

文章编号: 2095-4980(2014)02-0223-06

基于最佳相关序列的 MIMO-OFDM 系统信道估计

王翔宇, 黄焱, 邵永庆

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450002)

摘要: 基于序列相关性提出了一种多输入多输出-正交频分复用(MIMO-OFDM)系统的时域信道估计方法。通过在 OFDM 符号间插入一种具有最佳相关性的实训练序列, 在接收端将接收序列与训练序列作相关运算, 得到信道的时域冲激响应。并通过信道阶数估计, 进一步提高算法估计性能。理论分析和实验仿真结果均表明, 与现有方法相比, 本文方法具有更高的系统传输效率和更高的估计性能。

关键词: 多输入多输出-正交频分复用; 时域信道估计; 最佳相关序列; 信道阶数估计

中图分类号: TN919.3

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201402.0223

Channel estimation for MIMO-OFDM systems based on sequence with perfect correlation

WANG Xiang-yu, HUANG Yan, SHAO Yong-qing

(Institute of Information System Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: Based on the correlation property of sequences, a time-domain channel estimation algorithm for Multi-Input Multi-Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing(MIMO-OFDM) is proposed. The real training sequences with perfect correlation property is inserted between OFDM symbols, then the channel impulse response in time domain can be obtained by calculating the cross-correlation between the received sequences and trained sequences. The estimation performance is further improved by the estimation of channel order. The results of both theoretical analysis and experiment show that the proposed method has more excellent estimation performance with higher system transfer efficiency than the existing methods.

Key words: Multi-Input Multi-Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing; time-domain channel estimation; Sequence with perfect correlation; estimation of channel order

多输入多输出(MIMO)技术可以利用复用获得更高的系统容量, 或利用分集获得更高的系统性能。正交频分复用(OFDM)技术将高速数据分散到多个并行的子信道上传输, 且各子信道正交重叠, 能够有效克服多径衰落的影响, 并提高系统传输效率。MIMO-OFDM 结合二者的优势, 因此成为下一代无线通信系统的核心技术之一。

MIMO-OFDM 系统的空时译码和相干检测等都需要预先获得系统信道状态信息, 因此信道估计是该系统的关键技术和重要研究方向之一。在信道估计方法中, 盲估计方法^[1-2]不需要训练序列, 系统传输效率较高, 但普遍存在计算复杂度高和收敛速度慢的问题。基于训练序列的频域信道估计方法中, 文献[3-4]提出变换域插值等方法来提高算法估计性能, 算法计算量较大。时域信道估计方法中, 文献[5]提出了一种基于 Gold 序列自相关性的 OFDM 系统定时同步和信道估计算法, 该方法训练序列不附加前缀, 算法计算量小, 但只分别利用训练序列的一部分数据来估计各径信道状态信息, 因此算法性能较差。文献[6]提出了一种基于 m 序列良好的自相关性的信道估计方法, 训练序列也附加循环前缀, 使算法在较低计算复杂度下能够获得较好的估计性能。但 m 序列可选长度有限, 且序列的自相关除峰值外并不为零, 序列相关性并不理想, 因而增加了一定的计算量, 且多天线情况下各训练序列在时间上正交, 增加系统开销。文献[7-8]则分别提出了基于不同多相序列的时域信道估计方法, 训练序列为复序列, 算法计算量和系统复杂度相对实训练序列更大。

为提高系统传输效率和进一步降低算法计算量,提出一种基于最佳相关序列的时域信道估计方法,该算法利用序列的自相关函数值除峰值外均为零的特性,从而有效降低算法计算量,并利用序列理想的自相关性,通过各发送天线上训练序列的设计,从而减小训练序列占用系统开销,提高系统传输效率。此外,结合信道阶数估计算法,减少噪声对估计结果的影响,从而进一步提高算法估计精确度。

