

OFDM 系统中一种新的导频辅助信道估计算法¹

王建新 周 鹏 花汉兵

(南京理工大学电光学院 南京 210094)

摘 要: 无线 OFDM 系统中基于导频辅助的信道估计必须折衷考虑算法性能与算法复杂度。该文提出了一种新的信道估计算法。新算法利用维纳滤波与内插滤波相结合以降低信道估计的运算复杂度。分析和仿真结果显示,新算法在保持获得良好估计性能情况下,有效地降低了信道估计算法的复杂度。

关键词: 正交频分复用, 信道估计, 维纳滤波, 内插滤波

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)11-1805-07

A Novel Algorithm for Pilot-Aided Channel Estimation in OFDM Systems

Wang Jian-xin Zhou Peng Hua Han-bing

(School of Electron. Eng. & Optoelectronic Tech., NUST, Nanjing 210094, China)

Abstract The tradeoff between performance and complexity must be taken into account in channels estimation algorithm of wireless OFDM systems. This paper proposes a new algorithm for channel estimation in wireless OFDM systems, which aims at reducing the conventional algorithm complexity by using Wiener filtering combined with interpolation filtering. The analysis and simulation results show that the novel algorithm reduces the complexity remarkably with performance slightly degraded.

Key words Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), Channel estimation, Wiener filtering, Interpolation filtering

1 引言

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技术因传输速率高、抗多径的特点已受到各国移动通信界的关注, OFDM 调制技术已被采纳作为欧洲的数字音频广播系统(DAB)和地面数字视频广播系统(DVB-T)的标准。新的无线局域网(WLAN)标准 IEEE802.11a 及 MMAC 也把它作为物理层的传输手段,用于 5 GHz 频段内支持 6 Mbps 到 54 Mbps 的高速无线传输。为了获得良好的性能,无线 OFDM 系统中一个关键技术就是对移动信道的传递函数进行估值。

为了能估计出 OFDM 系统中移动信道的频率响应值,最常用的方法是利用导频辅助的信道估计算法^[1]。对于 OFDM 系统,多径衰落信道可以看成是在时间和频率上的一个二维信号,当进行信道估计时,我们是利用导频信号对信道在时频空间的不同点上进行采样,然后再采用插值滤波得到整个信道的频率响应值完成信道估计的,所以我们需要二维的采样定理和维纳滤波器理论来设计信道估计算法^[2,3]。目前基于维纳滤波信道估计算法的主要有二维维纳滤波信道估计算法以及两个分离一维维纳滤波信道估计算法。如果信道是慢衰落信道,信道的传递函数可以认为在一个或几个 OFDM 符号内是恒参的,文献[4,5]提出了相应的信道估计算法。对于宽带移动通信系统,无线信道往往是频率选择性和时变的,所以对应于 OFDM 系统中不同的子信道,其信道的传递函数是不相同的^[6]。通过内插滤波来对无线信道进行估计时,算法简

¹ 2003-06-15 收到, 2003-12-05 改回

单, 但因 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 和 ICI(Inter-Carrier Interference) 干扰分量的存在使其性能较差^[7]. 而 MMSE(Minimum Mean-Square Error) 意义下的信道估计算法充分利用信道的相关性, 利用维纳滤波对移动信道进行估计, 性能较好, 但具有相当高的运算复杂度^[8].

基于导频的信道估计就是要考虑算法复杂度和算法性能之间的折衷, 为了降低传统信道估计算法的运算复杂度, 本文在分析和研究以上两种滤波算法的基础上, 提出了一种将两种滤波算法结合使用来进行信道估计的新算法.

