

基于小波去噪的 OFDM 信道估计新方法

郑宝玉 张继东

(南京邮电大学信号与信息处理研究所 南京 210003)

(江苏省电信有限公司传输局 南京 210003)

摘要 该文利用小波变换思想,提出一种基于小波去噪的正交频分复用(OFDM)系统信道估计的新方法,以解决含有噪声的 FDM 信道的估计问题。该方法首先利用最小二乘(LS)方法进行信道估计,然后对估计后的结果进行小波去噪处理。这个方法不需要预知任何信道统计特性,与一般的最小二乘信道估计方法相比,性能有很大提高。计算机仿真证明了其有效性。

关键词 信道估计, 小波变换, 噪声消除, 正交频分复用

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)03-0415-04

A New Wavelet-Based Denoising Method for OFDM Channel Estimation

Zhang Bao-yu Zhang Ji -dong

(Institute of Signal and Information Processing, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

(Telecommunication Transmission Department, Jiangsu Telecommunication Company Limited, Nanjing 210037, China)

Abstract In this paper a new method of OFDM channel estimation with noise reduction, based on wavelet transform, is given. The channel estimation algorithm is divided into least-squares estimation and noise reduction. The method does not need any statistical characteristic of channel and has good performance, compared with least-squares estimation. The conclusion is proved by computer simulation.

Key words Channel estimation, Wavelet transform, Noise reduction, Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)

1 引言

信道估计是无线通信领域的一个重要研究方向,它是进行相关检测、解调、均衡的基础。OFDM 多载波的出现,为信道估计技术的应用提供了新的空间。

信道估计从大的角度来分可以分为非盲估计和盲估计,以及在此基础上产生的半盲估计。在基于OFDM^[1-3]的新一代无线通信系统中,由于传输速率较高,并且需要使用相干检测技术获得较高的性能,因此通常使用非盲估计来获得较好的估计效果,这样可以更好地跟踪无线信道的变化从而提高接收机性能。

基于OFDM信道估计大多采用非盲估计算法。按导频插入位置,非盲估计算法可分为面向判决(全导频)方法^[4]和导频辅助调制(PSTAM)方法(离散导频)^[4-5];按实现准则,它可分为最小均方误差(MMSE)法、最小二乘(LS)法和最大似然估计(MLE)法^[6]等,其中MLE法与LS法等效;按滤波器实现及结构,它又可分为二维滤波^[7]和两个一维系统级联滤波等。

从理论和实现的效果来看,采用基于 MMSE 准则的信道估计器可以取得较好的效果,但由于基于 MMSE 的信道估计器需要知道信道的统计特性,而在实际过程中我们不能或者很难得到;采用 LS 准则的估计器不需要知道信道的统计特性,实现也较为简单,但其效果较差,尤其在低信噪比时性能更是如此。

鉴于以上情况,本文提出一种基于小波去噪方法的 OFDM 系统 LS 信道估计器,以消除或降低信道估计误差引起的噪声对系统性能的影响,改善 OFDM 系统在低信噪比下的性能。与文献[8]类似,二者均采用小波去噪方法来消除噪声。所不同的是,文献[8]利用小波去噪方法改善频谱编码传输系统性能;本文则研究小波去噪方法在 OFDM 系统 LS 信道估计中的应用。理论和仿真表明本文给出的方法具有较好的性能。

2 OFDM 系统模型

图 1 是基带 OFDM 系统的示意图。这里假设子载波数量为 N , 循环前缀(CP)的长度为 L 个样值, $g(\tau)$ 是信道的脉冲响

应^[9], 输入信号为 \mathbf{X} , 输出信号为 \mathbf{Y} ; 同时假设信道是一个多径衰落信道, 其脉冲响应为

$$g(\tau) = \sum_{k=0}^{M-1} \alpha_k \delta(\tau - \tau_k T_s) \quad (1)$$

式中 α_k 为第 k 条径的幅度, 它是零均值的复高斯随机变量, 其功率-时延分布为指数分布 $\theta(\tau_k) = Ce^{-\tau_k/\tau_{\text{rms}}}$ 的, 其中 τ_k 为CP长度上的均匀分布, τ_{rms} 为均方根宽度, C 为一常数. T_s 是系统的抽样周期. 实验仿真时 $M=5$.