1 系统模型

本文算法对应 MIMO-OFDM 系统模型见图 1,为简化算法描述过程,假设收发天线数均为 2。在发送端,数据经调制和空时编码后生成对应不同发送天线的多路数据,经串并变换后,通过快速傅里叶反变换(Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)变换到时域,再进行并串变换并插入训练序列和循环前缀(训练序列也加前缀)。在接收端先去掉前缀,再利用接收到的训练序列与本地不同循环移位的训练序列求相关,从而得到时域信道,经 N 点快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT),变换到频域得到频域信道 H_i , N 为 OFDM 子载波数。获得连续 2 个训练序列处的频域信道后,通过线性插值获得二者间数据符号处信道。同时数据符号在经过与发送端对应变换相反的变换后,利用得到的频域信道进行空时译码和解调,最终还原出原数据。

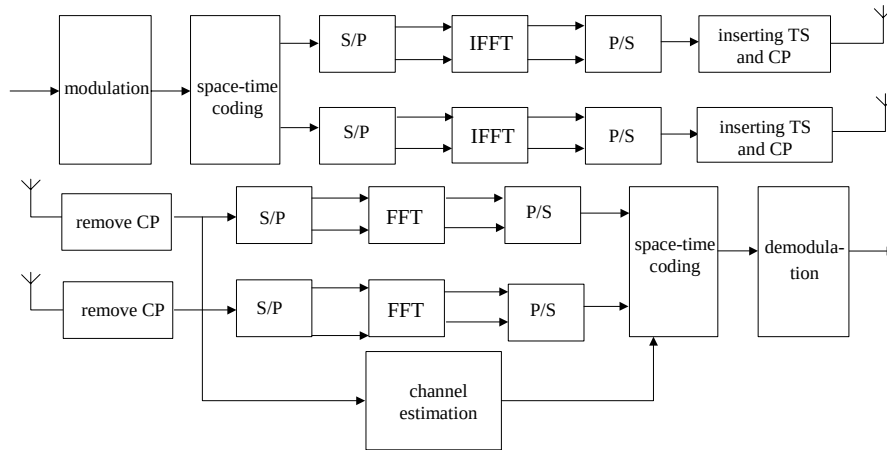


Fig.1 MIMO-OFDM system model
图 1 MIMO-OFDM 系统模型

系统信道模型为离散多径信道,各收发天线对信道阶数相同且信道间互不相关,阶数 L 未知但保持不变。系统空时编码选择 Alamouti 方案的空时分组码(Space Time Block Coding, STBC),因此需假设在共同进行空时编码的 2 个数据符号内信道保持不变(与发送天线数及编码有关)。信道离散冲激响应由抽头延时模型表示为 $h = [h_0, h_1, \dots, h_{L_c-1}]^T$, 其中 L_c 为训练序列和数据符号的前缀长度,前缀长度大于信道阶数($L_c \geq L$),且 h 满足条件 $\{h_i = 0 \mid L \leq i \leq L_c - 1\}$ 。

2 信道估计

2.1 训练序列设计

本算法提出一种具有最佳相关性的实序列作为训练序列。该序列由 0 和 ± 1 构成,可通过计算机搜索或 2 个不同长度的短序列组合等方式来获取。序列的自相关函数为:

$$R(i) = \sum_{j=0}^{L_t-1} (t(j) \times t(j-i)) = \begin{cases} n & i = 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t(j)$ 为训练序列第 j 位; L_t 为序列长度; n 为不大于序列长度的数。而 m 序列(序列元素为 ± 1)的自相关为:

$$R(i) = \begin{cases} L_m & i = 0 \\ -1 & \text{else} \end{cases} \quad (2)$$

式中: L_m 为 m 序列长度,可以看出 m 序列不满足理想相关性。此外,定义序列的能量效率为:

$$\eta = R(0) / (L_t \times \max[t^2(j)]) \quad (3)$$

易知 $0 \leq \eta \leq 1$, m 序列的能量效率为 1, 目前尚未发现长度大于 4 且满足 $\eta = 1$ 的最佳相关实序列(长度为 4 的有 [1,1,1,-1] 及其循环移位和取反序列)。所以在序列中添加 0 元素, 降低一定序列能量效率来获得序列的最佳自相关性。