2 系统描述

设无线 OFDM 系统中的子载波数为 N , 信息比特经映射、串并转换成为 $X(k)$ 、经 IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) 后加上 G 个循环前缀 (Cyclic Prefix, CP), 为消除多径带来的 ISI(Inter-Symbol Interference), CP 的长度须大于信道的最大延时 τ_{\max} ^[9], 然后信号经 D/A 转换并调制发送到无线信道. 在接收端, 对接收信号进行解调、抽样、去除 CP, 再经 FFT (Fast Fourier Transform) 后得到 $Y(k)$. 此时, 无线信道的脉冲冲激响应可表示为^[10]

$$h(n) = \sum_{i=0}^{M-1} h_i e^{j2\pi f_{D_i} T n / N} \delta(\lambda - \tau_i), \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (1)$$

其中 M 为路径数, h_i 为第 i 条路径上的复增益, f_{D_i} 为第 i 条路径上的多普勒频偏, $T = NT_s$ 为 OFDM 有用符号周期, T_s 为采样周期, n 为接收端采样时刻, λ 为延时时间因子, τ_i 为第 i 条路径上延时, 为简化设 λ 和 τ_i 都为整数.

假设接收端能完全帧同步, 则 OFDM 接收信号中不存在 ISI, 所以接收信号可表示为^[10]

$$Y(k) = X(k)H(k) + I(k) + W(k), \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (2)$$

其中

$$H(k) = \sum_{i=0}^{M-1} h_i e^{j\pi f_{D_i} T} \frac{\sin(\pi f_{D_i} T)}{\pi f_{D_i} T} e^{-j(2\pi\tau_i/N)k}$$

$$I(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^{N-1} h_i X(k) \frac{1 - e^{j2\pi(f_{D_i} T - m + k)}}{1 - e^{j2\pi(f_{D_i} T - m + k)/N}} e^{-j(2\pi\tau_i m)/N}$$

$$W(k) = \text{DFT}\{w(n)\}$$

其中 $H(k)$ 为信道传递函数第 k 个子信道的频响值, $H(k)$ 是关于 k 的一个正弦函数, 其变化率取决于 τ_i/N , 通常, 在典型的多径瑞利衰落信道中 $\tau_{\max} = 10 \mu\text{s}$, 子载波数 N 较大 (本文中 $N = 512$), 所以 $H(k)$ 是关于 k 的低频信号分量. $I(k)$ 为因多普勒频偏产生的 ICI, 它与发送符号 $X(k)$ 有关, 而 $X(k)$ 是星座图上随机分布的变量, $w(n)$ 为 AWGN, 所以 $I(k) + W(k)$ 是关于子信道 k 的高频信号分量^[10].

本文中, OFDM 系统的导频结构采用网格状的导频结构, 如图 1 所示. 在频率方向, OFDM 符号从第一个子载波起每隔 N_F 个子载波插一个导频符号; 在时间方向, 每隔 N_T 个 OFDM 符号, 就插入一帧带有导频的 OFDM 符号. 根据抽样定理, 以及更有效地减小噪声, 导频符号间隔通常应该满足^[2,3]

$$\left. \begin{aligned} f_{D \max} T_{N+G} \cdot N_T &\approx 1/4 \\ \tau_{\max} \Delta f \cdot N_F &\approx 1/4 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 T_{N+G} , Δf 和 $f_{D\max}$ 分别表示带 CP 的 OFDM 符号长度, 子载波间的频率间隔和最大多普勒频偏。

