

一种基于频域加窗的 OFDM 信道估计算法

唐恬 张治 张平

(北京邮电大学电信工程学院 北京 100876)

摘要: 该文分析了实际 OFDM 系统时域信道估计中的信道冲激响应(CIR)泄漏问题。提出了一种新的 OFDM 时域信道估计算法, 利用频域加窗降低 CIR 泄漏, 对 CIR 进行过门限判决, 最大限度删除 CIR 中的噪声。在非整数采样多径衰落信道下与已有的 OFDM 时域信道估计算法进行了仿真对比, 证明该算法有效降低了信道估计 MSE 值, 改善了系统 BER 性能。

关键词: 正交频分复用; 信道估计; 加窗

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)12-2930-04

A Channel Estimation Algorithm for OFDM Based on Frequency Domain Windowing

Tang Tian Zhang Zhi Zhang Ping

(Telecommunication Engineering School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: The leakage of Channel Impulse Response (CIR) in the time domain channel estimation for the practical OFDM systems is analyzed. A novel channel estimation algorithm in the time domain is proposed for OFDM. The frequency domain windowing is used to reduce the leakage of CIR. The noise of CIR is direct cut according to a threshold. Comparison has been done between the proposed algorithm and the existing time domain channel estimation algorithms in the non-sample-spaced multipath fading channel. Simulation results show the decreasing of channel estimation MSE and the improvement of BER performance by the proposed algorithm.

Key words: OFDM; Channel estimation; Windowing

1 引言

正交频分复用(OFDM)已经被公认为是下一代高速无线通信系统的主要物理层解决方案之一, 而信道估计则是相干调制OFDM系统中的一项关键技术, 它对系统BER性能有直接的影响。本文的研究范围是基于插入导频和DFT的OFDM时域信道估计算法, 在这方面已经有很多成熟的研究成果^[1-4], 他们的主要思路是一致的: 首先在导频子载波上获得最小平方(LS)意义下的信道频域响应, 然后通过IDFT获得信道冲激响应(CIR), 对CIR进行一定处理后再通过DFT获得信道频域响应估计值。不同算法的区别主要在于对CIR的处理方式不同。在文献[2]中, 按CIR中多径能量从大到小保留 J 径(J 通常取假定的信道最大多径数的2倍), 将其余的CIR值清零; 文献[3]直接对CIR中超过信道最大时延扩展部分清零; 文献[4]对CIR中多径时延扩展有效部分加升余弦窗。考虑一个实际的OFDM系统, 在文献[5]中已经提到, 由于信道多径时延不可能总是OFDM最小采样间隔的整数倍, CIR泄漏是始终存在的, 此时应用以上算法都有一定的缺陷, 因为文献[2-4]的算法不可避免地会在删除CIR中噪声的同时去掉CIR泄漏分量, 从而导致变换回频域的信道响应估计值

出现抖动, 使信道估计MSE升高。在文献[6]中, 提出了一种加权的MMSE信道估计算法, 由于整个CIR的值都被用到, 避免了CIR泄漏带来的影响, 但是该算法运算量较大, 不在本文分析范围内。

结合对以上几种算法的分析, 本文针对实际 OFDM 系统提出一种有效的时域信道估计算法, 利用基于频域加窗的IFFT获得CIR, 极大降低CIR泄漏, 同时也保持了低复杂度的特点; 对CIR进行过门限判决删除噪声, 最后通过FFT获得信道频域响应估计值。仿真结果证明该算法相对文献[2-4]的算法在MSE和BER性能上都获得了改善。本文后续章节安排如下, 第2节提出实际的OFDM系统模型; 第3节详细分析实际OFDM系统时域信道估计中的CIR泄漏问题, 并提出新的信道估计算法; 第4节在非整数采样多径衰落信道下对各算法的MSE和相应的BER性能进行仿真比较; 最后是结束语。

2 系统模型

图1给出了本文分析的OFDM系统模型, 子载波数为 N , 其中实际发射子载波数为 N_T , 其余的 $N - N_T$ 个子载波留作保护边带。定义一个正整数 R 作为导频插入比, 相应地, 导频子载波数和实际发射导频子载波数可以分别表示为 $M = N/R$ 和 $M_T = N_T/R$, 不失一般性, 假定 N 和 M 都