此外, 算法估计性能与训练序列长度有关^[6], 训练序列长度越长, 估计性能越好, 因此训练序列长度选择大于信道阶数的 N_t 倍, 其中 N_t 为发送天线数。各天线上训练序列的设计如下: 假设天线 1 发送训练序列为 $t(n)$, 则天线 2 发送序列为序列 $t(n)$ 循环右移的 $t^j(n)$, 其中 $L_c \leq j \leq L_t / m$ 表示循环移位数, 后续发送天线依此类推。然后各天线训练序列分别加上相应循环前缀后, 间隔若干 OFDM 符号插入发送序列, 发送天线 2 的情形如图 2 所示。

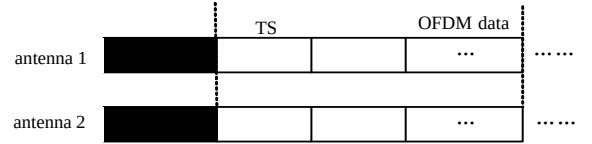


Fig.2 Training sequence insert method
图2 训练序列插入方式

从图 2 可看出, 通过各发送天线上训练序列的设计, 不同天线同时发送训练序列, 从而相对提高系统传输效率。

2.2 信道估计

假设各发送天线上训练序列为 $t_i = [t_i(-L_c), \dots, t_i(0), t_i(1), \dots, t_i(L_t - 1)]^T$, 对应各接收天线上接收序列为 $r_i = [r_i(-L_c), \dots, r_i(0), r_i(1), \dots, r_i(L_t - 1)]^T$ 。其中 i 分别表示发、收天线序号, L_t 表示训练序列长度, L_c 表示循环前缀长度。

各接收天线与发送天线间信道, 分别利用相应接收天线上的接收序列进行估计, 因此可以忽略接收天线序号, 则去掉前缀后的接收序列为:

$$r(k) = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=0}^{L_c-1} h_{ij} t_i^j(k-j) + n(k), \quad k = 0, 1, \dots, L_t - 1 \quad (4)$$

式中: N_t 表示发送天线数; h_{ij} 表示第 i 个发送天线到接收天线的第 j 径信道; $n(k)$ 为零均值, 方差为 σ^2 的高斯白噪声, 易知上式等价于:

$$r(k) = \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=0}^{L_c-1} h_{ij} t_i^j(k) + n(k), \quad k = 0, 1, \dots, L_t - 1 \quad (5)$$

式中 t_i^j 为序列 t_i 循环右移 j 位后的序列。将接收序列与本地训练序列 t_1 的不同循环右移序列求相关可得:

$$R_1(n) = \sum_{k=0}^{L_t-1} r(k) t_1^n(k) = \sum_{k=0}^{L_t-1} \left\{ \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=0}^{L_c-1} h_{ij} t_i^j(k) + n(k) \right\} t_1^n(k) = \sum_{k=0}^{L_t-1} \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=0}^{L_c-1} h_{ij} t_i^j(k) t_1^n(k) + \sum_{k=0}^{L_t-1} n(k) t_1^n(k) \quad (6)$$

其中, $0 \leq n \leq L_c - 1$, 表示本地序列循环右移位数。由于不同发送天线上训练序列的设计, 不同发送天线训练序列循环右移位数 L_c 以内的所有序列间相关值为零, 则:

$$R_1(n) = \sum_{k=0}^{L_t-1} \sum_{j=0}^{L_c-1} h_{1j} t_1^j(k) t_1^n(k) + \sum_{k=0}^{L_t-1} n(k) t_1^n(k) = \sum_{j=0}^{L_c-1} h_{1j} \sum_{k=0}^{L_t-1} t_1^j(k) t_1^n(k) + \sum_{k=0}^{L_t-1} n(k) t_1^n(k) \quad (7)$$