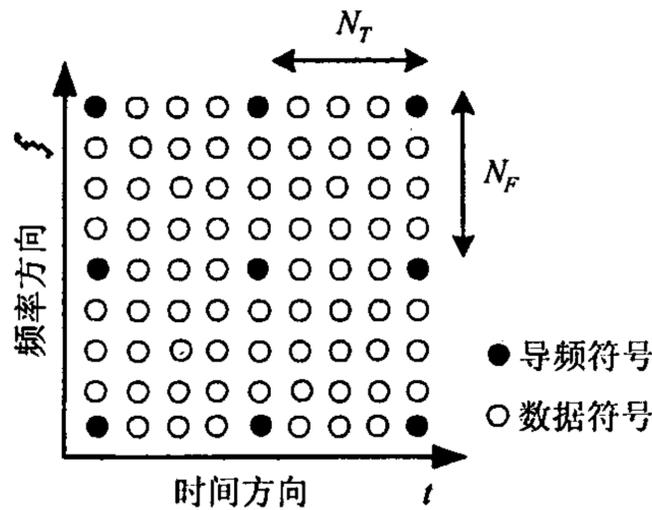


图 1 OFDM 导频网格图

3 新的信道估计算法

基于 MMSE 意义上的最佳滤波器的设计是频率方向和时间方向的二维维纳滤波器, 维纳滤波器的理想阶数为整个导频数。2-D 维纳滤波器具有很高的运算复杂度, 一种替代的方法就是利用分离维纳滤波器, 即两个 1-D 的维纳滤波器, 分离滤波器能在基本保持性能不变的情况下降低运算复杂度。维纳滤波信道估计算法性能好, 但运算复杂度较高。

如前所述, 信道频率响应值 $H(k)$ 是关于子信道 k 的低频信号分量, 所以一种更为简单的插值滤波信道估计算法, 即内插滤波信道估计算法可大大地降低运算复杂度。内插滤波信道估计算法首先是利用 LS(Least-Squares) 算法估计出导频位置上的信道频率响应值, 然后通过内插滤波估计其余子信道的频率响应值, LS 算法估计出来的信道频率响应值中因存在干扰分量 (ICI 和 AWGN) 使得内插滤波信道估计算法性能很差。常用的内插滤波器主要可分为线性插值滤波器、二阶多项式插值滤波器、样条插值滤波器以及采用变换域插值滤波器 [10,11]。

通过对以上两种滤波算法的分析, 并利用两种算法各自的优点, 本文提出了一种新的信道估计算法, 就是利用两种滤波算法相结合的方法来进行信道估计, 其原理如图 2 所示。

对于接收信号 $Y(k,l)$, 抽取出带有导频的子信道上 (设其为集合 P , 导频总数为 N_{Tap}) 的信号 $Y_P(k,l)$, 与导频归一化后, 得到 $H_P(k,l)$, 既然已知导频的位置, 并充分利用信道的相关性, 可以通过维纳滤波对 $H_P(k,l)$ 滤波得到导频位置上的频率响应值 $\hat{H}_P(k,l)$, 然后通过不同的内插滤波来估计出其余子信道的频率响应值。

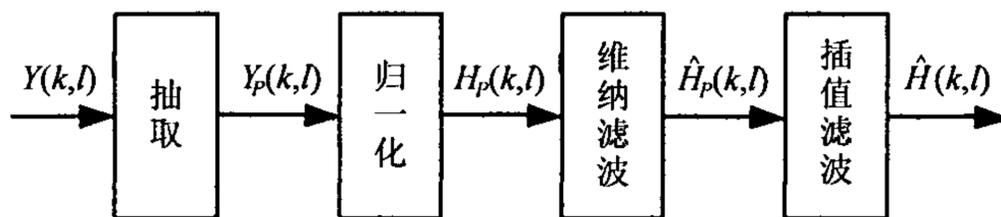


图 2 新算法的原理图

3.1 2-D 维纳滤波与内插滤波相结合

首先通过 LS 算法对导频位置 (k',l') 子信道上的频响值进行初步估计, 设为 $H_{LS}(k',l')$, 在 MMSE 意义下的信道估计是利用 2-D 维纳滤波对所有的带有导频的子信道进行滤波, 则带

有导频的子信道的频率响应值为^[2,3]

$$\hat{H}(k, l) = \sum_{\{k', l'\} \in P} w(k, l; k', l') H_{LS}(k', l') \quad (4)$$