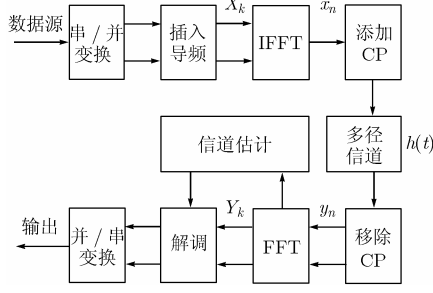


图 1 OFDM 系统模型

是 2 的整数次幂。以 X_k 表示 OFDM 符号第 k 个子载波上的待发射数据, IFFT 模块将 X_k 转换为时域数据, 加 CP 后经过信道到达接收机(在基于插入导频的 OFDM 系统中, 每符号独立地依据导频子载波数据进行信道估计, 因此在本文变量定义中, 都不单独表示变量的符号位置)。本文考虑信道为非整数采样多径衰落信道, 同时假定信道响应在一个 OFDM 符号内保持不变, 于是信道冲激响应可以表示为

$$h(t) = \sum_r h_r \delta(t - \tau_r) \quad (1)$$

其中 h_r 和 τ_r 分别表示第 r 径的幅度和时延。假定系统的同步和频偏消除都是精确的, 则该信道对应第 k 个子载波的频域响应 H_k 可以表示为

$$H_k = \sum_r h_r \exp\left(\frac{-j2\pi\tau_r k}{NT_s}\right) \quad (2)$$

式中 T_s 表示系统的最小采样间隔。接收机对接收信号移除 CP 后经 FFT 模块将时域数据变换到频域, 以 Y_k 和 W_k 分别表示频域对应第 k 个子载波的接收数据和加性高斯白噪声, 则有

$$Y_k = H_k X_k + W_k, \quad k = -N_T/2, \dots, N_T/2 - 1 \quad (3)$$

如果只分析导频数据的传输, 式(3)可以改写为

$$Y_{mR} = H_{mR} X_{mR} + W_{mR}, \quad m = -M_T/2, \dots, M_T/2 - 1 \quad (4)$$

3 信道估计

通常的 OFDM 时域信道估计方法是按照如下步骤, 首先在导频子载波上获得信道 LS 频域响应 \tilde{H}_{mR} :

$$\tilde{H}_{mR} = \frac{Y_{mR}}{X_{mR}} = H_{mR} + \frac{W_{mR}}{X_{mR}}, \quad m = -M_T/2, \dots, M_T/2 - 1 \quad (5)$$

然后对 \tilde{H}_{mR} 做 IDFT 获得 CIR(以 $\tilde{h}(n)$ 表示)。对 $\tilde{h}(n)$ 经过一定处理获得 CIR 的一个估计值 $\hat{h}(n)$, 对 $\hat{h}(n)$ 做 DFT 则获得信道频域响应估计值 \hat{H}_k 。在第 1 节中已经提到, 已有时域信道估计算法的区别主要体现在由 $\tilde{h}(n)$ 获得 $\hat{h}(n)$ 的过程中, 通过推导 $\tilde{h}(n)$ 的具体表达式, 可以发现以这些算法存在的问题。

由式(2)和式(5)有

$$\tilde{H}_{mR} = \sum_r h_r \exp\left(\frac{-j2\pi\tau_r mR}{NT_s}\right) + \frac{W_{mR}}{X_{mR}}, \quad m = -M_T/2, \dots, M_T/2 - 1 \quad (6)$$

为了降低算法复杂度, 对频域响应 \tilde{H}_{mR} 做反变换时采用补零的 IFFT:

$$\tilde{h}(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=-M_T/2}^{M_T/2-1} \tilde{H}_{mR} \exp\left(\frac{j2\pi nm}{M}\right), \quad n = 0, \dots, M - 1 \quad (7)$$

联立式(6)和式(7), 有

$$\begin{aligned} \tilde{h}(n) &= \frac{1}{M} \sum_r h_r \left(\sum_{m=-M_T/2}^{M_T/2-1} \exp\left(\frac{j2\pi nm}{M}\right) \cdot \exp\left(\frac{-j2\pi\tau_r mR}{NT_s}\right) \right) + w(n) \\ &= \frac{1}{M} \sum_r h_r \left(\sum_{m=-M_T/2}^{M_T/2-1} \exp\left(\frac{j2\pi m(nT_s - \tau_r)}{MT_s}\right) \right) + w(n), \quad n = 0, \dots, M - 1 \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $w(n)$ 代表 $\frac{W_{mR}}{X_{mR}}$ 的 IFFT 结果, 显然 $w(n)$ 仍然是加性高斯白噪声。对式(8), 利用几何级数和三角函数性质得到

$$\tilde{h}(n) = \frac{1}{M} \sum_r h_r c_{n,\tau_r} + w(n), \quad n = 0, \dots, M - 1 \quad (9)$$

