

基于 LS 信道估计和分集接收的 Turbo 乘积编码 OFDM 系统的性能研究¹

刘 伟 张 海 林 刘 增 基

(西安电子科技大学 ISN 重点实验室 西安 710071)

摘 要: 该文研究 OFDM 系统中低复杂性最小二乘方 (LS) 信道估计技术。为了改善 LS 估计的 OFDM 在严重多径信道中错误平底效应, 分集接收和 Turbo 乘积编码用于系统设计。数值仿真结果表明, Turbo 乘积编码和分集接收可以减小 LS 估计的 OFDM 系统的错误平底效应, 其性能比已知信道参数系统的性能只恶化 4 dB。

关键词: 正交频分复用, 信道估计, Turbo 乘积码, 分集接收

中图分类号: TN919.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)05-0820-05

Study on Performance of Turbo Product Coded OFDM with LS Channel Estimation and Diversity Reception

Liu Wei Zhang Hai-lin Liu Zeng-ji

(The National Key Lab. on ISN, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract The low-complexity Least Square (LS) channel estimation in Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is studied in this paper. To reduce the error floor of OFDM with LS channel estimation, the diversity reception and turbo product coding are used in system design. The simulation results show that the turbo product coding and diversity combining can reduce the error floor in seriously frequency-selective channel. The gap of the OFDM system with LS channel estimation and with channel state information is only 4dB.

Key words OFDM, Channel estimation, Turbo product code, Diversity reception

1 引言

正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 具有频带利用率高、克服多径效应和均衡器简单等优点, 已经在宽带无线通信系统中得到应用^[1], IEEE802.16 草案已把 OFDM 推荐为在宽带固定无线接入的调制方式^[2]。信道估计是 OFDM 中的关键技术, 本文研究低复杂性的最小二乘方 (Least Square, LS) 信道估计技术^[3], 这种信道估计技术在严重的频率选择性衰落信道中会出现错误平底效应。Turbo 乘积编码和分集接收被用于系统设计用来降低严重多径衰落信道中的错误平底效应。研究表明, Turbo 乘积编码和分集接收可以改善 LS 估计的 OFDM 系统在严重多径信道中的性能, 抑制错误平底效应, 其性能和已知信道参数的系统相比差异只有 4 dB。

2 系统模型

图 1 是 Turbo 乘积编码的 OFDM 系统基带模型。假设 OFDM 的循环前缀的长度大于信道的最大多径时延, 使得 OFDM 符号间没有串扰, 接收端可以实现准确的符号同步和帧同步。

¹ 2002-12-28 收到, 2003-08-25 改回

国家自然科学基金重大研究计划资助课题 (90104019)

接收端 OFDM 解调 (用 FFT 实现) 后第 i 个天线接收的基带信号为

$$r_i[n, k] = H_i[n, k] \cdot t[n, k] + w_i[n, k] \tag{1}$$

其中 $t[n, k]$ 为第 n 个 OFDM 符号中第 k 个子载波发送的信号, $H_i[n, k]$ 为第 i 个接收天线上第 n 个 OFDM 符号中第 k 个子载波的频率响应, $w_i[n, k]$ 为第 i 个接收天线上的复加性高斯白噪声。

本文中采用的信道模型为 IEEE802.16 草案推荐的多径信道模型^[2]。离散信道冲激响应 h_k 为

$$h_k \sim N(0, \sigma_k^2/2) + jN(0, \sigma_k^2/2) \tag{2}$$

其中

$$\sigma_k^2 = \sigma_0^2 \cdot \exp(-kT_s/T_{rms}) \tag{3}$$

这里的 $N(0, \sigma_k^2/2)$ 是均值为零, 方差为 $\sigma_k^2/2$ 的实高斯变量, T_{rms} 是信道多径扩展的均方值, T_s 为采样周期。 σ_k^2 的选择应满足归一化要求 $\sum \sigma_k^2 = 1$ 。为了保证冲激响应具有足够的衰落时间, k 取值应满足 $k_{max} = 10T_{rms}/T_s$ 。