其中 $w(k, l; k', l')$ 为维纳滤波器的系数, 其阶数为整个导频数, 即 N_{Tap} 。对于整个导频的信道估计公式可以用矩阵形式表示, 即

$$\hat{H}_P = R_{HY} R_{YY}^{-1} H_{LS} \quad (5)$$

其中 R_{YY} 为带有导频的子信道的输出值的自相关矩阵, R_{HY} 为带有导频的子信道的频率响应值与带有导频的子信道输出值互相关矩阵。通过在 MMSE 意义下的维纳滤波算法估计出带有导频的子信道的频率响应值, 因信道的频率响应值为一个低频信号分量, 所以可以通过采用内插滤波的方法估计出其余子信道的频率响应值。

3.2 分离维纳滤波与内插滤波相结合

基于 2-D 维纳滤波与插值滤波相结合的信道估计算法的复杂度相对也较高, 通过两个分离 1-D 维纳滤波和内插滤波相结合的信道估计算法可进一步降低其运算复杂度。主要原理是首先在频率方向利用一维维纳滤波对所有的带有导频的子信道进行滤波估值, 然后在时间方向同样利用一维维纳滤波对所有的带有导频信道的频响值进行滤波估值, 最后分别在频率和时间方向上通过内插滤波来估计出其余子信道的频率响应值。这样就完成了对时频栅格中所有子信道的频率响应值的估计。

3.3 信道的相关函数

本文采用 WSSUS(Wide-Sense Stationary Uncorrelated Scattering) 信道模型。在多径瑞利衰落信道中, 信道输出值的自相关矩阵为^[8]

$$R_{YY}(\Delta k, \Delta l) = 1/\text{SNR} + R_f(\Delta f, \Delta t) \quad (6)$$

式中 SNR(Signal Noise Ratio) 表示信噪比。信道输出值与信道频响值的互相关矩阵为

$$R_{HY}(\Delta k, \Delta l) = R_f(\Delta f, \Delta t) \quad (7)$$

其中 $R_f(\Delta f, \Delta t) = R_f(\Delta f)R_f(\Delta t)$ 表示信道频率响应的自相关, 可表示如下:

$$R_f(\Delta f) = \begin{cases} (1 - e^{-j2\pi\Delta f T_{\text{CP}}}) / (j2\pi\Delta f T_{\text{CP}}), & \Delta f \neq 0, \\ 1, & \Delta f = 0, \end{cases} \quad R_f(\Delta t) = J_0(2\pi f_{D \max} \Delta t)$$

式中 T_{CP} 表示 CP 的长度, $J_0(\cdot)$ 表示第一类零阶贝塞尔函数。

4 低阶近似

将式 (6) 和 (7) 代入式 (5) 中, 可得

$$\hat{H}_P = R_{HY} [R_{HY} + (I/\text{SNR})]^{-1} H_{LS} \quad (8)$$

可以证明 R_{HY} 为一正规矩阵, 所以通过对式 (8) 进行奇异值分解^[5], 式 (8) 可表示为

$$\hat{H}_P = U \Delta U^H \hat{H}_{LS}, \quad \Delta = \text{diag} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_1 + (1/\text{SNR})}, \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + (1/\text{SNR})}, \dots, \frac{\lambda_{N_{\text{Tap}}}}{\lambda_{N_{\text{Tap}}} + (1/\text{SNR})} \right) \quad (9)$$

其中 U 为一酉矩阵, H 表示共轭转置, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_{N_{\text{Tap}}}$ 为 R_{HY} 的奇异值, 它反应了信道的相对能量^[5], 因为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_{N_{\text{Tap}}}$, 所以信道的相对能量主要集中在前几个 $\lambda_1, \dots, \lambda_K$, $K \ll N_{\text{Tap}}$, 所以一种更为简单的维纳滤波算法结构如图 3 所示。

