

采用循环前缀的OFDM信道盲估计算法

佟卫华

(唐山广播电视大学丰南分校 河北 唐山 63000)

【摘要】在无线OFDM通信系统中,信道参数估计一直备受关注。该文基于最大似然估计原理,提出了一种改进的盲信道估计算法,利用并根据循环前缀的周期平稳性来进行信道盲估计。该算法是在接收端DFT之前进行信道估计和均衡。研究和仿真表明,该算法不仅显著地减少了运算的复杂度,而且使系统性能也得到了一定程度的改善。

关键词 盲信道估计; 最大似然估计; 正交频分复用
中图分类号 TN919 **文献标识码** A

Blind Channel Estimation Using the Cyclic Prefix for OFDM Systems

TONG Wei-hua

(Tangshan Radio & TV University at Fengnan Tangshan Hebei 63000)

Abstract Channel estimation is a very important problem that has been paid much attention in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) communication system. In this paper, an improved blind OFDM channel estimation algorithm based on maximum likelihood is proposed. The improved algorithm uses the cyclic prefix (CP) processing to implement channel blind estimation. It estimates the influence of the OFDM channel before DFT. The analysis and simulation results show that the method proposed both reduces the computation complexity obviously and improves its performance in theory.

Key words blind channel estimation; maximum likelihood estimation; OFDM

OFDM系统中的盲信道估计方法可分为统计型和确定型方法^[1]。统计型方法^[2-3]的计算量较小,但是估计精度不高且需要大量的接收信号,难以适应高速移动环境;而确定型方法^[4-5]的估计精度较高,不需要很多的接收信号,有可能应用于高速移动环境,但是其计算量较大而难以实用。

本文提出的方法属于确定型估计方法。其基本原理是利用循环前缀的周期平稳性,运用最大似然估计方法,在DFT运算之前对信道特性进行估计,并使用估计的信道参数对接收的信号进行补偿,最后再将补偿后的接收信号进行DFT运算。

文献[6]提出利用OFDM符号的循环前缀对信道进行估计,由于子载波利用率仅为1/2,因此传输效率大为降低。为了提高传输效率,文献[7]提出了一种适于I/Q两路调制的信道估计算法,将所有的子载波均用于传输数据,原理与文献[6]基本相同,其传输速率比前者提高了将近一倍。

1 选用的OFDM系统

通过使用正交基函数(如逆傅里叶变换IDFT),OFDM系统将谱成型信道分割成多个并行的子信道^[8]。图1所示为OFDM调制系统的原理框图。由图可知,数据输入比特先映射成QAM数据流,再串并变换形成各子信道传输的符号块。每个块有 N 个QAM数据,即 $X_k = [X_{0,k}, X_{1,k}, \dots, X_{N-1,k}]$ 构成IFFT的输入数据,其中 $X_{i,k}$ 为第 k 个输入数据块的第 i 个子载波上的输入数据。经过IFFT变换后的结果为 $x_k = [x_{0,k}, x_{1,k}, \dots, x_{N-1,k}]$ 。为了减少或有效地抑制由于信道记忆引起的ISI,在传输前先将 x_k 的最后 M 个数据 $d_k = [x_{N-M+1,k}, x_{N-M+2,k}, \dots, x_{N-1,k}]$ 加在 x_k 前面一起组成被传输的OFDM码字。接收端收到数据后,将循环前缀部分 $z_k = [y_{N-M+1,k}, y_{N-M+2,k}, \dots, y_{N-1,k}]$ 共 M 个数据丢弃,而将后 N 个数据 $y_k = [y_{0,k}, y_{1,k}, \dots, y_{N-1,k}]^T$ 用于FFT运算,得到 $Y_k = [Y_{0,k}, Y_{1,k}, \dots, Y_{N-1,k}]^T$ 。

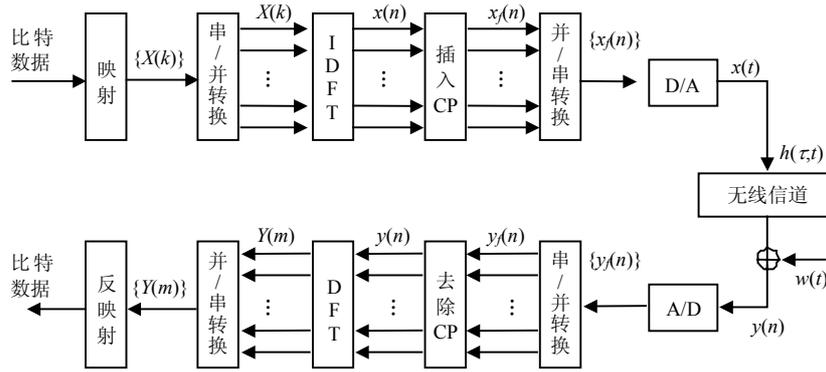


图1 数字OFDM系统的基本模型

2 基于循环前缀的联合最大似然信道估计和均衡算法

为了消除由于信道的多径时延造成的前后OFDM符号间干扰，OFDM系统加入了循环前缀，它与OFDM符号最后一段的信号相同，在系统中引入了冗余信息，接收端可以利用这种冗余进行信道估计^[9]。