由于噪声与训练序列间相关性低, 噪声序列与训练序列间的相关值相对训练序列的自相关峰值较低, 可视为噪声影响被降低(降低程度与训练序列长度和能量效率有关), 因此可忽略第 2 项。且由序列 t_i 的自相关特性可得:

$$R_1(n) = h_{1n} \sum_{k=0}^{L_t-1} t_1^n(k) t_1^n(k) = h_{1n} n \quad (8)$$

式中 n 为训练序列自相关峰值 $R_1(0)$, 则可得信道估计为:

$$\hat{h}_1 = R_1 / n \quad (9)$$

式中: $R_1 = [R_1(0), R_1(1), \dots, R_1(L_c - 1)]$; $\hat{h}_1 = [\hat{h}_{10}, \hat{h}_{11}, \dots, \hat{h}_{1L_c-1}]$, 同理可得其他天线对间信道。

2.3 信道阶数估计

易知, 算法假设信道阶数为循环前缀长度, 且不考虑噪声的影响, 在估计出的 $\hat{h}_i = [\hat{h}_{i0}, \hat{h}_{i1}, \dots, \hat{h}_{iL_c-1}]$ 中, 前 L (实际信道阶数) 项为实际信道值叠加上噪声干扰, 后 $L_c - L$ 项为噪声干扰。因此, 算法估计性能与循环前缀长度有关, 循环前缀越长, 噪声干扰项越多, 估计误差越大。此外, 算法计算量也与循环前缀长度有关, 前缀越长, 算法计算量越大。而由于噪声与训练序列间相关性差, 在一定信噪比范围内, 初步估计出的信道后 $L_c - L$ 项值偏小, 可依此来判断实际信道阶数, 从而避免计算后 $L_c - L$ 项的同时提高算法性能。为提高信道阶数估计对噪声的鲁棒性, 可以对若干训练序列处的信道估计值以及各收发天线对信道估计值进行联合处理, 从而估计信道阶数。

对于 2 发 2 收天线系统, 具体信道阶数估计方法为: 首先选取的训练序列长度和循环前缀长度值应较大(要满足 $L_1/2 \geq L_c \geq L$), 再根据上节所述方法初步估计出各收发天线间信道 $\hat{h}_i, i=1 \sim 4$, i 表示收发天线对序号。然后对连续若干个训练序列处的估计结果求平均值, 得到 $\hat{h}_i'$ 。再对各收发天线对信道估计值的绝对值求平均,

得 $\hat{g}_j = \sum_{i=1}^4 |\hat{h}_{ij}| / 4$, j 表示信道径数, 并对得到的结果进行加窗平滑, 得到平滑后的 $\hat{g}_j'$ 。对于平滑窗长大小的选择, 窗长过小则受噪声影响仍较大, 估计误差大; 窗长过大, 导致实际信道阶数后几个的估计值, 受实际信道估计值影响而被加大, 同样会导致阶数估计值与实际值间偏差越大。经研究发现, 窗长设为 7 时, 阶数估计效果较为理想, 估计值与实际值偏差在 2 以内。平滑函数为:

$$\hat{g}_j' = (\hat{g}_{j-3}/2 + \hat{g}_{j-2}/2 + \hat{g}_{j-1}/2 + \hat{g}_j + \hat{g}_{j+1}/2 + \hat{g}_{j+2}/2 + \hat{g}_{j+3}/2)/4, \quad 3 \leq j \leq L_c - 4 \quad (10)$$

