 每个符号是多个经过调制的子载波信号之和, 其中每个子载波的调制方式可以选择相移键控(PSK)或者正交幅度调制(QAM)。用等效基带信号来描述 OFDM 系统的输出信号为:

基金项目: 河南省重点科技攻关项目(the Science and Technology Breakthrough of Henan Province under Grant No.0623051400)。

作者简介: 崔会亮(1983-), 男, 硕士生, 主要研究领域为时变信道估计; 穆晓敏(1955-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为通信信号处理、图像信号处理、通信系统的抗干扰技术、图像数字水印技术; 杨守义(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为图像信号处理、弱信号检测、图像数字水印技术; 齐林(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究领域为现代信号处理和通信系统。

$$x(t) = \sum_{n=-N/2}^{N/2-1} d_{n+N/2} \exp[j2\pi \frac{i}{T} (t-t_s)] \quad t_s \leq t \leq t_s+T \quad (1)$$

上式中 $d_n(n=0, 1, \dots, N-1)$ 是分配给每个子信道的数据符号, N 表示子信道的个数, T 表示 OFDM 符号的宽度, t_s 为信号的开始时间。

2.2 参数化信道模型

时变衰落信道的冲激响应常采用离散时间 FIR 滤波器模型, 可以用 $h(t, \tau)$ 来表示^[7], 即:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=0}^{L-1} h_n e^{j2\pi f_n \tau} \delta(\tau - \tau_n) \quad (2)$$

其中, $h_n = H_n e^{j\phi_n}$ 为多径信道的衰落系数, τ_n 和 $f_n, n=1, \dots, L-1$, 表示各条路径上的多径时延和多普勒频移, $\delta(\cdot)$ 狄立克雷函数。而信道的输出信号可以表示为:

$$y(t) = \sum_{n=0}^{L-1} h_n e^{j2\pi f_n t} x(t - \tau_n) + v(t) \quad (3)$$

其中, $x(t)$ 表示输信号, $v(t)$ 为加性高斯白噪声。特别的, 当无线信道处于慢衰落状态即有较小的多普勒频移时, 可以将信道信道模型简化为:

$$h(t, \tau) = \sum_{n=0}^{L-1} h_n \delta(\tau - \tau_n) \quad (4)$$

此时可忽略多普勒频移对系统性能的影响, 称为多径或慢衰落信道。本文提出的算法将对时变信道最重要的两个参数 τ_n 和 f_n 进行估计。

2.3 WHT 定义及其离散形式

Wigner-Ville 分布(WVD)是应用最广泛的一种时频分布^[8], 能同时描述信号在时域和频域的局部特征, 具有许多优良特性。它的连续时间形式可以表示为:

$$WVD_x(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (5)$$

离散形式可以表示为:

$$DTWVD_x(n, f) = 2T \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(n+kT) x^*(n-kT) e^{-j4\pi kT f} \quad (6)$$

其中, T 为采样时间间隔, $(\cdot)^*$ 代表复共轭, $x(t)$ 为要处理的信号。它对单分量 LFM 信号有很好的时频聚集性, 但从定义来看, 本质上是一种双线性变换, 对于多分量信号将出现“交叉项干扰”, 这将对信号参数的估计产生不利影响。所以 S.Barbarossa 将 WVD 与 Hough 变换(HT)相结合, 提出了 Wigner-Hough 变换(WHT), 它能有效地抑止“交叉干扰项”, 最初被用于多分量 LFM 的分析^[9], 其连续时间形式可以表示为:

$$WHT_x(f, g) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \frac{\tau}{2}) x^*(t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi(f+g)\tau} d\tau dt = \int_{-\infty}^{\infty} WVD_x(t, f+gt) dt \quad (7)$$

离散形式可以表示为:

$$DTWHT_x(f, g) = \sum_{n=0}^{N/2-1} \sum_{k=-n}^n x(n+k) x^*(n-k) e^{-j4\pi k(f+gn)} + \sum_{n=N/2}^{N-1} \sum_{k=(N-1-n)}^{N-1-n} x(n+k) x^*(n-k) e^{-j4\pi k(f+gn)} \quad (8)$$

其中, N 为总采样点数。WHT 每一点的值是对 $x(t)$ 的 WVD 沿直线 $f_0(t) = f + gt$ 积分得到的, 而 LFM 信号的 WVD 聚集在直线

$f(t) = f_0 + \mu t$ 上。若发射 LFM 信号做导频信号, 则在多径信道下, 接收端的导频信号是在时间上有重叠的多径信号的叠加。采用 WHT 对接收到的导频信号进行检测, 通常利用极坐标形式来实现, 由于其调频率不变, 在一个最优变换角度上即 $\mu = g$ 时, 会出现多个峰值, 分别对应不同的瞬时频率。这种方法利用 LFM 信号作为导频信号, 故调频率已知, 不需要重构发射端的信号, 不存在文献[10]中指出的调频率估计误差噪声导致的时变信道参数估计性能下降的问题。