将循环前缀组合在一起，同时将相应的接收数据也组合在一起，即有：

$$d = \{\dots, x_{N-M+1,k-1}, \dots, x_{N-1,k-1}, x_{N-M+1,k}, \dots, x_{N-1,k}, \dots\} = \{\dots, d_{k-1}, d_k, \dots\}$$

$$z = \{\dots, y_{N-M+1,k-1}, \dots, y_{N-1,k-1}, y_{N-M+1,k}, \dots, y_{N-1,k}, \dots\} = \{\dots, z_{k-1}, z_k, \dots\}$$

可以看作用于跟踪信道变化的训练序列，它们之间有如下关系：

$$z = d \otimes h + n \tag{1}$$

式中 \otimes 表示周期性卷积。考察当前码字接收数据的循环部分 $z_k = \{y_{0,k}, \dots, y_{m,k}, \dots, y_{M-1,k}\}$ 和当前码字发射数据的循环部分 $d_k = \{x_{0,k}, \dots, x_{m,k}, \dots, x_{M-1,k}\}$ 之间的关系， $0 \leq m \leq M-1$ 。运用联合最大似然估计法寻找能够使接收数据概率密度函数最大化的发射数据和信道参数，即搜索能够联合地最大化似然函数的一系列数值 (d, h, σ^2) ，最大似然函数为：

$$f(z|d, h, \sigma^2) = \prod_{n=1}^N \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{|z_n - \sum_{l=1}^L h_l d_{n+1-l}|^2}{2\sigma^2}\right) \tag{2}$$

考虑似然函数的常用对数，上述的最大化问题可以等价于最大化以 (d, h, σ^2) 为参数变量的以下函数：

$$L(z|d, h, \sigma^2) = -N \ln 2\pi\sigma^2 - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{n=1}^N |z_n - \sum_{l=1}^L h_l d_{n+1-l}|^2 \tag{3}$$

这个最大化问题可以通过将数据序列和信道参数交替作为变量，而保持其他参数固定的方法来解决。对于加性高斯噪声信道，与信道参数有关的最大化问题等效为线性最小均方LS问题。

由于似然函数的常用对数形式为参数 d, h, σ^2 的凹函数，因此可以通过将局部偏导置零来解决最大化问题。令 $h_l = a_l + jb_l$ ，其中， $1 \leq l \leq L$ (N 为CP的长度， L 为信道的多径数，假设 $L \leq N$)。分别求解 $L(z|d, h, \sigma^2)$ 对 $\sigma^2, a_i, b_i (i=1, 2, \dots, L)$ 的偏导，可得：

$$\frac{\partial L}{\partial \sigma^2} = -\frac{N}{\sigma^2} + \frac{1}{2\sigma^4} \sum_{n=1}^N |z_n - \sum_{l=1}^L h_l d_{n+1-l}|^2 \tag{4}$$

$$\frac{\partial L}{\partial a_i} = \frac{1}{\sigma^2} \Re \left\{ \sum_{n=1}^N d_{n+1-i}^* \left(z_n - \sum_{l=1}^L h_l d_{n+1-l} \right) \right\} \tag{5}$$

$$\frac{\partial L}{\partial b_i} = \frac{1}{\sigma^2} \Im \left\{ \sum_{n=1}^N d_{n+1-i}^* \left(z_n - \sum_{l=1}^L h_l d_{n+1-l} \right) \right\} \tag{6}$$

式中 $1 \leq i \leq L$ ；“*”代表复共轭。

从式(5)、(6)可以看出， h 是解决最大化问题的关键。

$$\sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^N d_{n+1-i}^* d_{n+1-l} h_l = \sum_{n=1}^N d_{n+1-i}^* z_n \quad 1 \leq i \leq L \tag{7}$$

