

基于 LS-SVM 预测的隧道多径环境 OFDM 系统信道估计算法^①

丁青锋^{②*} 郑国莘* 杨 柳*

(* 上海大学特种光纤与光接入网重点实验室 上海 200072)

(** 华东交通大学电气与电子工程学院 南昌 330013)

摘 要 针对隧道环境下多径传播的特点,提出了一种用于正交频分复用 (OFDM) 系统的基于最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 预测的新型信道估计算法,该算法利用子空间思想将信道特性中的噪声分量分离开来并通过低通滤波器滤除。仿真结果表明该算法估计性能优于传统线性最小均方误差 (LMMSE) 估计算法:一方面在利用较少导频信号的情况下通过 LS-SVM 预测获得整个信道的频率特性,提高了系统传输效率;另一方面通过滤除噪声改善了因信道估计值中噪声分量带来的误码率 (BER)。

关键词 信道估计,最小二乘支持向量机 (LS-SVM),低通滤波器,线性最小均方误差 (LMMSE),低秩

0 引 言

在高速无线数据传输中,正交频分复用 (OFDM) 技术可以把宽带频率选择性信道划分成若干窄带平坦衰落信道,从而实现很强的抗无线信道多径衰落和抗脉冲干扰的能力。对于隧道环境的列车与轨道沿线地面之间无线通信来说,OFDM 技术是基于无线通信的列车控制系统无线局域网 (WLAN) 的关键技术之一。正交频分多址接入 (OFDMA) 将作为基于长期演进 (long term evolution, LTE) 的铁路未来通信系统 LTE-R 的下行传输技术^[1]。在 OFDM 技术应用到无线通信中,信道估计是很关键的环节。估计的方法有盲估计、半盲估计以及非盲估计方法^[2-4]。其中盲估计和半盲估计的计算量大,对接收机的要求较高,不适合像列车控制系统中车地无线通信这种实时性要求较高的情况。而根据发送的训练信息不同,非盲估计可以分为利用训练序列和利用导频辅助调制进行信道估计,其中利用训练序列的信道估计方式对频率选择性衰落不敏感,主要适用于慢衰落信道;而利用导频的信道估计方式对频率选择性衰落较敏感,主要用于较快衰落的无线信道。对于车地无线通信这样

快速变化的无线信道来说,为获得较好的解调性能和预编码性能,适合采用基于导频的信道估计方法。基于导频的基本过程是发送端插入导频,在接收端利用导频恢复出导频处子载波的信道频率特性,然后通过内插等处理方法获得所有子载波的信道频率特性。导频数量越多,内插方法所获得性能越佳,但同时系统传输的有效性越低,且导频间隔必须满足采样定律。文献[5]中导频处信道冲激响应的获取采用的是最小二乘 (least squares, LS) 算法,并未考虑噪声的影响;文献[6,7]中信道估计采用支持向量机 (SVM) 算法,复杂度较高。另外,OFDM 系统的最优信道估计是采用最小均方误差 (MMSE) 准则^[8],但遵循该准则的估计算法最大的缺点就是计算复杂度太高,因此对其进行低秩估计因为能够在获得较高性能的情况下明显降低复杂度而备受关注。通过对信号子空间维数的判定,获得运算复杂度与估计性能的折中,即在估计性能基本不变的情况下,通过降低矩阵的秩,从而有效降低运算复杂度。文献[9]提出了一种秩的取值及自适应跟踪方法。本文一方面提出采用内插法与复杂度较低的最小二乘支持向量机 (LS-SVM) 预测相结合的方法,在满足估计性能的前提下提高系统的传输效率;另一方面在讨论经典的线性最小均方误差 (LMMSE) 准

① 国家自然科学基金 (61132003, 61171086, 51267005), 江西省教育厅青年科学基金 (GJJ13322) 和上海市重点学科建设 (S30108) 资助项目。

② 男, 1980 年生, 博士生; 研究方向: 信道估计与建模; 联系人, E-mail: brandy724@sina.com

(收稿日期: 2012-08-16)