3 多径信道参数估计算法

3.1 多径数目的检测

由时变衰落信道的冲激响应表达式可知, 可以将一个时变衰落信道看成 L 个冲激的叠加。对于多径数目的检测, 通常采用的方法是门限比较法, 也可以使用特征值分解或子空间的方法, 但是这些方法主观性比较强, 精确度较差。本文采用 MDL 标准来检测多径数目, 以循环矩阵代替信道矩阵, 利用空间平滑技术和正反向平均的方法来减小信道矩阵的相关性^[7,11]。

将单分量 LFM 信号作为每一帧发送信号的第一个符号插入到要传输的数据中, 使其经过时变衰落信道, 然后通过接收到的导频信号进行处理得到时变信道的参数。本文所提算法的框图如图 1 所示。

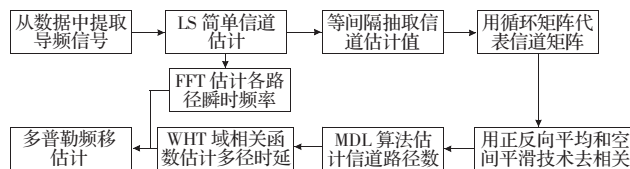


图 1 参数估计算法框图

单分量 LFM 信号可以表示为:

$$x(t) = e^{j(2\pi f_0 t + \pi \mu t^2)} \quad (9)$$

其中, f_0 为初始频率, μ 为调频率, 从上式也可以看出, LFM 信号的相位中含有丰富的信息, 尤其是瞬时频率中包含的信息可以用来对信道参数作精确的估计^[13]。在接收端首先利用 LS 算法进行粗略信道估计, 再对获得的估计值进行等间隔抽取, 构造出等效循环卷积矩阵, 可以表示为:

$$H = \begin{bmatrix} h'(1) & h'(2) & \dots & h'(P) \\ h'(2) & h'(3) & \dots & h'(P+1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h'(M-P) & h'(M-P+1) & \dots & h'(M) \end{bmatrix} \quad (10)$$

上式中, M 是对估计值抽取得到的总长度, Δ 为抽取间隔, P 为抽取值的循环舍弃长度, $M-P$ 是子阵列的长度。然后通过正反向平均方法构造出信道的相关矩阵如下:

$$R_{FB} = \frac{1}{2} (HH^H + JHH^H J) \quad (11)$$

其中, $(\cdot)^H$ 表示共轭转置, J 为置换矩阵(除反对角线上元素为一外, 其余元素皆为 0), 对 R_{FB} 进行特征值分解, 可以得到 $\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_{M-P}$ 为相关矩阵的特征值由大到小的排列, 此时使用 MDL 标准来检测多径信道的路数, 其数学表述为:

$$L(d) = -(M-P-d) \log \left\{ \frac{\left(\prod_{m=d}^{M-P} \lambda_m \right)^{\frac{1}{M-P-d}}}{\frac{1}{M-P-d} \sum_{m=d}^{M-P} \lambda_m} \right\} \quad (12)$$

多径数目由下式来决定:

$$\hat{d} = \arg \min_{d \in 1, \dots, M-P} L(d) \quad (13)$$

其中, $\arg \min_d L(d)$ 表示使 $L(d)$ 最小的 d 值。但是必须保证 $D \leq M-P$, D 为真实的多径数目。

3.2 多径时延和多普勒频移的估计

将单分量 LFM 信号 $x(t)$ 代入到式(3)中,可以得到:

$$y(t) = \sum_{n=0}^{L-1} h_n e^{j2\pi f_n t} x(t-\tau_n) + v(t) = \sum_{n=0}^{L-1} h_n e^{j\pi[2f_0(t-\tau_n) + \mu(t-\tau_n)^2 + f_n]} + v(t) = \sum_{n=0}^{L-1} h_n e^{j\pi[2f_0 t - \mu t \tau_n + f_n t + \mu t^2 + \mu \tau_n^2 - 2f_n \tau_n]} + v(t) \quad (14)$$

从上式可以看出,经过时变衰落信道后,各路径所对应的瞬时频率可以表示为:

$$IF_n = f_0 - \mu \tau_n + f_n \quad (15)$$

在接收端经过 LS 信道估计后,相当于进行了解线调作用,消去了二次项,只剩下瞬时频率和瞬时相位部分,可以用 FFT 来精确的估计瞬时频率得到 IF_n 。同时对导频信号在接收端和发射端分别进行对应于调频率 μ 的最优 WHT 检测,得到 $WHT_x(t, f)$ 和 $WHT_y(t, f)$,再定义相关函数:

$$F(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} WHT_x(t, f) WHT_y(t+\tau, f) dt \quad (16)$$