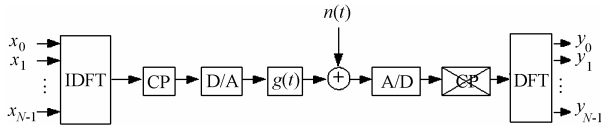


图1 基带 OFDM 系统

Fig.1 Base-band OFDM system

在 OFDM 系统中, 符号之间插入了循环前缀 CP 来保证各个载波间的正交性, 同时也消除了相邻符号间的符号间干扰(ISI). 假设信道是缓慢变化的, 可以认为信道在一个 OFDM 符号内是恒定的. 第 k 个载波上的衰落幅度 $h_k = G\left(\frac{k}{NT_s}\right)$, $k=0, \dots, N-1$, 这里 $G(\cdot)$ 是在一个 OFDM 符号间隔内的信道响应 $g(\tau)$ 的频率响应^[9], 这样就可以将该系统描述为一组并行的高斯信道, 如图2所示.

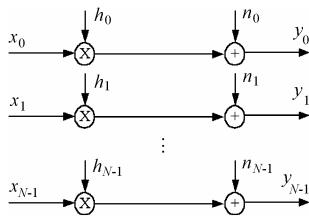


图2 OFDM 系统描述为一组并行高斯信道

Fig.2 OFDM system as a set of parallel Gaussian Channels

在这种情况下, 可将 OFDM 系统写成如下矩阵形式:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\mathbf{H} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中 \mathbf{X} 是包含所传输数据信号的对角矩阵, \mathbf{H} 是信道响应矩阵向量, \mathbf{n} 是均值为0、方差为 σ_n^2 的独立同分布复高斯噪声向量, 且噪声与信道不相关.

3 基于小波去噪的 OFDM 信道估计器

给定一信号 $f(t) \in L^2(\mathbb{R})$, 其连续小波变换为^[10]

$$W(a, b) = \int f(t) \bar{\phi}_{a,b}(t) dt \quad (3)$$

式中 $\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波函数, 它是由母函数 $\phi(t)$ 通过伸缩和平移得到的. 这里 a 为伸缩因子, b 为平移因子.

令 $a = 2^j, b = k2^j$, 则 $f(t)$ 可表示为

$$f(t) = \sum_j \sum_k c_{j,k} \tilde{\phi}_{j,k}(t) \quad (4)$$

式中 $\tilde{\phi}_{j,k}(t)$ 是 $\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \phi(2^{-j}t - k)$ 的对偶, $c_{j,k} = \int f(t) \cdot \bar{\phi}_{j,k}(t) dt$. 根据多分辨率分析理论^[9], 可得到离散小波变换公式为

$$c_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} h(n-2k) \quad (5a)$$

$$d_{j,k} = \sum_n c_{j-1,n} g(n-2k) \quad (5b)$$

这里在 $j=1, 2, \dots, J$ 时进行了离散小波变换, $c_{0,n}$ 即为 $f(t)$ 的离散形式 $f(n)$, 且 $f(n)$ 的重构公式为

$$f(n) = \sum_{j=1}^J \sum_{k \in \mathbb{Z}} d_{j,k} \tilde{g}_j(n-2^j k) + \sum_{k \in \mathbb{Z}} c_{J,k} \tilde{h}_J(n-2^J k) \quad (6)$$

式中 $\tilde{h}_1(n) = \tilde{h}(n)$, $\tilde{g}_1(n) = \tilde{g}(n)$, $\tilde{h}_{j+1}(n) = \sum_k \tilde{h}_j(k) \tilde{h}(n-2k)$, $\tilde{g}_{j+1}(n) = \sum_k \tilde{g}_j(k) \tilde{g}(n-2k)$; 其中 $h(n)$, $g(n)$ 是分析小波滤波器组; $\tilde{h}(n)$, $\tilde{g}(n)$ 是综合小波滤波器组.

实际信号中常含有噪声, 即实际信号通常包含有用信号和噪声两部分. 含噪信号经小波变换后, 将得到它在不同尺度下的细节信号和逼近信号. 可以证明^[8], 对应于噪声的细节信号的幅度及其方差随着尺度的增加会有规律地减小, 而对应于有用信号的细节信号的幅度和方差并不随着尺度的增大而减小. 利用含噪信号小波变换的这一特性, 可以通过选择一个门限, 然后利用该门限对经小波变换后的细节信号和逼近信号进行处理, 即可达到消除噪声的目的. 下面, 给出本文所提出的基于小波去噪的LS信道估计方法.