本文选择的多径信道的多径扩展的均方值为 $0.37\mu s$, 脉冲响应持续时间为 $3.7\mu s$, 相当于 IEEE802.16 中非视距传播多径扩展的平均值, 对应相关带宽为 270 kHz 。选择的采样周期分别为 $0.571\mu s$, $0.286\mu s$ 和 $0.143\mu s$, 在采样周期为 $0.143\mu s$ 时最大多径扩展影响的码元符号数为

$$k_{max} = 10T_{rms}/T_s = 10 \times 0.37/0.143 = 26 \tag{4}$$

在 IEEE802.16 中推荐的循环扩展为 32 个码元符号, 大于最大多径扩展, 因此可以消除 OFDM 符号间干扰。

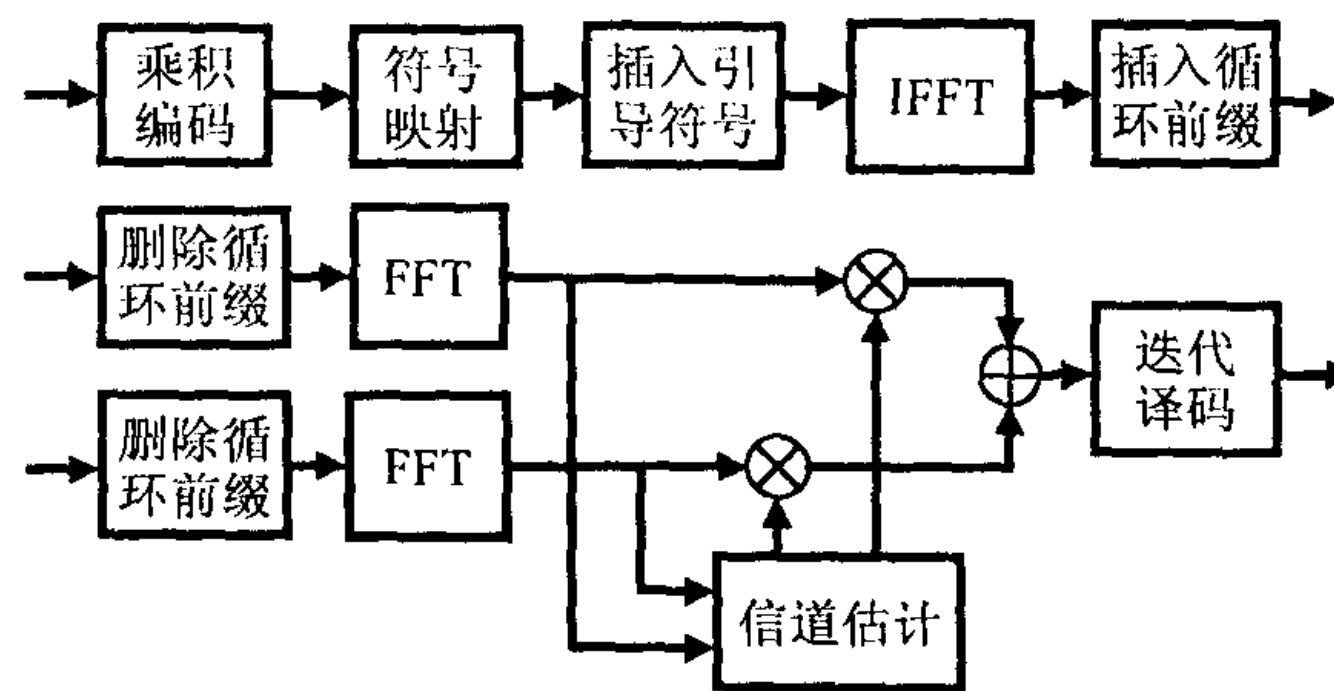


图 1 Turbo 乘积编码 OFDM 系统等效基带结构

3 OFDM 系统的信道估计和分集接收

OFDM 最佳信道估计技术是二维时频 Wiener 滤波技术, 当信道的相干时间远大于 OFDM 的符号周期 (包括循环前缀), 信道相干带宽远大于导频信号频率间隔时, 二维时频滤波可以取得良好的效果。但是在 IEEE802.16 草案中, 每个 OFDM 帧的信道衰落参数是独立的, 因此二维时频滤波技术不再适用, 而采用频域梳状导频来实现信道估计。设发端 M 个导频符号为 $\mathbf{X} = [x_0, x_1, \dots, x_{M-1}]^T$, 接收的导频符号为 $\mathbf{Y} = [y_0, y_1, \dots, y_{M-1}]^T$, 导频信号处的信道响应的最小二乘方估计为^[3]

$$\mathbf{H}_{p,LS} = \begin{bmatrix} y_0 & y_1 & \dots & y_{M-1} \\ x_0 & x_1 & \dots & x_{M-1} \end{bmatrix}^T \tag{5}$$

信道完整的频响特性是由导频信号处信道响应插值得到的。本文采用 FFT/IFFT 的插值方法。当信道的相干带宽远大于相邻导频的频率间隔时, LS 估计的准确性可以得到保证。但是当信道的相干带宽接近相邻导频间的频率间隔时, 信道估计会出现较大的误差, 从而导致编码和不编码 OFDM 系统出现错误平底效应。本文将分集接收和 Turbo 乘积编码用于 OFDM 系统的目的是为了减小和消除 OFDM 系统的错误平底。