计算判决门限 $M = (\max(\hat{g}_j') + \min(\hat{g}_j')) / 2$ 。然后从 $\hat{g}_{L_c-1}'$ 开始, 依次比较 $\hat{g}_j'$ 和 M 的大小, 直到某个 j 值满足 $\hat{g}_j' \geq M$, 则估计出的信道阶数为 $\hat{L} = j$ 。在估计出信道阶数后, 则信道估计算法只需要计算 $R_i = [R_i(0), R_i(1), \dots, R_i(\hat{L}-1)]$ 和 $\hat{h}_i = [\hat{h}_{i0}, \hat{h}_{i1}, \dots, \hat{h}_{i\hat{L}-1}]$ 。从而进一步减小估计算法计算量, 且减小噪声的影响, 提高算法估计性能。

3 实验仿真

实验仿真系统为 2 发 2 收天线, 16QAM 调制信号, 空时编码方案为 Alamouti 方案的空时分组码。各天线对间信道均为 Jakes 模型莱斯衰落信道, 且互不相关, 信道阶数分别为 10 和 30, 最大多普勒频移分别为 20 Hz 和 60 Hz。OFDM 子载波数为 512, 子载波间隔 10 kHz, OFDM 符号和训练序列循环前缀长都为 50, 每隔 8 个 OFDM 符号插入训练序列, 对训练序列和 OFDM 符号功率进行归一化。

首先, 选取长度为 124 的最佳相关序列(序列元素为 0 和 ± 1 , 由长度 31 序列和长度 4 序列组合而成), 在不同信噪比下分别进行 200 次信道阶数估计, 验证阶数估计的准确性。

阶数估计结果不小于且不大于实际值 2 以上的概率(因加窗平滑)如图 3 所示, 图 3 中, “ L ” 表示信道阶数, “ f_m ” 表示最大多普勒频移。从图 3 中可以看出, 阶数估计正确率在信噪比 0 dB 时达 95% 以上, 验证本文阶数估计算法的可靠性。

然后仿真比较基于长度为 124 最佳相关序列在信道阶数估计前后、基于长度为 127 的 m 序列和频域 LS 信道估计性能。估计性能包括均方误差和误码率, 其中均方误差的定义为:

$$MSE = (1/N) \sum_{i=0}^{N-1} \{[H(i) - \hat{H}(i)]^* [H(i) - \hat{H}(i)]\} \quad (11)$$

式中: N 为子载波数; $H(i)$ 为频域信道; $*$ 表示取共轭, 并将各收发天线对、各 OFDM 符号对应信道均方误差求平均。

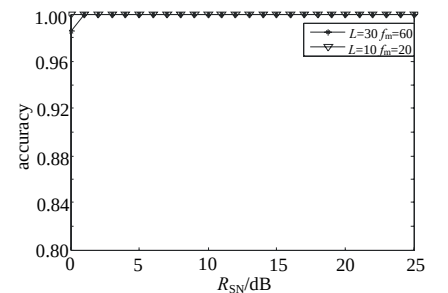


Fig.3 Accuracy of channel order estimation
图 3 信道阶数估计正确率

不同信道估计算法性能比较如图4所示,分别为在不同信道条件下的频域信道 H 均方误差和解调误码率曲线。可以看出,频域LS估计算法计算量最小,但性能差于基于序列相关性的时域信道估计算法。在信道阶数估计前,因序列能量效率的关系,基于本文训练序列的算法性能略差于基于 m 序列的算法,而在阶数估计后,估计性能更优于基于 m 序列的算法。

计算量分析:估计一对收发天线对间的时域信道,基于 m 序列方法需要 $L_c \times (L_c + L_t)$ 次乘法运算和 $L_c \times (L_c + L_t - 2)$ 次加法运算,而本文方法在阶数估计前需要进行 $L_c \times (1 + L_t)$ 次乘法运算和 $L_c \times (L_t - 1)$ 次加法运算,在阶数估计后仅需要 $\hat{L} \times (1 + L_t)$ 次乘法运算和 $\hat{L} \times (L_t - 1)$ 次加法运算。通过上述验证分析可知,与现有基于序列相关性的信道估计算法相比,本文方法在更高系统传输效率下,能获得更高的估计性能,且在一定程度上降低了计算复杂度。