设 \hat{h}_{ls} 是通过LS方法得到的信道估计值, 它定义为^[4,11]

$$\hat{h}_{ls} = \mathbf{x}^{-1} \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{N-1} \\ x_0 & x_1 & \dots & x_{N-1} \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

式中 $y_k = x_k h_k + n_k, 0 \leq k \leq N-1$. 因此, 接收端的信道估计值为

$$\hat{h}_{ls,k} = h_k + \frac{n_k}{x_k} \quad (8)$$

由上式可以看出, 采用LS算法得到的第 k 个载频上的信道估计值 $\hat{h}_{ls,k}$ 由两项组成, 一项是信道的真实响应 h_k , 另一项是由于噪声存在所引入的干扰 n_k/x_k . 当信噪比较低时, 噪声的影响将会增大, 即 $\hat{h}_{ls,k}$ 中 n_k/x_k 值变大. 此时, 信道估计值 $\hat{h}_{ls,k}$ 与真实值 h_k 相比有较大的偏差. 在这种情况下, 可以采用小波去噪的方法对LS估计后得到的 $\hat{h}_{ls,k}$ 进行噪声抑制以减少 n_k/x_k 的影响, 从而提高估计的性能. 这就是本文所提出的算法的核心思想.

小波去噪过程如下: 首先对信号 \hat{h}_{ls} 进行小波分解(假设进行两层分解, 分解过程如图3, 图中 h 代表 \hat{h}_{ls} , cA_i 为第 i 级分解的近似部分, cD_i 为分解的细节部分, 而噪声通常包含在 cD_1, cD_2 中); 然后用门限的形式对小波系数进行处理; 最后对信号进行重建, 从而达到消除噪声的目的.

门限的选择对去噪效果有重要的影响。门限处理方法可分两种:其一为硬门限法,它将变换信号的绝对值与门限值比较,当变换信号的绝对值小于或等于给定门限时置为0,否则保持不变;其二是软门限法,它将比较后大于给定门限的值置为该值与门限值的差值。就去噪效果而言,采用硬门限法可能产生新的高频噪声,其效果一般比软门限法差。

门限选择准则如下:(1)无偏似然估计门限准则,即对于某一给定的门限,先对它进行似然估计,再将估计结果最小化,得到所需的门限。(2)固定门限方式;其门限取为 $\sqrt{2\log(x\text{的长度})}$,其中 x 为含噪信号。(3)启发式门限选择准则;这是一种基于最优预测的门限选择方式,当信噪比较小时其效果很好。

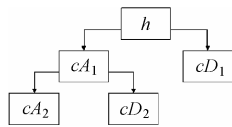


图3 信号的分解过程

Fig.3 Decomposition process of signal

4 仿真结果与性能分析

针对本文提出的基于小波方法的信道估计进行了仿真,仿真的无线信道已在第2节介绍,这里不再赘述。仿真中每个OFDM符号含有64个子载波,采用全导频方案。

图4给出了LS估计、小波去噪估计(估计时采用消失矩阶数为8的Daubechies小波和启发式阈值,分解尺度 j 分别为2和4)和奇异值分解(SVD)信道估计^[11]的误符号率(SER)性能比较。由图中可以看出,小波去噪估计的性能要远远好于LS估计,特别是尺度因子为2时,随着信噪比的增加其性能已接近使用信道相关统计特性的SVD信道估计的性能。这里分解尺度 j 为2的去噪估计好于尺度为4的去噪估计的原因是:尺度为4的去噪处理消除了过多的信号高频分量,使得有用信号本身的高频分量也被去掉。图5是对应的均方误差(MSE)的曲线,假设 h 为真实信道响应, \hat{h} 为估计信道响应,这里MSE定义为

$$MSE = E \left\{ |h - \hat{h}|^2 \right\} \quad (9)$$

图6和图7分别给出了不同量化门限值下OFDM系统中小波去噪估计的SER和MSE。从中可以看出,3种门限值的选择效果基本相当;相比而言,采用输入长度固定门限值的方法,在低信噪比时MSE相对较好。

图8和图9分别给出了Daubechies小波的小波消失矩阶数分别为 $N=2,5,8$ 时去噪估计的结果(分别记作db2,db5,db8)。由此可见,采用db8作为小波基效果较好。

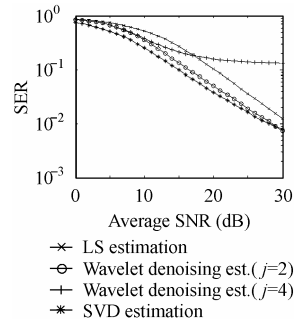


图4 信道估计的SER比较

Fig.4 SER for channel estimation

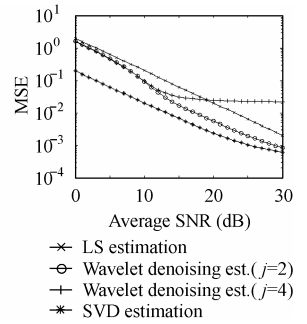


图5 信道估计的MSE比较

Fig.5 MSE for channel estimation

以上是在OFDM系统等效为一组并行的平坦衰落信道下的仿真结果。在某些情况下,OFDM系统的子载波间正交性可能被破坏。此时,基于小波去噪的LS算法的性能将有所下降,这是因为这种情况下接收端通过DFT变换后,由于载波不正交引入新的干扰,致使有用信号和噪声各自不同特征均有所弱化的缘故。

