

文章编号:1000-582X(2011)02-064-05

适用于快衰落环境的 OFDM/TDM 信道估计算法

吴玉成, 伍丹, 周强

(重庆大学 通信工程学院, 重庆 400044)

摘要:针对正交频分复用/时分复用(OFDM/TDM)系统现有导频结构和信道估计算法缺乏对信道快衰落实时跟踪能力的问题,提出一种改进信道估计算法。该算法利用相邻 2 个时域复用导频序列对信道特性进行估计得到信道传递函数,通过内插处理获得数据符号的信道状态信息,并利用最小均方误差准则的频域均衡算法补偿信道衰落。仿真结果表明,与现有信道估计算法相比,在相同数据传输效率情况下,提出算法不仅能够适用于慢衰落信道,同时对快衰落信道的实时变化有良好的跟踪能力,改善系统性能。

关键词:正交频分复用/时分复用;快衰落;信道估计;最小均方误差;内插

中图分类号:TN 911.3

文献标志码:A

Novel channel estimation algorithm for OFDM/TDM over fast fading channels

WU Yu-cheng, WU Dan, ZHOU Qiang

(College of Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: For the shortage of tracking ability against fast fading channel of the existing pilot structures and channel estimation algorithms in OFDM combined with time division multiplexing (OFDM/TDM) system, an improved channel estimation algorithm is proposed. The channel transfer functions are obtained by estimating the channel properties with two adjacent time domain multiplexing (TDM) pilot sequences, while the channel state information of the OFDM/TDM symbols is obtained with interpolation. Combined with frequency domain equalization based on minimum mean square error (MMSE-FDE), the proposed algorithm can significantly compensate the path loss over fast fading channels. Simulation results show that, compared with the existing channel estimation algorithms, the proposed algorithm can achieve better performance, which is not only capable of dealing with slow fading channels, but also has a better tracking ability against fast fading channels with the same data transmission efficiency.

Key words: OFDM/TDM; fast fading; channel estimation; minimum mean square error; interpolation

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)以其高频谱利用率和良好的抗频率选择性衰落能力成为高速数据传输的首选方

案,但其存在高峰值平均功率比^[1](peak to average power ratio, PAPR)的问题降低了射频功率放大器的输出效率。OFDM 时分复用(OFDM/TDM)系

收稿日期:2009-09-22

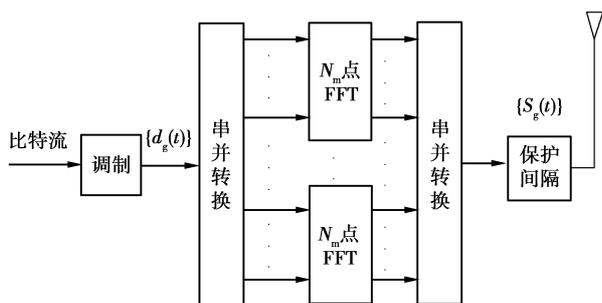
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60872038);中国博士后基金资助项目(20090450787);重庆市教委科技项目(KJ08A09);国家“211 工程”人才培养计划(S-09102)。

作者简介:吴玉成(1971-),男,重庆大学博士后,教授,主要从事无线通信技术研究。(Tel)023-65106498; (E-mail)wuyucheng@cqu.edu.cn。

统,也被称为通用 OFDM^[2-3] (generalized OFDM, GOFDM),通过将较长 OFDM 符号的 IFFT 处理转换为多个较短序列的 IFFT 运算,使对 PAPR 处理的复杂度大大降低^[4]。

信道估计与均衡通过估计算法获得信道状态信息并利用均衡处理补偿信道衰落,是 OFDM/TDM 系统应用于移动通信的关键技术。进行恰当的导频设计及高效内插处理是信道估计算法设计的重要问题。基于时域复用导频^[5] (TDM-Pilot)的信道估计算法能有效对抗信道慢衰落,但对抗信道快衰落的能力较差;基于频域复用导频^[6] (FDM-Pilot)信道估计算法可提高系统对抗信道快衰落的能力,但由于其在时域内插处理时引入噪声,使得系统的误码率增加而导致传输性能下降。文献[7]采用交织技术获得时间分集增益以提高系统对抗快衰落的能力,但需要长时间的数据存储而导致处理复杂度和数据延时增加;文献[8]结合多输入多输出(MIMO)技术,通过提供空间分集增益,可有效对抗信道快衰落及慢衰落,但 MIMO 技术在收发两端均需要多个天线,硬件及软件实现复杂度均大大增加,对很多系统不具可实施性。