对应不同路径的时延值 τ_n 会在相应的位置出现峰值,通过一维搜索^[12],即可得到各条路径的时延估计值 $\hat{\tau}_n$ 。将其带入到式(15)中,即可得到各路径的多普勒频移估计值为:

$$\hat{f}_n = IF_n - f_0 + \mu \hat{\tau}_n \quad (17)$$

4 仿真结果及性能分析

为了验证本文算法的有效性,给出了蒙特卡罗仿真的结果。在仿真中,假设信道有 6 条路径,最大多普勒频移为 100 Hz,采样间隔为 0.05 μ s。对 LS 算法得到的信道估计值进行抽取的间隔 $\Delta=32$,总抽取长度 $M=17$,循环舍弃长度 $P=6$,初始频率 $f_0=7.6$ MHz,调频率 $\mu=0.4$ MHz/ μ s,OFDM 系统中采用 16QAM 调制方式,子载波数 $N=512$,FFT 变换点数为 1 024,第一条路径时延为 0,最大时延为 80 个采样间隔。图 2 为信噪比是 0 dB 条件下,接收端导频信号进行 WVD 并在时频二维平面投影的结果。从图 2 中可以看出,经过时变衰落信道后的单分量 LFM 信号在时频平面内模糊不清,无法进行精确的参数估计。

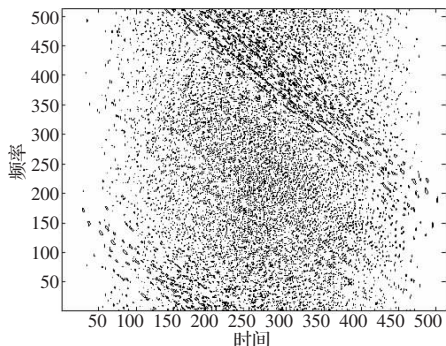


图2 接收端导频信号的 WVD 结果

图 3 所示为对上述导频信号在接收端进行的 WHT 结果。从图中可以看出,WHT 对经过时变衰落信道的 LFM 信号有很好的检测性能,在一个最优变换角度上有对应多径效应的多个

峰值。图 4 为采用相关函数利用接收端导频信号进行多径时延直接估计的结果。从图 4 中可以看出,对应于多径信号的时延扩展,在 WHT 域存在有明显的峰值,可以很方便的进行多径时延估计。

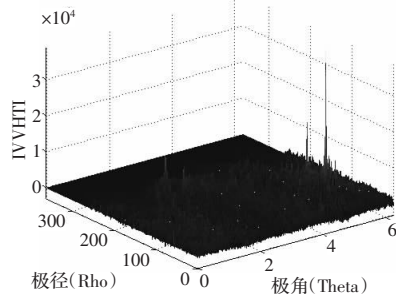


图3 接收端导频信号的 WHT 结果

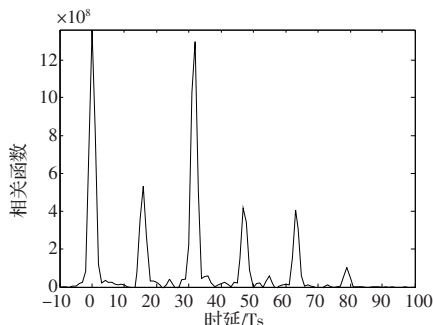


图4 采用相关函数对多径时延进行估计的结果

图 5 所示为采用 MDL 标准检测多径数目的效果,可以看出,随着信噪比的增加正确检测的概率接近于 1。图 6 所示为所提算法的平均估计误差的方差性能曲线和 LFM 信号的参数估计 CRLB 的比较^[13,14],从图 5 中可以看出,时变信道参数估计的平均误差随着信噪比的增加而下将,并且逐渐接近 CRLB,证明本文所提方法是有效的。

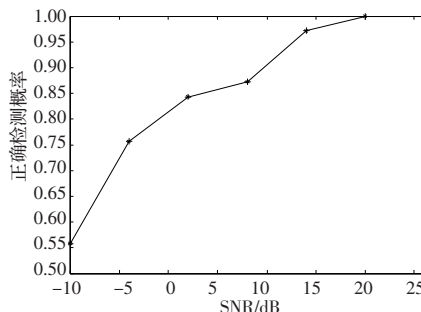


图5 MDL 标准检测多径数目的正确概率

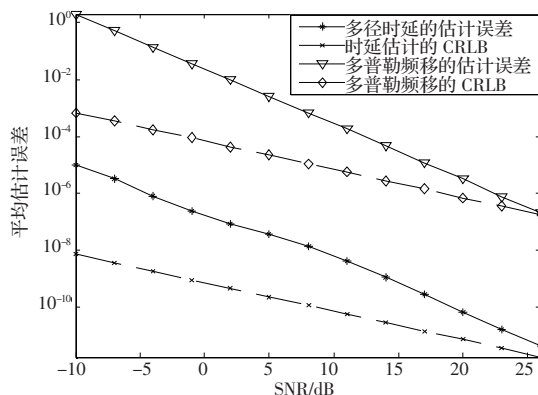


图6 参数估计的平均误差性能曲线 (下转 209 页)