其中

$$c_{n,\tau_r} = \frac{\sin\left(\frac{\pi M_T(nT_s - \tau_r)}{MT_s}\right)}{\sin\left(\frac{\pi(nT_s - \tau_r)}{MT_s}\right)} \exp\left(\frac{-j\pi(nT_s - \tau_r)}{MT_s}\right) \quad (10)$$

当 $M \gg \max(\tau_r/T_s)$ 时, c_{n,τ_r} 在 $n \leq \max(\tau_r/T_s)$ 时近似表示为

$$c_{n,\tau_r} = M_T \text{sinc}\left(\frac{\pi M_T(nT_s - \tau_r)}{MT_s}\right) \exp\left(\frac{-j\pi(nT_s - \tau_r)}{MT_s}\right) \quad (11)$$

由式(9)和式(11)可见, 在 OFDM 时域信道估计算法中, M_T 和 τ_r 都能对 CIR 泄漏产生影响; 仅当 $M_T = M$ 且 τ_r 是 T_s 的整数倍时, $c_{n,\tau_r} = \begin{cases} M_T, & n = \tau_r/T_s \\ 0, & n \neq \tau_r/T_s \end{cases}$, 此时 $\tilde{h}(n)$ 中 CIR 各

径被理想地恢复(不考虑 $w(n)$ 的影响), 应用已有算法能够有效删除 $\tilde{h}(n)$ 中的噪声, 当上述条件不满足时, c_{n,τ_r} 在每一个点都有值, 每一个 $\tilde{h}(n)$ 将是 CIR 共 r 径被 c_{n,τ_r} 调制的结果, 也就是说 CIR 的每一径泄漏到 $\tilde{h}(n)$ 的每一个点上。在此时如果通过直接删除噪声的方式获得 $\hat{h}(n)$, CIR 泄漏部分也将被删除掉, 这样直接导致对 $\hat{h}(n)$ 做 FFT 获得的信道频域响应估计值产生吉布斯现象, 即出现抖动, 在高频部分尤为严重。

考虑以上分析, 本文提出新的时域信道估计算法, 以 $D_{m,M}$ 表示一个包含相位旋转的 M 点汉宁窗:

$$D_{m,M} = \frac{1}{2} \left(1 + \cos\left(\frac{2\pi m}{SM}\right) \right) \exp\left(\frac{-j2\pi \cdot 2m}{M}\right), \quad m = -M/2, \dots, M/2 - 1 \quad (12)$$

式中 S 表示汉宁窗的形状因子, S 越小汉宁窗就越陡峭。在获得频域响应 \tilde{H}_{mR} 后对其做加窗 IFFT, 此时,

$$\tilde{h}_d(n) = \frac{1}{M} \sum_{m=-M_T/2}^{M_T/2-1} H_{mR} D_{m,M} \exp\left(\frac{j2\pi nm}{M}\right) + w_d(n), \quad n = 0, \dots, M-1 \quad (13)$$

式中 $\tilde{h}_d(n)$ 表示加窗反变换后的 CIR, $w_d(n)$ 表示 $\frac{W_{mR} D_{m,M}}{X_{mR}}$ 的 IFFT 结果。为便于推导 $\tilde{h}_d(n)$ 中的 CIR 泄漏情况, 令 $S = 1$ (不同 S 值对算法性能的影响将在仿真结果中给出), 类似式(9), 将式(12)代入式(13)解出:

$$\begin{aligned} \tilde{h}_d(n) &= \frac{1}{M} \sum_r h_r \left[\sum_{m=-M_T/2}^{M_T/2-1} \frac{1}{2} \exp\left(\frac{j2\pi m(nT_s - \tau_r)}{MT_s}\right) \right] \left[\frac{1}{2} \exp\left(\frac{-j2\pi m}{M}\right) \right. \\ &\quad \left. + \exp\left(\frac{-j2\pi \cdot 2m}{M}\right) + \frac{1}{2} \exp\left(\frac{-j2\pi \cdot 3m}{M}\right) \right] + w_d(n) \\ &= \frac{1}{M} \sum_r h_r c'_{n,\tau_r} + w_d(n), \quad n = 0, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $c'_{n,\tau_r} = 0.25c_{n-1,\tau_r} + 0.5c_{n-2,\tau_r} + 0.25c_{n-3,\tau_r}$, 根据式(11), 式(14)和 sinc 函数的性质, CIR 的每一径在 $\tilde{h}_d(n)$ 中主瓣被展宽且被循环右移 2 位(在窗函数中加入相位旋转使 CIR 循环右移是为了方便后续算法描述), 其余的泄漏被极大降低, 此时对 $\tilde{h}_d(n)$ 进行噪声直接删除将是有效的。图 2 给出了单径条件下 (τ_r/T_s 为 16.5) 加窗前后 CIR 泄漏的对比, 显然结果与前述分析是符合的。

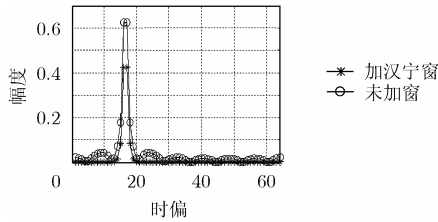


图 2 是否加窗对得到的 CIR 的影响

获得 $\tilde{h}_d(n)$ 后, 利用 $\tilde{h}_d(n)$ 中的噪声部分计算出一个门限 T , 利用式(15)得到 CIR 估计值 $\hat{h}_d(n)$:

$$\left. \begin{aligned} \hat{h}_d(n) &= \tilde{h}_d(n) \\ \hat{h}_d(n \pm 1) &= \tilde{h}_d(n \pm 1) \\ \hat{h}_d(n) &= 0, \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &|\tilde{h}_d(n)| > T \cap n = 0, \dots, K+2 \\ &|\tilde{h}_d(n)| < T \cup n = K+3, \dots, M-1 \end{aligned} \quad (15)$$

其中 K 是假定的信道最大多径时延(不失一般性, 这里假定 $K < M$), 对 $|\tilde{h}_d(n)| > T$ 时也要保留 $\tilde{h}_d(n \pm 1)$ 的值是因为加窗时 CIR 每径主瓣被展宽了。近似地, $|\tilde{h}_d(n)|$ 在 $n = K+3, \dots, M-1$ 时服从瑞利分布, 依据简单的估值检测知识, 门限 T 可由式(16)确定:

$$T = 2E\sqrt{-\ln(P_F)}/\pi \quad (16)$$

式中 P_F 是需要预先确定的单次过门限判决的虚警概率, E 是序列 $|\tilde{h}_d(n)|$, $n = K+3, \dots, M-1$ 的均值, 本文后续取 $P_F = 10^{-3}$ 。对获得的 $\hat{h}_d(n)$ 补零至 N 点做 FFT 再除以窗函数 $D_{k,N}$ 就得到最终的信道频域响应的估计值:

$$\hat{H}_k = \frac{1}{D_{k,N}} \sum_{n=0}^{M-1} \hat{h}_d(n) \exp\left(\frac{-j2\pi nk}{N}\right), \quad k = -N_T/2, \dots, N_T/2-1 \quad (17)$$

考虑本文算法的复杂度, 与文献[2-4]提出的算法相比较, 主要区别是加入了加窗计算, 即增加了 $2 \times (M_T + N_T)$ 点复乘运算, 运算量增加很小。

4 仿真结果

仿真的系统带宽被确定为 2MHz, 子载波数 $N = 256$, 其中两侧共 32 个子载波留作保护边带, 导频插入比 $R = 4$ 。此时 OFDM 符号持续时间为 128μs, 每个符号前加上持续时间为 16μs 的 CP。本文在非整数采样多径信道下进行仿真, 为了更好地考察信道估计算法在实际系统中的 MSE 性能以及相应的 BER 性能, 不采用固定时延参数信道。仿真信道被假定为 5 径, 除了第 1 径固定为时延 0, 其他 4 径的时延在 0~16μs 服从独立的平均分布, 每径的平均功率随时延增大服从指数衰减。首先考察不同形状的汉宁窗对本文提出算法性能的影响, 如图 3 所示, 随着 S 值的增大本文提出的算法在大信噪比下性能逐渐变差, 但是在小信噪比情况下性能逐渐提升。为了达到最佳的性能, 需要根据不同的信噪比选择不同的窗函数, 在实际系统中为了降低算法复杂度, 可以考虑选取固定形状的汉宁窗, 因此在后续与其他算法的仿真比较中固定 $S = 1$ 。