针对 OFDM/TDM 系统在快衰落环境下的可靠传输问题,提出一种时域复用导频和内插技术相结合的改进信道估计算法,并用 MMSE-FDE 进行信道均衡^[9-10],以提高系统对抗时间选择性衰落的能力。该算法避免了采用长交织技术或 MIMO 技术所带来的处理复杂度高的问题,同时与现有基于时域复用导频结构和频域复用导频结构的信道估计算法相比,在保证数据传输效率的情况下,能有效跟踪信道的快衰落,提高系统性能。



(a) 发送端

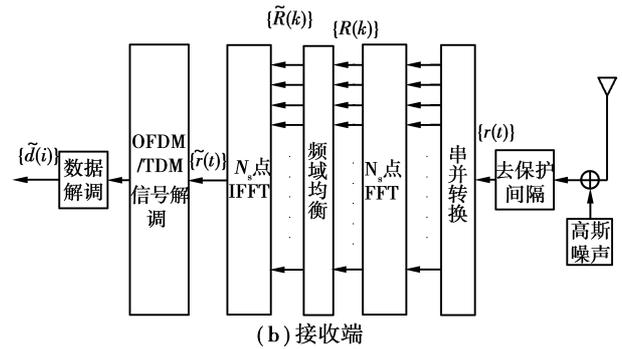


图 1 OFDM/TDM 系统基带模型

1 OFDM/TDM 系统模型

OFDM/TDM 系统将传统 OFDM 系统 IFFT 时间窗分成 K 块,每块传输子载波数减少的 OFDM 信号。如图 1 所示,假设传统 OFDM 系统每个符号包含 N_s 个子载波,第 g 个 OFDM/TDM 符号的数据子载波的频域数据表示为 $\{d_g(i); i=0 \sim N_s-1\}$,然后将 N_s 符号序列分为 K 个数据块,每个数据块包含 $N_m (=N_s/K)$ 个子载波,再经过 N_m 点 FFT 变换,则 OFDM/TDM 信号等效基带^[3]信号可表示为

$$s_g(t) = \sum_{k=0}^{K-1} s_g^k(t - kN_m)u(t - kN_m), \quad (1)$$

其中: $t=0 \sim N_s-1$; $s_g^k(t)$ 表示第 k 个 N_m 子载波 OFDM 信号,表示为

$$s_g^k(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \sum_{i=0}^{N_m-1} d_g^k(i) \exp(j2\pi ti/N_m), \quad (2)$$

其中: $t=0 \sim N_m-1$; E_s 和 T_s 分别代表每个符号的能量和符号周期。

采用瑞利多径衰落信道模型,其冲激响应为

$$h_g(\tau) = \sum_{l=0}^{L-1} h_{g,l} \delta(\tau - \tau_l), \quad (3)$$

其中: L 为信道的多径数目; $h_{g,l}$ 和 τ_l 分别表示第 g 个符号第 l 径的信道增益和时延;则接收信号为

$$r_g(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_{g,l} \tilde{s}_g(t - \tau_l) + n_g(t), \quad (4)$$

其中: $t = -N_m \sim N_s-1$; $n_g(t)$ 表示高斯白噪声(AWGN),其均值为零,方差为 $2N_0/T_s$; N_0 为单边带功率谱密度。

