

基于 SVD 和小波变换的信道估计新方法

喻永华, 宋学瑞

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 在正交频分复用系统中, 发射的信号在频域中经历了乘性衰落的同时还经历了加性噪声的干扰, 从而影响了估计的质量。将小波去噪用于信道估计中以去除其中的加性干扰, 然后基于奇异值低阶近似算法对信道转移矩阵再进行低阶近似。仿真结果表明, 该运算的复杂度降低了, 提高了 SVD 系统估计的准确度。

关键词: LS 算法; 小波去噪; 奇异值

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)11-0052-03

A new way of channel estimation based on SVD algorithm and wavelet transform

YU Yong Hua, SONG Xue Rui

(College of Information Science and Engineering, Central South of University, Changsha 410083, China)

Abstract: The values of the estimated channel coefficients are composed of the multiplicative fading which is needed, and the additive fading which is negative to the quality of the estimation in the OFDM systems. Wavelet de-noising is used to impair the negative effect. Then using singular decomposition value (SVD) low rank approximation to achieve a superior performance. It has been validated that the method improved the system performance without increasing complexity.

Key words: LS algorithm; wavelet de-noising; SVD

近年来正交频分复用系统(OFDM)得到了广泛的应用。其基本原理是将高速的数据流分解为多路并行的低速数据流, 在多个载波上同时进行传输。数据流的串并转换有利于实现多种调制和变换以及保护间隔的加入, 达到在不同无线信道中传输的要求。在 OFDM 系统中, 信道估计是研究的热点之一, 是进行相干检测、解调和均衡的基础。

本文针对快慢衰落含噪无线信道提出了一种新的信道估计方法。它采用梳状导频子载波排列, 将 LS 算法与小波变换相结合, 然后对变换后的结果进行奇异值低阶近似。导频子载波中的加性噪声经小波变换中的阈值处理后, 再对其转移矩阵进行低阶近似。通过仿真可以发现, 地板效应得到良好的改善。

1 基于导频的 OFDM 信道估计

一种基于梳状导频信道估计的 OFDM 系统如图 1 所示。假设 OFDM 系统中, 每个 OFDM 符号的子载波总数为 N , L 为多径信道的径数, 其中共有 $M=N/L$ 个导频

子载波, $N-M$ 个信息子载波, 二进制信息数据经过调制后均匀插入导频, 频域信号可以表示为:

$$X(k) = X(mL+1) = \begin{cases} X_p(m), & l=0 \\ l=1, \dots, L-1 \end{cases} \quad (1)$$

$$l \in [0, L-1], m \in [0, M-1]$$

接收端的时域信号 $y_g(n)$ 可以表示为:

$$y_g(n) = x_g(n) \otimes h(n) + w(n) \quad (2)$$

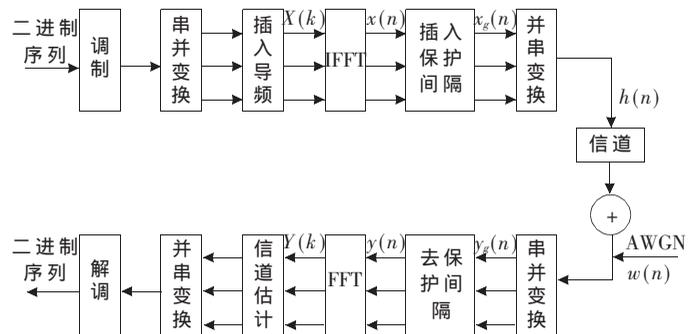


图 1 OFDM 系统框图

式中, $w(n)$ 为加性高斯白噪声, 去掉保护间隔后的信号为 $y(n)$, $y(n)$ 经过快速傅里叶变换 FFT 得到频域信号 $Y(k)$ 为:

$$Y(k) = X(k)H(k) + W(k) \quad (3)$$

式中, $W(k)$ 为 $w(n)$ 的傅里叶变换, $H(k)$ 为信道传输函数在第 k 个子载波上的响应, 与传输信号相互独立。信道估计的目的是从接收到的导频信号中估计 $H(k)$ 。

2 信道估计新方法

本文提出了一种基于小波去噪和奇异值分解的低阶近似 MMSE 信道估计算法, 其信道框图如图 2 所示。LS 算法的估计结果经过小波去噪后, 再利用奇异值分解算法对信道转移矩阵函数进行低阶近似。仿真结果说明了本算法在大量减少计算量的前提下, 其性能与只用了低阶近似^[1]算法相比有了一定提高, 而且本文通过采用梳状导频估计, 与参考文献[2]算法相比更接近真实情况, 此外, 因为采用了奇异值分解, 所以克服了参考文献[2]算法近似阶数不能改变的缺点。