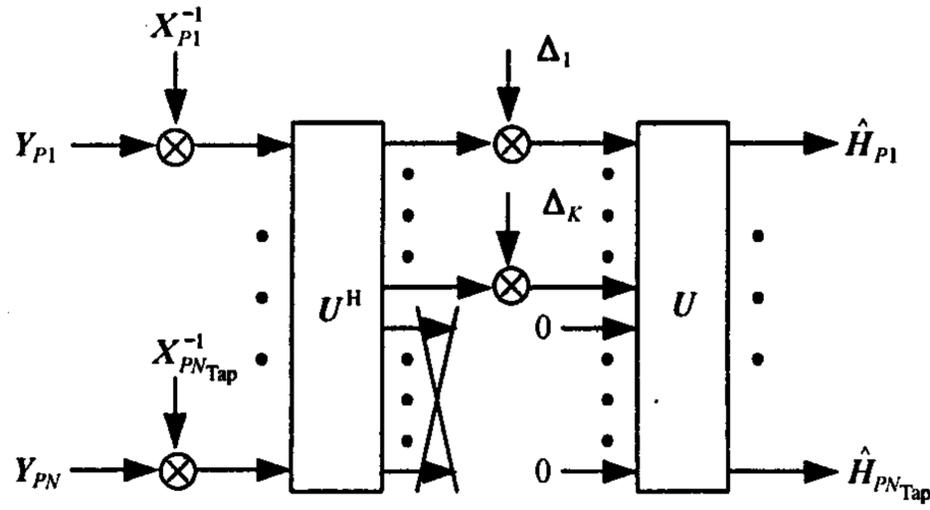


图 3 低阶近似算法的原理结构图

在分离滤波与内插滤波相结合的信道估计算法中, 对带有导频的子信道进行维纳滤波时, 同样也可以用低阶近似来降低运算复杂度。

5 复杂度分析

利用维纳滤波与内插滤波相结合的信道估计算法主要目的是为了降低传统的维纳滤波信道估计算法的运算复杂度和提高内插滤波信道估计算法的精度。在 2-D 维纳滤波信道估计算法中, 对于每一个子信道, 都需要在时频二维空间中选择与之最邻近的 K_P 个带有导频的子信道的频率响应值, 所以估计出一个子信道的频率响应值就需要 K_P 个乘法器^[12]。而在分离维纳滤波信道估计算法中, 对于每个子信道, 在频率方向上选择最近的 K_f 个导频, 在时间方向选择最近的 K_t 个导频, 所以估计出一个子信道平均需要 $(K_f/N_T) + K_f$ 个乘法器^[12]。而在新的信道估计算法中, 采用 2-D 维纳滤波与内插滤波相结合信道估计算法平均估计出一个子信道只需要 $K_P/(N_T \times N_P) + \alpha$ 个乘法器; 而采用分离滤波与内插滤波相结合信道估计算法估计出一个子信道仅需要 $(K_f/N_T + K_t)/(N_T \times N_P) + \alpha$ 个乘法器, α 仅与内插滤波的方式有关, 采用线性内插滤波时, $\alpha = 2$ 。可以看出, 采用新的算法大大地降低了算法的复杂度。在对导频位置上的子信道进行维纳滤波时, 采用低阶近似的方法可使新算法更为简单, 从而进一步降低运算复杂度。

6 计算机仿真

6.1 仿真系统参数

在系统仿真中, 子滤波数为 512, 带宽为 1 MHz, 载波频率为 1 GHz, 循环前缀为 16, 采用 16QAM 调制方式进行符号映射, 并设车载速度为 100 km/h。此时, 多谱勒频率为 $f_D = Vf_c/c = 92.6$ Hz, V 为车载速度, f_c 为载波频率, c 为光速。而相对多谱勒频偏因子 $f_D T = 0.048$, T 为 OFDM 有效符号长度。仿真中, 导频结构采用网格状导频结构, $N_F = 4, N_T = 4$, 在时间方向上采用 81 帧 OFDM 符号, 所以总的导频数即为 128×21 。信道采用两径瑞利衰落信道, 路径的最大延时为 $10 \mu s$ 。