则进行信道估计的基础上,提出进一步简化的方法,降低运算的复杂度及数据检测的误码率,从而提高信道估计算法的性能。

1 系统模型

OFDM 系统模型如图 1 所示。每一个 OFDM 输入符号,经过快速傅里叶反变换 (inverse fast Fourier transform, IFFT) 后调制到相互正交的 N 个子载波上。已调信号表示为 X_k , 其中 k 表示发送的 OFDM 符号数; 每个符号包含 N 个子载波。为了克服 OFDM 符号间因信道的多径效应带来的码间干扰 (inter-symbol interference, ISI), 在前后符号间需保护间隔, 并且其长度大于信道的最大时延 $\tau_{\max}$ 。OFDM 系统中保护间隔内通常加入循环前缀 (cyclic prefix, CP), 以保证子载波间的正交性。

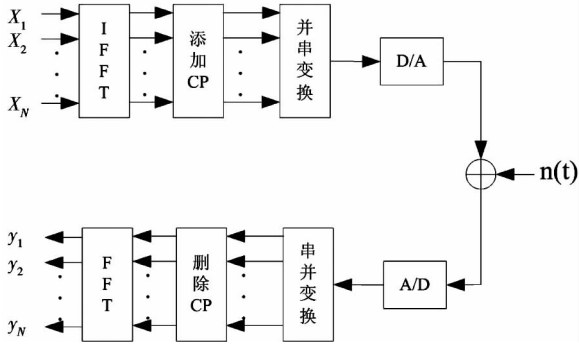


图 1 OFDM 系统模型

由发射和接收设备构成了一个衰落多径信道模型, 由 L 径冲激组成。表示如下:

$$g(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_l \delta(t - \tau_l T_s) \quad (1)$$

式中, L 为总的多径数; α_l 为第 l 个路径的增益值, 在本文中其功率延迟谱服从负指数分布 $\theta(\tau_l) = Ce^{-\tau_l/\tau_{rms}}$; τ_l 为第 l 个路径的归一化时延, τ_{rms} 为常数, T_s 为系统的采样周期。整个系统可以用下面的表达式描述:

$$Y = XH + N \quad (2)$$

式中, X, Y 分别为发送、接收信号向量; H 为信道衰落因子向量: $[h_1, h_2, \dots, h_{N-1}]^T$, 其中 $h_l = G(\frac{l}{NT_s})$, $G(\cdot)$ 为 $g(t)$ 傅里叶变换; N 为零均值独立同分布高斯白噪声, 方差为 σ^2 , 并且假设噪声 N 与信道特性 H 不相关。

2 低秩 LMMSE 信道估计

2.1 基于 LS-SVM 预测的 LS 估计算法

对基于 LS-SVM 预测的 LS 算法做如下假设: 一帧信号由 N_L 个 OFDM 符号组成; 每一个 OFDM 符号包含 N 个子载波, 其中导频子载波数目为 N_p ; OFDM 符号采用梳状导频模式, 导频间隔为 I_f 。一帧数据表示为

$$X(m, n) = \begin{cases} X(m_1, n), m_1 = 1, \dots, N_p \times I_f \\ X(m_2, n), m_2 = N_p \times I_f + 1, \dots, N \end{cases} \quad (3)$$

式中, $n = 1, 2, \dots, N_L$ 。基于一般性, 后续关于信道频率特性的讨论皆以一帧中的第 n 个符号为例。

步骤 1 m' 为导频子载波的位置, $m' = k \times I_f + 1, k = 0, \dots, N_p - 1$, 则第 n 个发送符号中导频向量为 $X_p = X(m', n)$, 而相应接收到的导频信号为 $Y_p = Y(m', n)$ 。利用 LS 算法获得导频子载波处的频率响应为

$$H_{LS}(m') = X_p^{-1} Y_p \quad (4)$$

步骤 2 利用内插函数获得前 $N_p \times I_f$ 个子载波的频率特性为 $\hat{H}_{LS}(m_1) = f(\hat{H}_{LS}(m'))$, 其中 $f(\cdot)$ 为插值函数。