如果数据序列 d_k (循环前缀) 在训练序列已经被接收的时间间隔内是已知的，式(7)可以变换为一个有关 h 的线性等式，通过该式可以容易地得到最大似然估计值为：

$$\hat{h}^T = D^{-1} C^T \tag{8}$$

式中 $L \times L$ 阶矩阵 D 和 $1 \times L$ 阶向量 C 分别为：

$$D = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N d_{k,n}^* d_{k,n} & \sum_{n=1}^N d_{k,n}^* d_{k,n-1} & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{k,n}^* d_{k,n+1-L} \\ \sum_{n=1}^N d_{k,n-1}^* d_{k,n} & \sum_{n=1}^N d_{k,n-1}^* d_{k,n-1} & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{k,n-1}^* d_{k,n+1-L} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{n=1}^N d_{k,n+1-L}^* d_{k,n} & \sum_{n=1}^N d_{k,n+1-L}^* d_{k,n+1-L} & \cdots & \sum_{n=1}^N d_{k,n+1-L}^* d_{k,n+1-L} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C = \left(\sum_{n=1}^N d_n^* z_n \quad \sum_{n=1}^N d_{n-1}^* z_n \quad \cdots \quad \sum_{n=1}^N d_{n+1-L}^* z_n \right) \quad (10)$$

另一方面,如果已知信道参数 h ,则数据序列 d 的ML估计值是使以下函数最小化的关键,即有:

$$\min = \sum_{n=1}^N |z_n - \sum_{l=1}^L h_l d_{n+1-l}|^2 \quad (11)$$

获得了信道系数 $\hat{h}(m)$ 的估计,接收端收到的OFDM信号为:

$$\hat{y}(n) = H^{-1} y(n) \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (12)$$

式中 H 为一个具有 Toeplitz 块结构的 $N \times (N+L-1)$ 矩阵; H^{-1} 为 H 的伪逆; $y(n)$ 为 $N \times 1$ 矢量, $\hat{y}(n)$ 为 $N \times 1$ 矢量,分别表示为:

$$H = \begin{bmatrix} \hat{h}_0 & \hat{h}_1 & \cdots & \hat{h}_{L-1} & \cdots & 0 \\ 0 & \hat{h}_0 & & & & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & & \hat{h}_0 & \cdots & \hat{h}_{L-1} \end{bmatrix}$$

$$y(n) = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{bmatrix}, \quad \hat{y}(n) = \begin{bmatrix} \hat{y}_0 \\ \hat{y}_1 \\ \vdots \\ \hat{y}_{N-1} \end{bmatrix}$$

基于循环前缀的联合最大似然估计算法的基本步骤为:(1) 利用前一次信道估计(首次则利用训练序列的信道估计)作为本次的信道响应 \hat{h}_{pre} 。(2) 根据现在的信道估计值 \hat{h}_{pre} ,找出式(11)的序列 \hat{d}_{pre} 。(3) 将现在的估计值 \hat{d}_{pre} 作为已知条件,通过求解式(8)找到 \hat{h} 的新估计值。(4) 重复步骤(1)~(3),直到前一次信道估计与该次信道估计值之差低于给定门限。(5) 把利用循环前缀估计出的 \hat{h} 作为该OFDM符号的信道估计值,对接收的数据进行估计。

3 仿真结果

本文通过Matlab对上述算法进行了性能评估。主要从误码率BER性能和信道冲激响应估计值的均方误差MSE两个角度来对算法性能进行了评估。

仿真的环境如下:发射信号经过不同的多径和

衰落信道到达接收端,且信道中只存在加性高斯白噪声,接收端已对符号严格定时同步,精确补偿了频偏。仿真中评估当信道多径数为1、4、8,最大多普勒频移为0、50、100 Hz时,而信噪比从0~20 dB时的系统性能。OFDM参数为子信道个数32,快速傅里叶变换长度为128。

本文在确定型信道盲估计算法中进行了大量的矩阵逆运算,如式(8)和(12)所示,故运算量大是盲估计算法的一个缺点。但是该算法中不需要整个接收信号向量参加矩阵逆运算,仅需要循环前缀的数据参加。而循环前缀的长度一般仅为数据符号长度的1/6~1/4,与其他盲估计算法相比,大大降低了算法的复杂度。