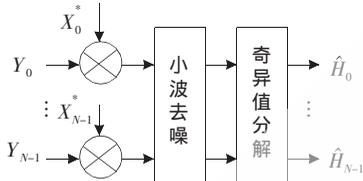


图2 结合小波去噪的信道框图

2.1 基于 LS 的小波去噪

最小平方 (LS) 算法是最简单的一种信道估计算法, 它的目标是:

$$\hat{h}_{ls} = \arg \min_{\hat{h}_k} \|y - X\hat{h}_{ls}\| \quad (4)$$

由正交性原理, 可得 LS 估计:

$$\hat{h}_{ls} = X^{-1}y = h + \tilde{w} \quad (5)$$

式(5)中, h 是信道的真实响应, 也是有用信号; $\tilde{w} = X^{-1}w$ 是一独立高斯噪声向量, 其自相关矩阵为:

$$R_{\tilde{w}\tilde{w}} = \sigma_w^2 (XX^H)^{-1} \quad (6)$$

当信噪比较低时, 噪声的影响将会加大, 此时可以用小波去噪对 LS 估计后的结果进行去噪。去噪过程如下: 首先对 LS 估计的信道 \hat{h}_{ls} 进行小波分解, 假设进行两阶分解, 如图 3 所示; 然后利用门限值对含噪的小波系数 cD1、cD2 进行阈值处理; 最后对信号进行重构, 达到了消除噪声的目的。

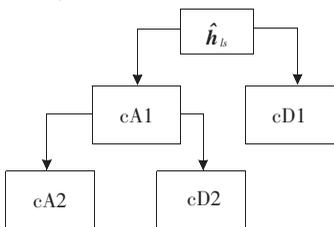


图3 信号小波分解图

2.2 基于奇异值(SVD)的信道估计

信道冲激响应矩阵自相关函数的奇异分解:

$$R_{hh} = U \Lambda U^H \quad (7)$$

式中, U 为包含奇异向量的酉矩阵, Λ 为包含奇异值 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 的对角矩阵。最佳秩 P 的估计器推导如下:

$$\hat{h}_p = Q_1 \begin{bmatrix} D_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} Q_2^H R_{hh}^{-1/2} \hat{h}_{ls} \quad (8)$$

式中, Q_1 、 Q_2 为酉阵, D_p 为对角矩阵的 $P \times P$ 阶左上角矩阵。在块状导频的情况下, 可以将上式简化为:

$$\hat{h}_p = U \begin{bmatrix} \Delta_p & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} U^H \hat{h}_{ls} \quad (9)$$

从式(1)可以看出, 计算量从原来的 N 阶变为 P 阶。阶数为 P 的低阶信道估计器原理如下: 首先, 接收信号乘以 X^{-1} 得到 LS 信道估计值 \hat{h}_{ls} , 然后进行小波去噪。低阶估计器可以看作是去噪后得到的值映射到阶数为 P 的子空间以降低噪声的影响, 然后再变换为频域。如果子空间的维数很小, 而且能够很好地描述信道的特性, 则可以得到复杂度很低且性能很好的信道估计器。

同时必须看到, 低阶估计器在带来一系列好处的同时, 也有不可避免的缺点。由于只在信道的子空间进行估计, 所以会引入一定的估计误差。一般在阶数 P 近似等于循环前缀长度的时候可以得到很好的信道估计器, 而在 OFDM 系统设计时^[9], 通常要求循环前缀的长度要远小于 OFDM 符号长度, 所以运算的复杂度可以大大降低。

下面讨论阶数为 P 的低阶估计器的均方误差 MSE^[4]。

$$MSE(p) = E \|H - \hat{H}_p\|^2 = \sum_{k=0}^{P-1} [\hat{\lambda}_k (1 - \delta_k)^2 + \frac{\beta}{\tilde{SNR}}] + \sum_{m=p}^{N-1} \hat{\lambda}_m \quad (10)$$

式中, \tilde{SNR} 是实际系统中的信噪比, $\hat{\lambda}_k$ 为实际相关矩阵与设计估计器不完全匹配情况下第 k 个转换系数所包含的信道能量。