步骤 3 在获得前 $N_p \times I_f$ 个子载波的频率特性的基础上, 利用 LS-SVM 进行预测后续子载波的频率特性, 预测函数表述为

$$\hat{H}_{LS}(m+1) = f(\hat{H}_{LS}(m-l+1), \dots, \hat{H}_{LS}(m)) \quad (5)$$

其中右式 $f(\cdot)$ 为非线性拟合函数, $\hat{H}_{LS}(m)$ 为步骤 2 插值函数获得前序子载波处的信道频率特性, l 为嵌入维数; $\hat{H}_{LS}(m+1)$ 为后续子载波处的频率特性预测值。重复上述计算, 可获得式 (3) 中 m_2 所有子载波处的信道特性, 从而完成一个 OFDM 符号所有子载波的频率特性的估计。

2.2 基于奇异值分解的 SLS-SVM 算法

信道估计 LS 算法计算复杂度不高, 只需要将接收到的信号与原导频信号相除即可得到各子载波的信道估计值。但是无线信道在时频域皆是有相关的, LS 估计算法并没有考虑其之间相互影响以及噪声的影响。

为提高信道估计的性能, 利用信道的相关性, 采用最小均方误差 (MMSE) 准则来降低噪声的影响。但当 X 变化时都需要重新计算, 其运算复杂度很

高。根据 h 与 n 的相互独立性,整个信道频率响应的线性 MMSE 估计可简化为下式:

$$\hat{H}_{LMMSE} = R_{HH} (R_{HH} + \frac{\beta}{SNR})^{-1} \hat{H}_{LS} \quad (6)$$

式中 $\hat{H}_{LS}$ 为上节获得的 LMMSE 算法中 LS 算子, $R_{HH} = E\{H \cdot H^H\}$ 表示为 H 自相关矩阵,其中 $(\cdot)^H$ 表示 Hermitian 变换; SNR (signal to noise ratio)为信噪比; β 为与信道调制星座有关的常量($\beta = E\{|x_k|^2\} \cdot E\{|1/x_k|^2\}$),如 BPSK、QPSK 调制时 $\beta = 1$,16QAM 中 $\beta = 17/9$ 。

相对于 MMSE 估计算法,LMMSE 算法的运算复杂度要低得多,但是当子载波数较大时,其中 R_{HH} 的运算量还是很大,需要进一步简化其运算^[9,10]。下面给出 H 的低秩估计。

自相关矩阵 R_{HH} 的奇异值分解为 $R_{HH} = U \Lambda U^H$,其中 U 为酉矩阵; Λ 为对角阵,对角线上的奇异值按照从大到小排列 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$,则上式通过化简得到低秩估计(秩为 r)信道频率响应为

$$\hat{H}_{SLS-SVM} = U \Lambda_P U^H \times \hat{H}_{LS} \quad (7)$$

其中, $\hat{H}_{LS}$ 为 2.1 节 LS 算法获得的信道特性, Λ_P 为上三角矩阵,也是对角阵,其对角线上的奇异值包括 r 个最大的奇异值,按照从大到小顺序排列,其对角线上的元素为

$$\delta_k = \begin{cases} \frac{\lambda_k}{\lambda_k + \frac{\beta}{SNR}}, & k = 1, 2, \dots, r \\ 0, & k = r + 1, \dots, N \end{cases} \quad (8)$$

根据奇异值分解的性质,若矩阵的秩为 r ,则前 r 个奇异值从大到小递减,其后皆近似为 0,从而减低了式(7)的计算复杂度。其中近似阶数 r 根据经验可选 $(2BT + 1)$,其中, B 为单边带带宽, T 为信道的时域间隔。文献[11]提出采用 Akaike 信息准则(AIC)及最小描述长度准则(MDLC)得到秩的估计值;文献[12]提出通过自适应跟踪的方法获得合适的秩估计,基本思想是将估计出的特征值与噪声功率做比较,超过噪声电平一定倍数的特征判定为有效特征值,其他置 0。