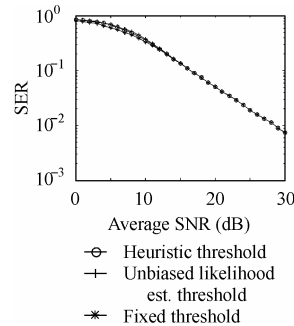


图6 不同门限下SER的比较

Fig.6 SER for different thresholds

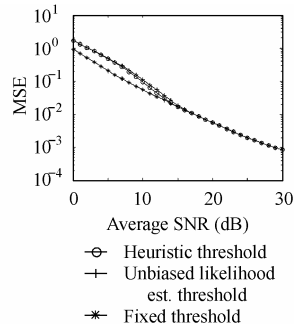


图7 不同门限下MSE的比较

Fig.7 MSE for different thresholds

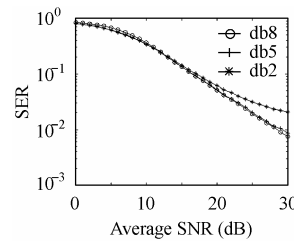


图8 不同Daubechies小波基估计的SER比较

Fig.8 SER for different Daubechies wavelet-bases

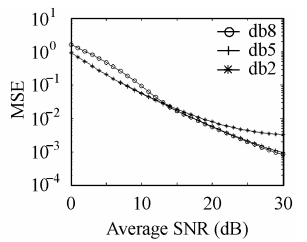


图9 不同Daubechies小波基估计的MSE比较

Fig.9 MSE for different Daubechies wavelet-bases

5 结束语

本文在LS信道估计算法的基础上,通过小波去噪处理来提高OFDM信道估计的精度。仿真结果表明了该方案的有效性,具有很好的应用前景。

参考文献

[1] Jr.Cimini L J. Analysis and simulation of a digital mobile channel

- using orthogonal frequency division multiplexing. *IEEE Trans. on Communications*, 1985, 33(7): 665 – 675.
- [2] 张继东, 郑宝玉. 基于导频的 OFDM 信道估计及其研究进展. *通信学报*, 2003, 24(11): 116 – 124.
- [3] Bingham J A. Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come. *IEEE Communications Magazine*, 1990, 28(5): 5 – 14.
- [4] Le Y. Pilot-symbol-aided channel estimation for OFDM in wireless systems. *IEEE Trans. on Vehicle Technology*, 2000, 48(7): 1207 – 1215.
- [5] Yang B G, Letaief K B, Cheng R S, Cao Z. Windowed DFT based pilot-symbol-aided channel estimation for OFDM systems in multipath fading channels. Proc.IEEE VTC'2000, Tokyo, Japan, 2000: 1480 – 1484.
- [6] Morellii M, Mengali U. A comparison of pilot-aided channel estimation methods for OFDM system. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2001, 49(12): 3065 – 3073.
- [7] Nilson R, Edfors O, Sandell M. An analysis of two-dimensional pilot-symbol assisted modulation for OFDM. Proc. IEEE ICPWC'97, Mumbai, U. S.A, 1997: 71 – 74.
- [8] 郭代飞, 高振明, 张坚强. 小波去噪在频谱编码传输中的应用. *电子学报*, 2000, 28(10): 127 – 129.
- [9] Proakis J G. *Digital Communications*. 3rd ed., U.S.A, Inc., McGraw-Hill, 1995: 680 – 694.
- [10] Vetterli M, Herley C. Wavelets and filter banks: Theory and design. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1992, 40(9): 2207 – 2232.
- [11] Edfors O, Sandell M, van de Beek J, *et al.*. OFDM channel estimation by singular value decomposition. *IEEE Trans. on Communications*, 1998, 46(7): 931 – 939.
- 郑宝玉: 男, 1945 年生, 教授, 研究方向为无线通信与网络信号处理、量子信息处理.
- 张继东: 男, 1976 年生, 博士, 研究方向为无线通信与网络信号处理、多媒体信息处理.