6.2 仿真结果

6.2.1 传统的信道估计算法 在传统的信道估计算法仿真中, 分别采用内插滤波、2-D 维纳滤波和分离 1-D 维纳滤波的方法进行信道估计仿真。对于网格状导频结构, 几种内插滤波信道估计的方法性能基本相当, 作为性能比较, 仿真中只采用线性插值滤波算法; 基于 2-D 维纳滤波信道估计算法, 仿真中采用欧氏距离最近的 64 个导频^[3], 即维纳滤波的阶数为 64 阶; 基于两个分离的 1-D 维纳滤波信道估计算法, 首先在频率方向上选择所有 128 个导频, 其次在时间方向选择 21 个导频。仿真结果如图 4 所示, 图中 SNR 表示信噪比, SER(Symbol Error Rate) 表示误符率。

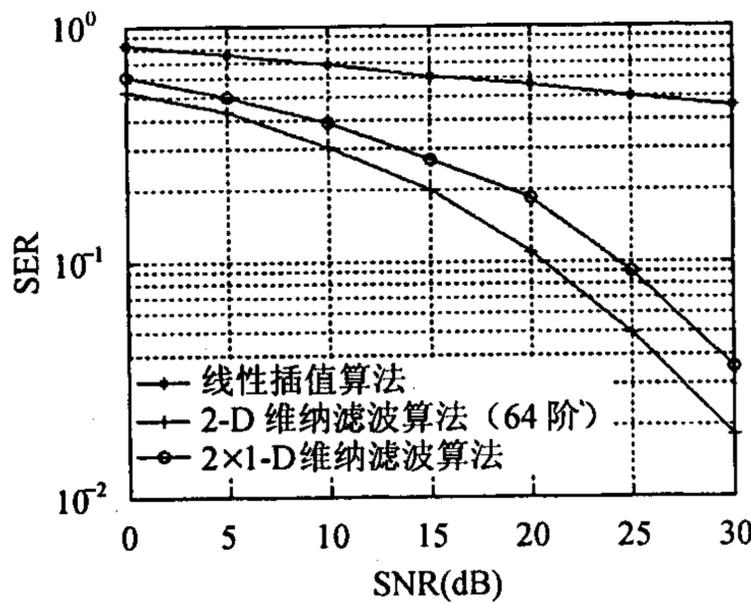


图4 传统的信道估计算法

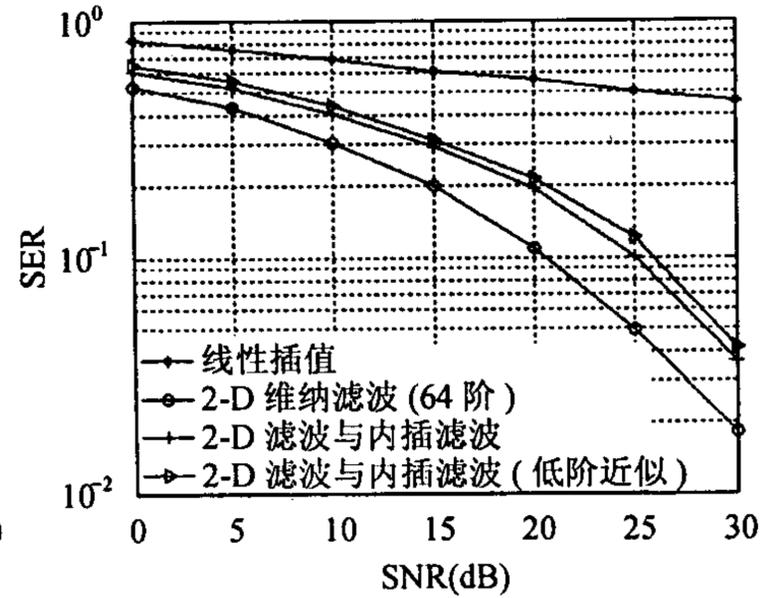


图5 2-D 滤波与内插滤波相结合

6.2.2 新的信道估计算法 在新的信道估计算法仿真中，分别用传统的 2-D 维纳滤波 (64 阶) 和线性插值滤波作性能比较，仿真结果如图 5 所示，从图中可以反映出，利用新算法的性能比插值滤波算法的性能有很大的提高，但比传统的 2-D 维纳滤波算法性能要差 3-4 dB，但是新算法的复杂度却大大地降低了，利用低阶近似的方法进一步降低了复杂度，而性能下降有限。