3 LSL-SVM 信道估计算法

根据子空间的思想,提出一种在低通滤波器下的信道估计算法。该算法是在已知信道频率特性的基础上,通过分析信号子空间与噪声子空间的特性

后,将其中的噪声进行滤去,使信道的信息分量得到保留。该 LSL-SVM 算法是在 SLS-SVM 信道估计算法的基础上进行的性能提高。

3.1 LSL-SVM 算法

通过分析可知,噪声子空间中的高斯白噪声和子载波间干扰都满足均值为零的高斯分布,因此通过信道估计算法得到的导频子载波的信道冲激响应中对应的噪声分量满足均值为零的高斯过程,其中信道冲激响应分量变化相对缓慢,而噪声分量的变化是非常快的,因此可以通过 IFFT 变换将两者分离开来,从而可以滤去其中快速变化的噪声分量^[13,14]。

$H_{SLS-SVM}(i)$ 经过 IFFT 变换后,得到其变换域表达式为

$$h_{SLS-SVM}(k) = \sum_{i=1}^N H_{SLS-SVM}(i) e^{-j\frac{2\pi}{N}ik} \quad (9)$$

式中, $k = 1, 2, \dots, N$ 。

SLS-SVM 算法获得的信道特性图见图 2。

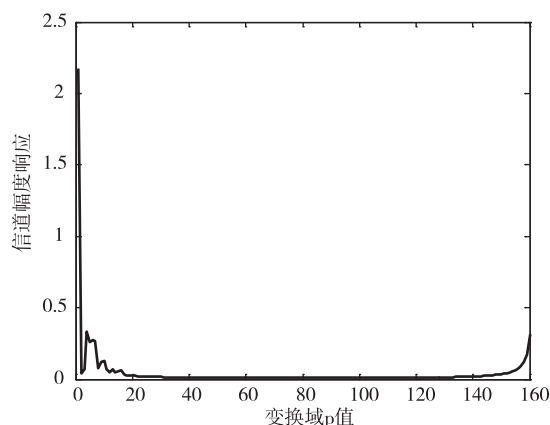


图 2 SLS-SVM 算法获得的信道特性图

从图 2 可以看出,其中信号分量主要集中分布于低频附近,而噪声分量在整个频段都有分布,因此将该信号通过低通滤波后,可使噪声分量滤去,而信号分量得到保留。针对 SLS-SVM 信道估计改进的基于低通滤波和奇异值分解的最小二乘支持向量机(LSL-SVM)算法如图 3 所示。

LSL-SVM 算法的步骤如下:

步骤 1 根据式(7)计算第 n 个时刻信道特性频率特性。

步骤 2 根据式(9)获得第 n 个时刻变换域的信道特性。其中信道冲激响应分量主要集中在前 L 个抽样值中,其他为噪声分量。

步骤 3 将上述信道特性经过低通滤波器,将其中噪声分量滤去。

$$\dot{h}_{\text{LSLS-SVM}}(k) = \begin{cases} h_{\text{SLS-SVM}}(k), & 1 \leq k \leq K; \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

其中, K 为低通滤波器在变换域中的截止频率。通

过滤波后噪声分量降低为原来的 K/N 倍。

步骤 4 对步骤 3 获得的新的第 n 个时刻信道变换域特性进行 FFT 变换,用此频率响应替换原有的频率响应,得出相应的数据估计值。

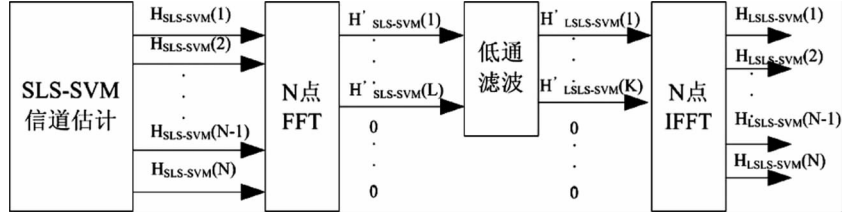


图 3 LSL-SVM 信道估计算法结构

3.2 低通滤波器阶数

低通滤波器在变换域的下界截止频率 K 对于信道估计算法精度来说一个非常重要的参数。其值会随着无线信道的变换而相应发生变化。因此, K 值的选择需要通过接收信号动态的获取。