接收信号经过 N_s 点 FFT 变换可写为

$$R_g(k) = FFT(r_g(t)) = S_g(k)H_g(k) + N_g(k), \quad (5)$$

其中 $S_g(k)$, $H_g(k)$ 和 $N_g(k)$ 分别为 OFDM/TDM 信号,多径信道以及高斯白噪声的傅立叶变换形式。

利用 MMSE-FDE 进行信道均衡处理,均衡后

$$C_p(k) = \xi\{\mathbf{H}_p(k) \tilde{\mathbf{X}}^h(k)\} [\xi\{\tilde{\mathbf{X}}(k) \tilde{\mathbf{X}}^h(k)\}]^{-1} =$$

$$[\xi\{\mathbf{H}_p(k) H_1^*(k)\} \quad \xi\{\mathbf{H}_p(k) H_{N_d+1}^*(k)\}] \times$$

$$\begin{bmatrix} \xi\{|H_1(k)|^2\} + \frac{\sigma^2 L}{N_s |P_1(k)|^2} & \xi\{H_1(k) H_{N_d+1}^*(k)\} \\ \xi\{H_{N_d+1}(k) H_1^*(k)\} & \xi\{|H_{N_d+1}(k)|^2\} + \frac{\sigma^2 L}{N_s |P_1(k)|^2} \end{bmatrix}^{-1}, \quad (13)$$

将式(13)及其 $\tilde{\mathbf{X}}^h(k)$ 带入式(11),即可得到 $\tilde{\mathbf{H}}_p(k)$,

$$\tilde{\mathbf{H}}_p(k) = [\xi\{H_p(k) H_1^*(k)\} \quad \xi\{H_p(k) H_{N_d+1}^*(k)\}] \times$$

$$\begin{bmatrix} \xi\{|H_1(k)|^2\} + \frac{\sigma^2 L}{N_s |P_1(k)|^2} & \xi\{H_1(k) H_{N_d+1}^*(k)\} \\ \xi\{H_{N_d+1}(k) H_1^*(k)\} & \xi\{|H_{N_d+1}(k)|^2\} + \frac{\sigma^2 L}{N_s |P_1(k)|^2} \end{bmatrix}^{-1} \times$$

$$\begin{bmatrix} H_1(k) + \frac{\tilde{N}(k)}{P_1(k)} \\ H_{N_d+1}(k) + \frac{\tilde{N}_{N_d+1}(k)}{P_1(k)} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

对于频率选择性衰落信道,内插向量系数 $C_p(k)$ 以及最小均方误差 $\varepsilon_p(k)$ 可以简化^[14]为

$$C_p(k) = \begin{bmatrix} J_0[2\pi f_d(p-1)T_b] \\ J_0[2\pi f_d(N_d+1-p)T_b] \end{bmatrix}^T \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{\sigma^2 L}{N_s} & J_0(2\pi f_d N_d T_b) \\ J_0(2\pi f_d N_d T_b) & 1 + \frac{\sigma^2 L}{N_s} \end{bmatrix}^{-1}, \quad (15)$$

$$\varepsilon_p(k) = 1 - \begin{bmatrix} J_0[2\pi f_d(p-1)T_b] \\ J_0[2\pi f_d(N_d+1-p)T_b] \end{bmatrix}^T \times$$

$$\begin{bmatrix} 1 + \frac{\sigma^2 L}{N_s} & J_0(2\pi f_d N_d T_b) \\ J_0(2\pi f_d N_d T_b) & 1 + \frac{\sigma^2 L}{N_s} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} J_0[2\pi f_d p T_b] \\ J_0[2\pi f_d(N_d-p)T_b] \end{bmatrix}, \quad (16)$$

其中, $[\]^T$ 表示转置, $J_0(\)$ 表示零阶贝塞尔函数, f_d 表示最大多普勒频移。可以看出,一旦确定了 N_d 和 T_b ,则 $C_p(k)$ 主要取决于最大多普勒频移 f_d 和噪声方差 σ^2 ,最大多普勒频移可由参考文献[15]的算法估计出来,而噪声方差则可由式(10)得到。这样,得到内插向量系数 $C_p(k)$,从而获得经过内插处理的数据符号频域处的信道估计值。