在估计了信道的参数以后, 每个子载波实现最大比合并^[4]:

$$r_{\text{MRC}}[n, k] = H_1^*[n, k]r_1[n, k] + H_2^*[n, k]r_2[n, k] \quad (6)$$

对于 16QAM 信号, 最大比合并的结果进行归一化确保接收电平的一致性

$$y[n, k] = r_{\text{MRC}}[n, k]/(|H_1[n, k]|^2 + |H_2[n, k]|^2) \quad (7)$$

本文选择的 Turbo 乘积码参数为 $(64, 57, 4)^2$, 码率为 0.79, 译码采用文献 [5] 中的迭代译码, 译码无需信道噪声方差。对于 QPSK 调制, 比特信息量可以直接得到, 对于 16QAM 调制, 利用文献 [6] 的方法计算出每个比特信息量。

严格地讲, 式 (6) 最大比合并后的结果不是高斯变量^[7], 而文献 [5] 中 Turbo 乘积码的译码器是基于高斯信道和 Rayleigh 衰落信道, 因此可能不是最优的, 最优译码器应根据分集合并的结果采用最大似然准则设计, 这已超出本文研究的内容。本文将式 (6) 合并的结果作为高斯变量处理, 译码器仍采用文献 [5] 中的迭代译码器。

4 数值仿真结果

根据系统模型, 本文对分集接收的 Turbo 乘积编码 OFDM 系统的性能进行仿真。Turbo 乘积码参数为 $(64, 57, 4)^2$, 译码迭代为 6 次。符号映射为 QPSK 和 16QAM 两种方式, 每 8 个信息符号插入一个导频信号, 导频信号能量等于 QPSK/16QAM 信号平均能量。OFDM 调制采用 256 点 IFFT 实现, 循环扩展为 32。数值仿真结果如图 2 所示。纵坐标为误比特率 (BER), 横坐标为平均比特信噪比, 图例中 “Uncoded” 表示不编码, “TPC” 表示 Turbo 乘积编码, “1Rx” 表示无分集接收, “2Rx” 表示两个天线分集接收, “CSI” 表示精确已知信道参数。

在采样周期为 $0.571\mu\text{s}$ 的轻度多径信道中, 在无分集方式下, 编码 OFDM 相对于不编码 OFDM 大约有 4dB 的增益, 此时相邻导频的频率间隔为 61.6 kHz, 相邻导频信号上的衰落是相关的, 因此没有明显的错误平底。在采样周期为 $0.143\mu\text{s}$ 的严重多径信道中, 相邻导频的频率间隔为 246 kHz, 接近信道的相干带宽 270 kHz, 从而导致系统出现错误平底效应, 编码情况也是如此。从图中还可以看出, 无论是编码还是不编码 OFDM, 分集接收对系统的性能有明显改善, 在 10^{-4} 误比特率下, 分集增益达 15 dB。

同时采用 Turbo 乘积编码和分集接收对 OFDM 系统性能的改善更加明显, 在采样周期为 $0.571\mu\text{s}$ 的轻度多径信道中, 在 10^{-4} 误比特率下, QPSK 系统和 16QAM 系统相对于不编码无分集系统的增益达 20 dB 以上。在采样周期为 $0.286\mu\text{s}$ 的中度多径信道中, 编码分集系统的性能相对于轻微多径信道中系统恶化不明显, 也没有错误平底。在采样周期为 $0.143\mu\text{s}$ 的严重多径信道中, 单独采用编码和分集都出现错误平底, 同时采用 Turbo 乘积编码和分集接收, 错误平底效应被有效抑制。图 2 中同时给出了已知信道参数的编码分集 OFDM 系统的性能, 对比已知信道参数 OFDM 系统和 LS 估计的 OFDM 系统, 二者的性能差异只有 4 dB。