从图 2 可以看出,在变换域能量主要集中在低频段,即信号所在的区域。因此可以使用下面的公式来判断 K 的选取:

$$\eta = \frac{\sum_{k=1}^K |h_{\text{LSLS-SVM}}(k)|^2}{\sum_{k=1}^N |h_{\text{LSLS-SVM}}(k)|^2} \quad (11)$$

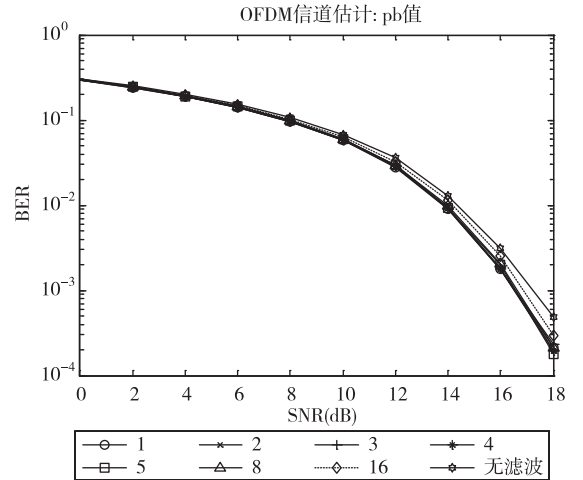
式中分子为通带能量,而分母为总能量。通过从低频到高频选取不同的 K 值,当低频段所累积的能量与总能量之比大于设定比例 η 时所对应的 K 值即为滤波器变换域的下界截止频率值。

4 仿真结果分析

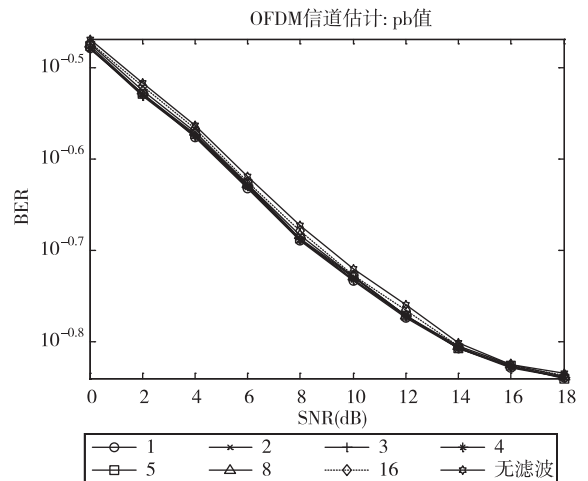
为了验证算法的有效性,对本文所提出的 LSL-SVM 信道估计算法进行仿真。考虑到地铁运营多为隧道环境,OFDM 系统仿真的条件如下:调制采用 16QAM 方式;仿真载频为 2.4 GHz,带宽为 1 MHz;子载波间隔为 7.812 5 kHz;子载波数为 128,cp 长度为 16;一个 OFDM 符号时长为 128 μ s,cp 时长 t_{cp} 为 16 μ s;信道共有 5 径^[15],功率延迟谱服从负指数分布 $e^{-\tau/\tau_{rms}}$,其中 τ_l 为各径延迟, $\tau_{rms} = \frac{1}{4}t_{cp}$ ^[16]。

图 4 给出了低通滤波器取不同截止频率所对应的 SLS-SVM 算法误码率 (bit error rate, BER) 性能随信噪比 (SNR) 变换曲线,其中横纵坐标分别表示