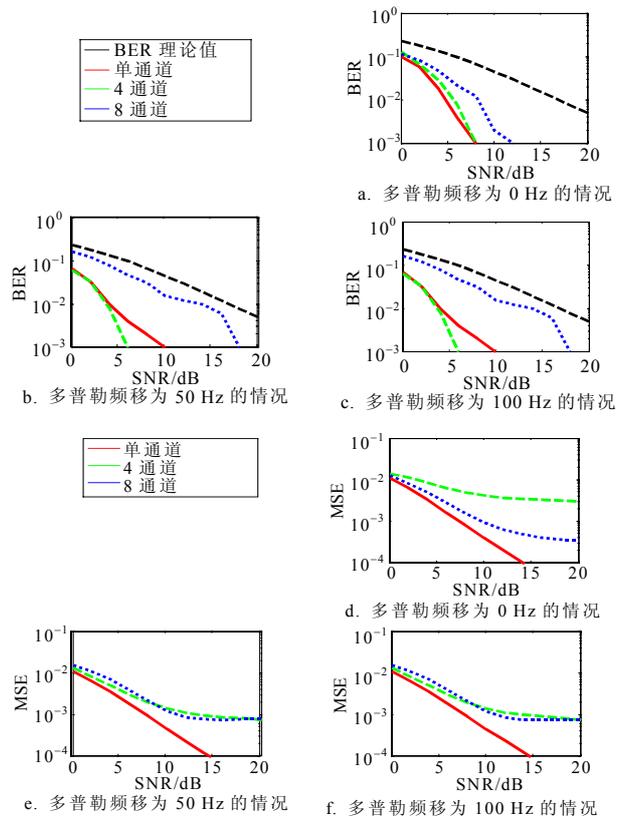
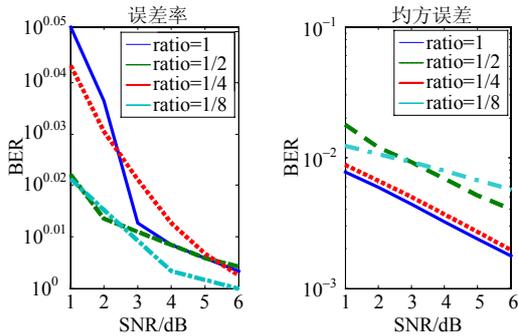


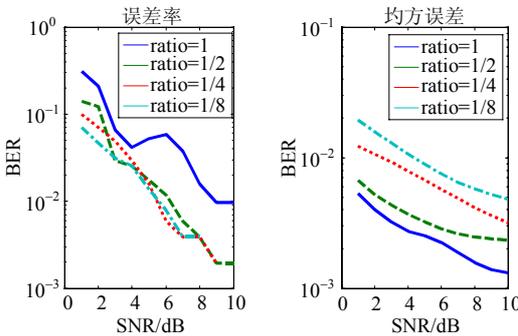
图2 不同无线信道环境下算法误码率和均方误差

仿真结果如图2~3所示。从图2可以看出,本文的算法在仿真的信道中对多普勒频移变化不太敏

感, 多普勒频移为50 Hz和100 Hz时的误码率和均方误差基本相同。



a. 循环前缀长度不同的情况



b. 假设信道长度不同的情况

图3 参数不同对系统性能的影响

从图3a可以看出, 循环前缀长度的变化对影响系统性能的影响不是太大。为了提高信道的利用率, 在消除多径延时的前提下, 应尽量减少循环前缀的长度。同时考虑到在信道参数估计中要计算循环前缀的相关, 故循环前缀的最小长度以不小于50为宜。

从图3b可以看出, 在不明确信道确切长度(即信道多径时延扩展的长度)的情况下, 可以适当增大信道长度 L 的取值, 信道长度的过估计对影响系统性能的影响不是太大。

4 结束语

本文提出的算法适用于慢变信道, 假设在一个

OFDM符号内信道的冲激响应不变。该算法仅利用了循环前缀进行相关运算, 运算量比使用整个OFDM符号进行盲估计的其他方法大为减少。该算法对循环前缀的长度变化不敏感, 但为了保证估计循环前缀的自相关的准确性, 一般要求循环前缀的长度不小于50。对信道长度的过估计不影响系统性能, 但会加大系统的运算量。

参考文献

- [1] 李 子, 蔡跃明, 阚春荣. OFDM系统中的盲信道估计[J]. 信号处理, 2005, 21(5): 1-2.
- [2] MUQUET B, COURVILLE M, DUHAMEL P. Subspace-based blind and semi-blind channel identification method for OFDM systems[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(7): 1699-1712.
- [3] ZHOU S, Muque T B, GIANNALDS G B. Subspace-based(semi-) blind channel estimation for block precoded space-time OFDM[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2002, 50(5): 1215-1228.
- [4] CHOTIKAKAMTHOM N, SUZUKI H B. On identifiability of OFDM blind channel estimation[J]. Proc VTC Amsterdam, 1999, 10: 2358-2361.
- [5] NECKER M, STIIBER G L. Totally blind channel estimation for ofdm over fast varying mobile channels[C]// IEEE International Conference on Communications. [S.l]: IEEE, 2002.
- [6] XIAO W W, LIU K J R. Joint channel estimation and equalization in multicarrier modulation system using cyclic-prefix[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. [S.l]: IEEE, 1999.
- [7] 邵怀宗, 彭启琮, 李玉柏. 在OFDM系统中用循环前缀对时变色散信道进行估计[J]. 电波科学学报, 2002, 17(5): 530-533.
- [8] WEINSTEIN S B, EBERT P M. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Communications, 1971, 19(5): 628-634.
- [9] BETRAND M, MARC DE C. Blind and semi-blind channel identification methods using second order statistic for OFDM systems[C]//IEEE International Conference. [S.l]: IEEE, 1999.

编辑 黄 莘