其次是利用分离维纳滤波及其低阶近似与内插滤波相结合的方法来进行信道估计。仿真结果如图 6 所示，从图中也可以反映出，新算法的性能相对于传统的插值滤波也有很大的改善，但相对于传统的分离滤波算法性能要低 2-3 dB，同样，新算法大大的降低了传统的分离滤波算法的复杂度，通过低阶近似的方法则使新算法得以简化，而性能却基本保持不变。

最后，本文用不同的车载速度对新信道估计算法性能的影响进行了仿真，仿真结果如图 7 所示。从图中可以看出，随着车载速度的增加，新算法的性能也随之变差，主要原因是随着车载速度的增加其多谱勒频偏也在提高，所引起的 ICI 随之也在增加。

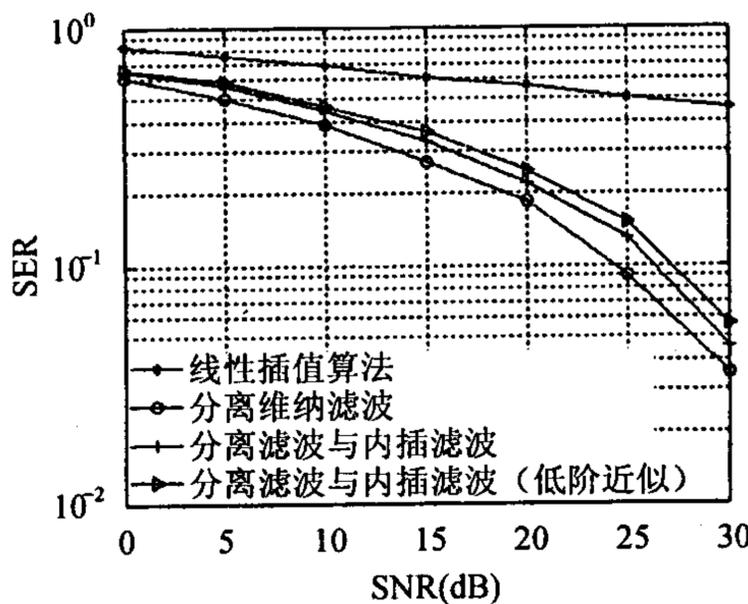


图6 分离维纳滤波与内插滤波相结合

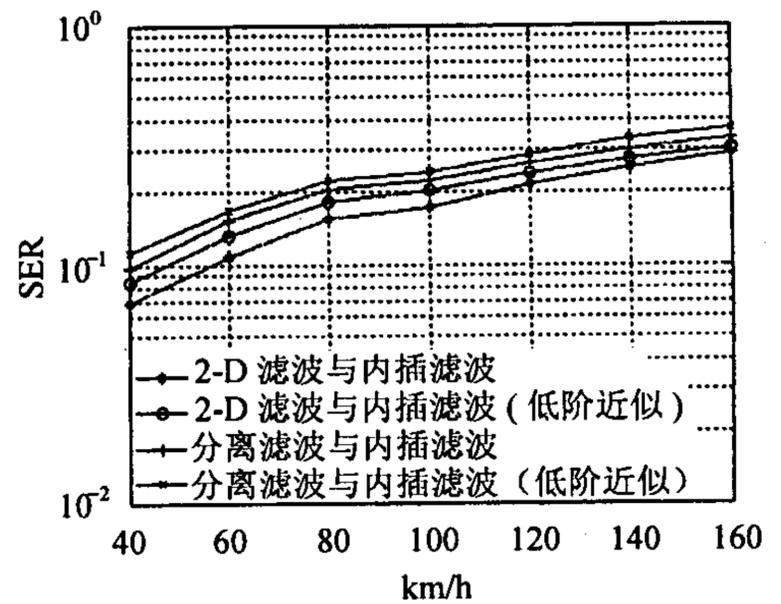


图7 车载速度对性能的影响 (SNR=20 dB)