由式(10)可知: 基于奇异值分解的低阶近似 MMSE 算法的均方误差只由 LS 的估计值、估计器设计时信道相关矩阵和信噪比与实际情况的匹配程度决定, 与其他因素无关。所以当采用小波去噪对 LS 估计结果进行改善后, 再进行 MMSE 估计时, 其地板效应会得到改善。在仿真条件(子信道个数为 64, 符号周期为 138 μ s, 循环前缀为 10 μ s 即 5 个符号, 近似阶数为 8)下, 其计算机仿真如图 4 所示。

3 仿真结果及分析

采用系统带宽为 1 MHz, 载波频率为 1 GHz, 子信道个数为 512, 其中导频信道为 64, 导频方式为梳状, 循环前缀为 16, 信道为典型 Rayleigh 信道并假设多径全部位于循环前缀持续时间中, 信号为 16QAM 调制。选用消失矩为 8 的 daubchies 小波对 LS 估计信号进行 2 层小波分解并去噪, 然后进行阶数为 20 的低阶近似, 插值方式

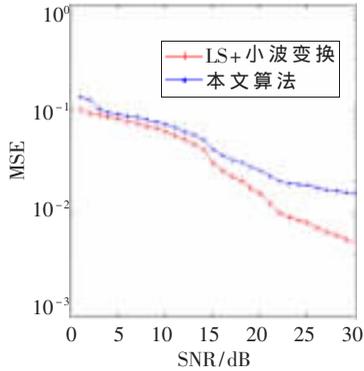


图4 本文算法与参考文献[2]算法的地板效应比较

为一阶线性插值^[5-6]。均方误差及误码率仿真结果如下:

(1)均方误差随信噪比变化的仿真曲线如图5所示。由于LS算法对噪声比较敏感,所以在信噪比较小的情况下,LS算法有较大误差。用本文算法对LS信道估计结果进行小波变换后,再用SVD算法进行低阶近似,在近似阶数均为20的前提下,相对于LS算法有很大的改善。

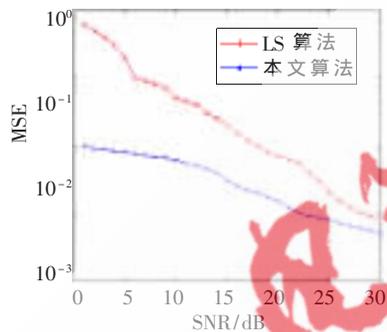


图5 均方误差曲线图

(2)误码率随信噪比变化的仿真曲线如图6所示。由图可见,本文算法比LS算法有较大改善。

本文将小波去噪方法与奇异值低阶相结合,对传统的LS算法信道估计进行了一定的改进,有效地提高了信道估计的准确性和系统性能。同单一的SVD分解、

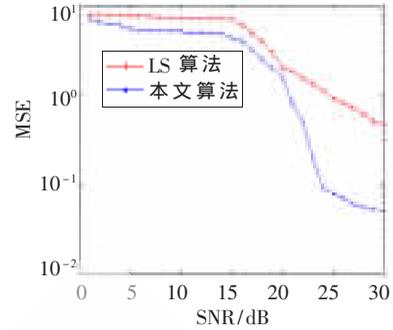


图6 误码率曲线图

DFT低通滤波的信道估计方法相比,其不需要已知系统的任何信道信息,具有一定的实际应用价值。由于系统的去噪性能取决于小波去噪方法的系数选择,如合适的小波基函数和分解函数,如何在不同的信道下选择合适的小波去噪参数,以及它们之间的关系将是下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 张继东,郑宝玉.基于导频的OFDM信道估计及其研究进展[J].通信学报,2003,24(11):116-124.
- [2] 石慧,卓东风.OFDM系统中一种新的变换域信道估计方法[J].太原科技大学学报,2006,27(5):90-114.
- [3] 佟学俭,罗涛.OFDM移动通信技术原理与应用[M].北京:人民邮电出版社,2003.
- [4] BOGGESS A.小波与傅里叶分析基础[M].北京:电子工业出版社,2002.
- [5] GIANNAKIS G B,HUA Ying Bo,STOIEA P,et al.无线通信与移动通信中信号处理研究的新进展[M].北京:电子工业出版社,2004.
- [6] 樊昌信,曹丽娜.通信原理[M].北京:国防工业出版社,2003.

(收稿日期:2009-12-01)

作者简介:

喻永华,女,1983年生,硕士研究生,主要研究方向:OFDM系统中信道估计算法。