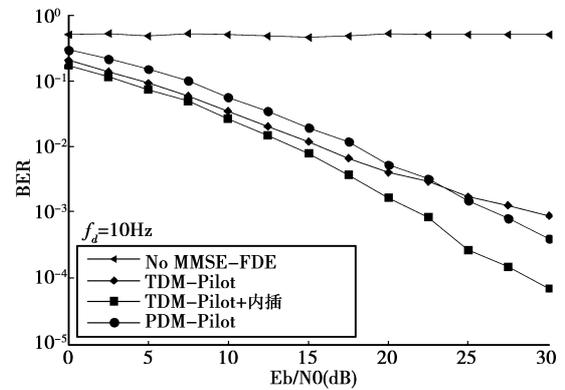
3 仿真结果分析

本系统导频序列选取 Chu 序列^[16],它满足在时域和频域幅值都为恒定值。这样,在估计信道状态信息时,能避免产生很大的噪声,Chu 序列时域信号表达式 $p(t) = \exp(j\pi t^2/N_m); t = N_s - 1$ 。系统仿真参数如表 1 所示, $T_s = 0.25\mu s, N_d = 8$,保护间隔采样点数为 32,长度为 $8\mu s$,其最大时延扩展小于保护间隔的长度,仿真信道采用瑞利衰落信道。

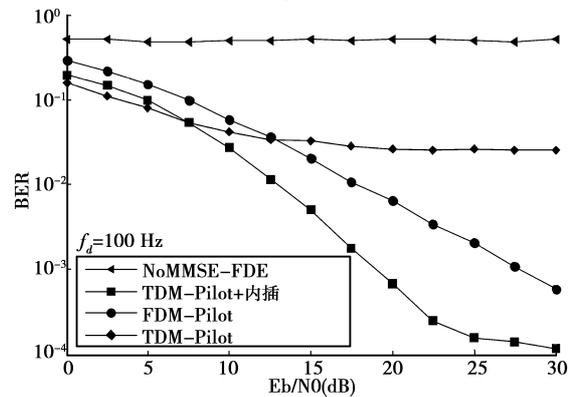
表 1 系统仿真参数

仿真参数	FDM-Pilot	TDM-Pilot	TDM-Pilot+内插
调制方式	QPSK		
IFFT 点数	$N_m = 32$	$N_m = 256/K$	$N_m = 256/K$
符号间隙	$K = 8$	$K = 1 \sim 256$	$K = 1 \sim 256$
块长			$N_s = 256/K$
保护间隔	$N_g = N_m$	$N_g = 32$	$N_g = 32$
瑞利衰落	$L = 16$ 频率选择性瑞利衰落信道		
FFT 点数		$N_s = 256$	
频移均衡	MMSE		

为验证所提出算法,将基于频域复用导频信道估计,基于时域复用导频信道估计以及时域复用导频结构结合内插处理的信道估计算法进行仿真对比,得到信道估计误码率曲线,如图 3(a,b)所示。



(a) $f_d = 10$ Hz



(b) $f_d = 100$ Hz

图 3 信道估计性能曲线对比

从图 3 可以看出,多普勒频移较小的时($f_d = 10$ Hz),即在慢衰落信道中,3 种信道估计算法都能够很好估计出信道状态信息。但在多普勒频移较大($f_d = 100$ Hz),快衰落信道中,基于时域复用导频信道估计因其较差的信道跟踪能力,导致系统误码率升高,基于频域复用导频信道估计算法系统误码率性能相对较好,而本文所提出的信道估计算法获得的系统性能优于其它 2 种方案。

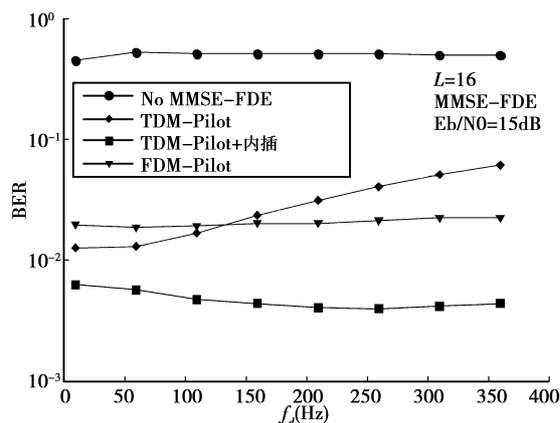
图4 f_d 的影响

图4是在 $E_b/N_0 = 15$ dB 的情况下,最大多普勒频移 f_d 不同情况系统误码率曲线。从图中可以看出,基于时域复用导频信道估计算法,如前面所分析,跟踪信道能力较差,随着 f_d 增大,其误码率曲线有明显升高;对基于频域复用导频结构的信道估计,随着 f_d 增大,其实时跟踪信道快衰落能力相对较好,但信道估计算法中时域内插入噪声,使得系统误码率增加。所提出算法具有实时跟踪信道能力,随着 f_d 增大,其误码率曲线保持平缓。