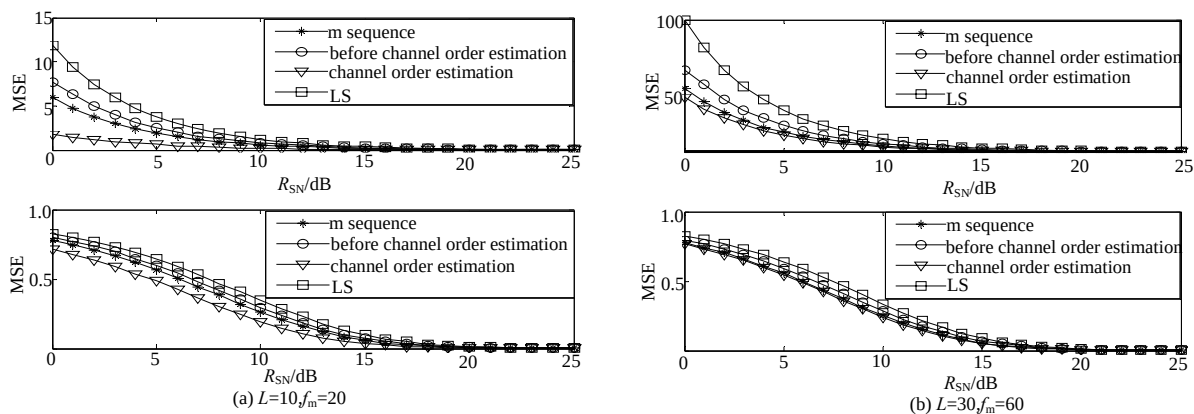


Fig.4 Performance comparison between different algorithms

图4 不同算法性能比较

4 结论

本文提出了一种基于最佳相关序列的MIMO-OFDM系统时域信道估计方法,利用序列的自相关性(序列自相关矩阵为单位阵),在一定程度上降低算法的计算复杂度,且通过各发送天线训练序列的设计,提高了系统传输效率,并通过信道阶数估计进一步提高估计性能。今后可进一步改进的工作包括:进一步提高算法对噪声的鲁棒性,改进算法在低信噪比下的性能;改进插值算法,提高估计算法的性能和时效性。

参考文献:

- [1] 赵知劲,汪百川,徐春云,等. 一种MIMO-OFDM信道混合估计方法[J]. 电路与系统学报, 2012,17(2):129-134. (ZHAO Zhi-jin,WANG Bai-chuan,XU Chun-yun,et al. A mixed estimation method for MIMO-OFDM channels[J]. Journal of Circuits and Systems, 2012,17(2):129-134.)
- [2] Omar Samir Mohamad,Slock Dirk T M. Variational Bayesian blind and semiblind channel estimation[C]// ISCCSP,2010 4th International Symposium on Limassol:[s.n.], 2010:1-6.
- [3] Yung An Kao,Po Heng Song. The analysis and improvement of linearly interpolative channel estimation in OFDM system[C]// HISC,2012 4th International. Nanjing:[s.n.], 2012:1-4.
- [4] Moussa Diallo,Rodrigue Rabineau,Laurent Cariou,et al. On improved DCT based channel estimation with very low complexity for MIMO-OFDM systems[C]// VTC,2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th. Barcelona:[s.n.], 2009:1-5.
- [5] Wen Jyh Horng,Lee Gwo Ruey,Kung Te Lung,et al. PN code-aided timing estimation,channel estimation and signal compensation in OFDM systems[J]. Digital Signal Processing, 2010,20:860-868.
- [6] 许国平,张欣,杨大成. 一种低复杂度的MIMO-OFDM信道估计新方法[J]. 电子与信息学报, 2008,30(4):797-800. (XU Guo-ping,ZHANG Xin,YANG Da-cheng. New MIMO-OFDM Channel Estimation Algorithm with Low Complexity[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008,30(4):797-800.)
- [7] 李丹萍,张海林. 基于循环正交序列和广义ACI的信道估计[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2010,37(3):436-440. (LI Dan-ping,ZHANG Hai-lin. Generalized AIC Based Channel Estimation Using Circularly Orthogonal Sequences[J]. Journal of Xidian University, 2010,37(3):436-440.)