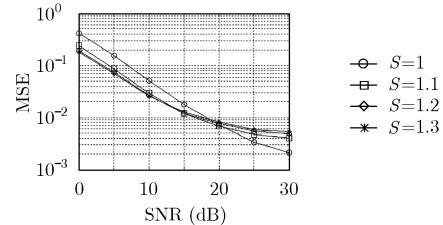


图 3 不同窗函数形状对本文提出算法性能的影响

图 4 给出了不同算法的 MSE 性能比较, 其中以算法 1 表示文献[2]提出的算法, 根据本文的信道仿真参数, 算法 1 中的重要参数 J 被选择为 10; 以算法 2, 3 和 4 分别表示文献[3,4]和本文提出的算法。可见本文提出的算法有效降低了信道估计 MSE 值, 在大信噪比下尤为明显, 因为大信噪比情况下, CIR 中的噪声可以忽略不计, 此时对信道估计精度的影响主要来自 CIR 泄漏, 而本文算法和其他算法相比的优势就在于极大降低了 CIR 泄漏的影响。值得注意的是, 图 4 中算法 1 比文献[2]中仿真结果性能降低较大, 因为在文献[2]中对信道时延都假定为最小采样间隔的整数倍, 那只是仿真中的理想情况, 不适用于实际的 OFDM 系统。

为考察相应信道估计算法下的 BER 性能, 假定每一个 OFDM 符号都采用相同的导频配置方式, 每个 OFDM 符号独立地进行信道估计并将结果用于本符号解调, 从而可以排除不同信道跟踪算法对 BER 性能的影响。图 5 给出了应用不同信道估计算法下的未编码 OFDM 系统 BER 性能比较,

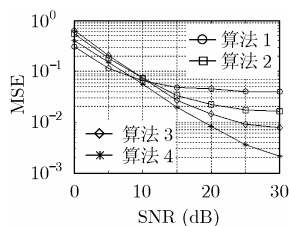


图 4 不同算法的 MSE 性能

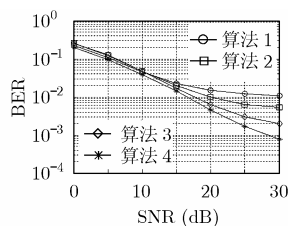


图 5 不同算法的 BER 性能

同样地,应用本文提出的算法获得了最好的 BER 性能,且性能优势随信噪比增加而增加。

5 结束语

本文从减少 OFDM 时域信道估计中 CIR 泄漏的角度出发,提出了一种新的信道估计算法。该算法利用基于频域加窗的 IFFT 极大降低了实际 OFDM 系统信道估计中的 CIR 泄漏,从而使利用判决门限进行噪声直接删除的方法变得有效。仿真结果证明该算法在非整数采样多径衰落信道下有效降低了信道估计 MSE 值,相应提高了系统的 BER 性能。

参 考 文 献

[1] Zhao Yuping and Huang Aiping. A novel channel estimation method for OFDM mobile communication system based on pilot signals and transform domain processing. *IEEE 47th VTC*, Phoenix, 1997, Vol.3: 2089–2093.

- [2] Minn H and Bhargava V K. An investigation into time-domain approach for OFDM channel estimation. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2000, 46(4): 240–248.
- [3] Fukuhara H, Hao Yuan, and Takeuchi Y, *et al.* A novel channel estimation method for OFDM transmission technique under fast time-variant fading channel. *IEEE 57th VTC*, Jeju, 2003, Vol.4: 2343–2347.
- [4] Pei Yun Tsai and Tzi Dar Chiueh. Frequency-domain interpolation-based channel estimation in pilot-aided OFDM systems. *IEEE 59th VTC*, Milan, 2004, Vol.1: 420–424.
- [5] Van de Beek J J, Edfors O, and Sandell M, *et al.* On channel estimation in OFDM systems. *IEEE 45th VTC*, Chicago, 1995, Vol.2: 815–819.
- [6] Yang Baoguo, Cao Zhigang, and Letaief K B. Analysis of low-complexity windowed DFT-based MMSE channel estimator for OFDM systems. *IEEE Trans. on Communications*, 2001, 49(11): 1977–1987.

唐 恬: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为 OFDM 物理层技术。

张 治: 男, 1977 年生, 博士, 主要研究方向为通信系统物理层技术。

张 平: 男, 1959 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为移动通信。