7 结论

本文中提出了一种利用维纳滤波与内插滤波相结合的方法来进行信道估计新算法。新算法的思想是利用时变信道的频率响应值是关于子信道是慢变的，首先利用维纳滤波估计出所有的带有导频的子信道的频率响应值，然后通过内插滤波来估计出其余子信道的频率响应值。新算法的主要目的是减少传统维纳滤波的运算复杂度，但也能够保证新算法有很好的性能。在新算法中，分别采用 2-D 维纳滤波和分离维纳滤波与内插滤波相结合的方法，利用了低阶近似能进

一步降低新算法运算复杂度。分析和仿真结果显示,新算法在保证获得良好信道估值性能的情况下,有效地降低了传统的维纳滤波算法的运算复杂度。

参 考 文 献

- [1] Cavers J K. An analysis of pilot-symbol assisted modulation for Rayleigh-fading channels. *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, 1991, 40(4): 686-693.
- [2] Hoeher P, Kaiser S, Robertson P. Pilot-symbol-aided channel estimation in time and frequency. Proc IEEE GLOBECOM'97, Phoenix, Nov.1997: 90-96.
- [3] Hoeher P, Kaiser S, Robertson P. Two-dimensional pilot-symbol-aided channel estimation by Wiener filtering. Proc. ICASSP-97, Munich, Germany, Apr. 1997: 1845-1848.
- [4] Van D B, Edfors O, Sandle M. On channel estimation in OFDM systems. Proc IEEE Veh. Tech. Conf., Chicago, IL, July 1995: 815-819.
- [5] Edfors O, Sandle M, Van D B. OFDM Channel estimation by singular value decomposition. *IEEE Trans. on Comm.*, 1998, COM-46(7): 931-939.
- [6] Cimini L J. Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing. *IEEE Trans. on Comm.*, 1985, COM-33(7): 665-675.
- [7] Coleri S, Ergen M, Puri A C. Channel estimation techniques based on pilot arrangement in OFDM systems. *IEEE Trans. on Broadcasting*, 2002, BC-48(3): 223-229.
- [8] Sgraja C, Lindner J. Estimation of rapid time-variant channels for OFDM using Wiener filtering. IEEE ICC'2003, Alaska, USA, May 2003: 2390-2395.
- [9] Proakis J G. Digital Communication. 3th Edition, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1995: 686-689.
- [10] Zhao Y, Huang A. A novel channel estimation method for OFDM mobile communications systems based on pilot signals and transform domain processing. Proc. IEEE 47th Vehicular Technology Conf., Phoenix, USA, May 1997: 2089-2093.
- [11] Hsieh M, Wei C. Channel estimation for OFDM systems based on comb-type pilot arrangement in frequency selective channels. *IEEE Trans. on Consumer Electron.*, 1998, 44(1): 217-225.
- [12] Sandel M, Edfors O. A comparative study of pilot-based channel estimators for wireless OFDM Div. of Signal Processing, Lulea Univ. of Technology, Lulea, Sweden, Tech. Rep., Sep 1996.

王建新: 男, 1963 年生, 教授, 主要研究方向为数字信号处理、软件无线电。
周 鹏: 男, 1977 年生, 硕士生, 主要研究方向为无线 OFDM 技术。
花汉兵: 男, 1973 年生, 助理研究员, 主要研究方向为信号与信息处理。