4 结论

为了提高 OFDM/TDM 系统在快衰落信道环境下的传输性能,针对其信道估计算法中时域复用导频结构信道跟踪能力差以及频域复用导频结构信道估计中内插处理引入噪声的缺点,提出利用时域复用导频结构与内插算法的相结合的改进信道估计算法。仿真结果表明,在保证数据的传输效率情况下,该算法能够同时适应慢衰落和快衰落。

参考文献:

- [1] JIANG T, WU Y Y. An overview: peak-to-average power ratio reduction techniques for OFDM signal[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2008, 54(2):257-268.
- [2] GACANIN H, TAKAOKA S, ADACHI F. Generalized OFDM for bridging between OFDM and single-carrier transmission[C]//9th IEEE Singapore International Conference on Communication System, Sept 6-9, 2004, Singapore. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004:145-149.
- [3] TANG L, LI M Q, ABU-RGHEFF M A, et al. Novel SNR analysis for adaptive modulation and coding in generalized OFDM and single carrier systems[C]//2007 8th IEEE Wireless Communication and Networking Conference, March 11-15, 2007, Kowloon, China. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2007:1385-1389.
- [4] GACANIN H, ADACHI F. PAPR advantage of amplitude clipped OFDM/TDM[J]. IEICE Transactions on Communications, 2008, E91, B(3):931-934.
- [5] GACANIN H, ADACHI F. On channel estimation for OFDM/TDM using MMSE-FDE in a fast fading channel[J]. EURASIP Journal of Wireless Communication and Networking, 2009, 2009: 1-9.
- [6] GACANIN H, TAKAOKA S, ADACHI F. Performance of OFDM/TDM with MMSE-FDE using pilot-assisted channel estimation[C]//IEEE Wireless Communication and Networking Conference, March 11-15, 2007, Hong Kong, China. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2007:222-226.
- [7] GACANIN H, ADACHI F. Performance improvement by frequency-domain interleaving for OFDM/TDM using MMSE-FDE in a wireless channel[J]. IEICE Transaction on Communications, 2009, E92, B(5): 1813-1817.
- [8] GACANIN H, ADACHI F. Joint frequency-domain STTD and antenna diversity reception based on MMSE criterion for OFDM/TDM[J]. IEICE Transactions on Communications, 2006, E89, B(10):2952-2955.
- [9] TRAN L N, HONG E K, LIU H P. A frequency domain equalization algorithm for fast time-varying fading channels[J]. Journal of Communication and Networks, 2009, 11(5):474-480.
- [10] GACANIN H, TAKAOKA S, ADACHI F. BER performance of OFDM combined with TDM using frequency-domain equalization[J]. Journal of Communications and Networks, 2007, 9(1):34-42.
- [11] 韩庆文,张鹏,王韬. OFDM 信道估计的复矩阵分解及 FPGA 实现[J]. 重庆大学学报,2009,32(3): 324-327. HAN QING-WEN, ZHANG PENG, WANG TAO. Field programmable gate array implementation for singular value decomposition in an orthogonal frequency division multiplexing channel estimation[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(3):324-327.
- [12] ZHENG Y R, XIAO C. Channel estimation for frequency-domain equalization of single-carrier broadband wireless communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(2):815-823.
- [13] OZDEMIR M K, ARSLAN H. Channel estimation for wireless OFDM systems[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2007, 9:18-48.
- [14] XIAO C, WU J, LEONG S Y, et al. A discrete-time model for triply selective MIMO rayleigh fading channels[J]. IEEE Transactions Wireless Communication, 2004, 3(5):1678-1688.
- [15] ZHENG Y R, XIAO C. Mobile speed estimation for broadband wireless communications over rician fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8(1):1-5.
- [16] CHU D C. Polyphase codes with good periodic correlation properties[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972, 18(4):531-532.