- [8] 李冬秀,舒勤. 新的基于训练序列的 MIMO-OFDM 时域信道估计方法[J]. 计算机应用研究, 2012,29(6):2271-2273. (LI Dong-xiu,SHU Qin. New Channel Estimation Algorithm in Time-domain for MIMO-OFDM System Based on Training Sequences[J]. Application Research Computers, 2012,29(6):2271-2273.)

作者简介:



王翔宇(1987-),男,福建省莆田市人,在读硕士研究生,研究方向为通信信号处理.email:wxy1814@sina.com.

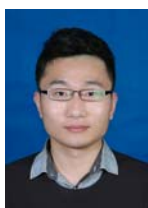
黄焱(1964-),男,南昌市人,教授,研究方向为通信信号处理.

邵永庆(1988-),男,辽宁省盖州市人,在读硕士生,研究方向为通信信号处理.

(上接第 212 页)

- [5] 孙春贞,黄一敏,郭锁凤. 可重复使用跨大气层飞行器自动着陆纵向制导与控制系统设计[C]// 中国航空学会飞行器控制与操纵第十一次学术交流会. 江西景德镇:中国航空学会, 2005:62-68. (SUN Chun-zhen,HUANG Yi-min,GUO Suo-feng. Research on Autolanding Technology and Control System Design for Reusable Launch Vehicle[C]// The Flight Control and Manipulation's Eleventh Academic Conference of the Chinese Association of Aeronautics. Jiangxi Jingdezhen: Chinese Association of Aeronautics, 2005:62-68.)
- [6] 张明廉. 飞行控制系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1993. (ZHANG Ming-lian. Flight Control System[M]. Beijing:Defense Industry Press, 1993.)
- [7] 孙春贞,黄一敏,郭锁凤. 重复使用运载器末端能量管理段轨迹线设计[J]. 系统工程与电子技术, 2007,29(6):199-204. (SUN Chun-zhen,HUANG Yi-min,GUO Suo-feng. Trajectory design for terminal area energy management of reusable launch vehicle[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007,29(6):199-204.)
- [8] 孙春贞,黄一敏. 重复使用运载器无动力投放自适应制导技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2008,40(1):65-69. (SUN Chun-zhen,HUANG Yi-min. Adaptive Guidance Technology for Unpowered Reusable Launch Vehicle Drop[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008,40(1):65-69.)
- [9] 沃云峰,李新国. 可重复使用飞行器末端能量管理段轨迹和制导研究[J]. 航天控制, 2005,23(3):9-13. (WO Yun-feng, LI Xin-guo. The Terminal Area Energy Management Trajectory Design and Guidance for a Reusable Launch Vehicle[J]. Aerospace Control, 2005,23(3):9-13.)

作者简介:



彭腾飞(1988-),男,江苏省淮安市人,在读硕士研究生,研究方向为高超声速飞机自动着陆段制导技术.E-mail:pennyson@163.com.

孟琳(1989-),女,山东省枣庄市人,在读博士研究生,主要研究方向为飞行器控制技术.

叶永强(1972-),男,浙江省桐乡市人,教授,博士生导师,主要研究方向为飞行制导与控制、应用控制理论、电气系统及其建模与控制.

黄一敏(1969-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为无人机飞行控制技术、直升机飞行控制技术、临近空间飞行器制导与控制技术.

李涛(1979-),男,副教授,主要研究方向为飞行器控制,遥控操作控制系统.

薛雅丽(1974-),女,副教授,主要研究方向为飞行器控制,非线性鲁棒自适应控制研究.