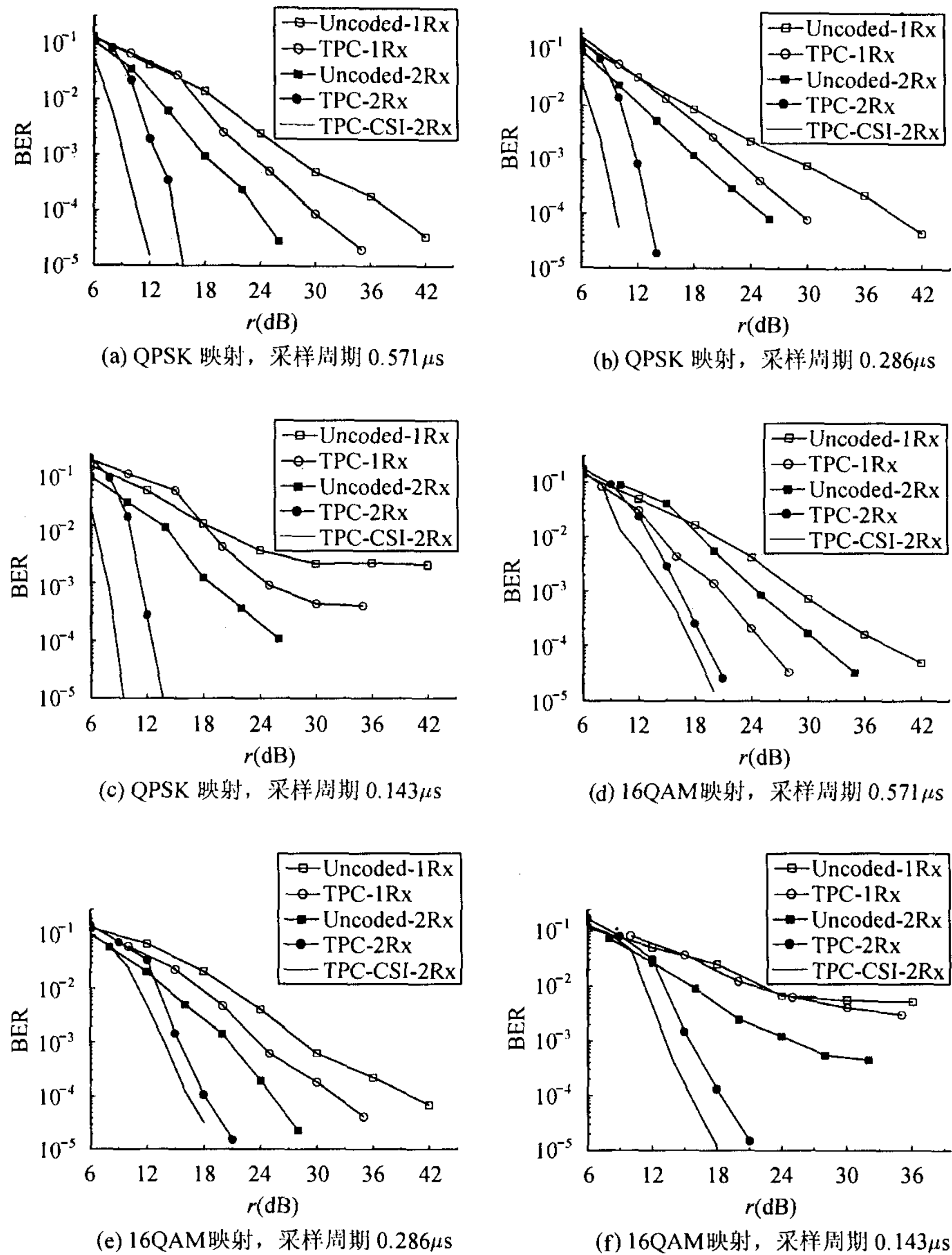


图 2 Turbo 乘积编码 OFDM 系统的性能

5 结论

本文研究 OFDM 系统中低复杂性的 LS 信道估计技术, 为了减小严重多径衰落信道中由 LS 估计带来的错误平底效应, 分集接收和 Turbo 乘积编码被用于改善系统的性能。结果表明, 同时采用分集接收和 Turbo 乘积编码可以有效抑制由 LS 估计带来的错误平底效应, 与已知信道参数的系统相比性能差异只有 4 dB。

参 考 文 献

- [1] Nee R V, Prasad P. OFDM for Wireless Multimedia Communications. Boston, Artech House, 1999: 229-252.
- [2] IEEE P802.16ab-01/01r2, Standard Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems, <http://www.ieee802.org/16/>

- [3] Meng-Han Hsieh, Che-Ho Wei. Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective fading channels. *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, 1998, 44(1): 217-225.
- [4] Okada M, Komaki S. Pre-DFT combining diversity assisted COFDM. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 2001, 50(2): 487-496.
- [5] Pyndiah R. Near-optimal decoding of product codes: block turbo codes. *IEEE Trans. on Comm.*, 1998, 46(8): 1003-1010.
- [6] Pyndiah R, Picart A, Glavieux A. Performance of block turbo coded 16-QAM and 64-QAM modulation. Proc. IEEE GLOBECOM'95 Conf., Singapore, 1995: 1039-1044.
- [7] Proakis J D 著, 张力军等译. 数字通信 (第三版). 北京: 电子工业出版社, 2001: 617-622.

刘 伟: 男, 1969 年生, 博士生, 主要从事无线数据传输和编码调制研究工作.

张海林: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信道编码、调制和高速数据传输等方面的研究工作.

刘增基: 男, 1936 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事通信网方面的研究工作.