SNR 和 BER。cp 长度为 16,从图 2 可以看出:低通滤波器截止频率应小于 cp 长度。从图 4 可以看出,



(a) 多普勒频移 $f=0\text{Hz}$



(b) 多普勒频移 $f=178\text{Hz}$

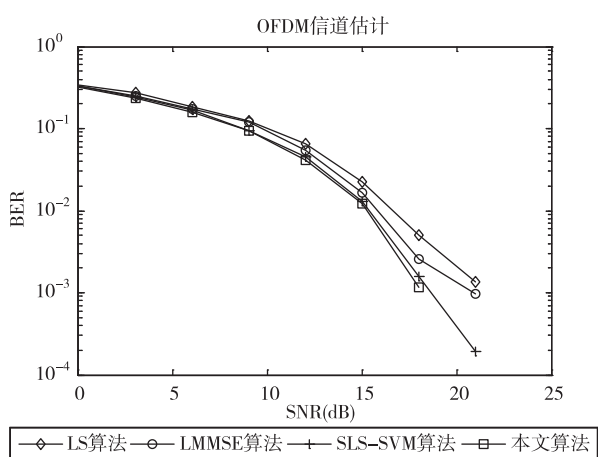
图 4 不同多普勒频移下 SLS-SVM 算法的 BER 性能比较曲线

在多普勒频率为 0 Hz 和 178 Hz(分别对应列车在静止和时速 80km/h)时低通滤波器的截止频率取 1 时 BER 最小;通过改变多普勒频移,范围为 0 - 300 Hz,仿真可得低通滤波器的截止频率都是取 1 时 BER 最小;改变各径延迟可得到相同结论,可知该结论具有鲁棒性。

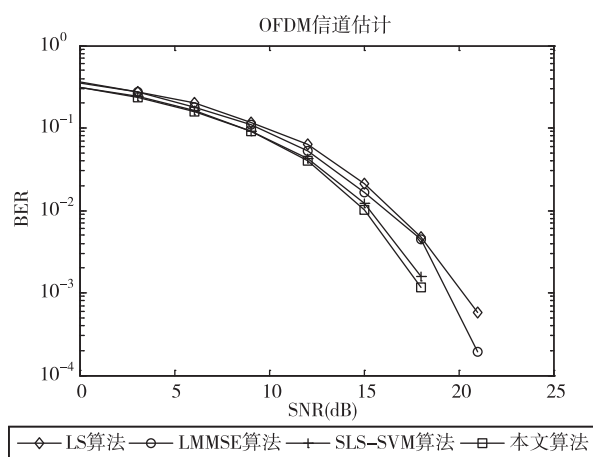
图 5 给出了 LS 算法、LMMSE 算法、SLS-SVM 及本文提出的新型 LSLS-SVM 算法的 BER 性能随 SNR 变化曲线。其中多普勒频移设定为 178 Hz(对应地铁列车时速 80km/h);导频间隔 I_f 考虑以采样定律为上限,满足:

$$I_f \leq \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\Delta f \times \tau_{\max}} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{10^3}{7.8125 \times 16} \right) = 4 \quad (12)$$

从图 5 中可以看出 LS 算法 BER 性能最差, LMMSE 算法 BER 性能次之;SLS-SVM 算法在导频间隔为 4(符合抽样定律),其 BER 性能与前两者相差不大,但当导频间隔为 8(违反抽样定律)时,性能明显优于前两种算法,随着 SNR 增加其 BER 值下降速度更快;而本文提出的 LSLS-SVM 算法的 BER 性能最优。



(a) 导频间隔为 4



(b) 导频间隔为 8

图 5 LS、LMMSE、SLS-SVM 及经过低通滤波器后的 LSLS-SVM 算法 BER 性能曲线

5 结 论

为了提高隧道环境 OFDM 系统中信道估计算法的性能,本文提出了一种基于 LS-SVM 预测的信道估计算法:LSLS-SVM 信道估计算法。该算法一方面通过利用较少导频获得前序若干子载波的信道频率特性,然后利用 LS-SVM 预测获得后续子载波处的信道频率特性;另一方面通过子空间特性,对信道特性冲激响应自相关矩阵进行奇异值分解,从而降低矩阵运算的复杂度;利用 FFT 特性分析获得的信道估计值变换域特性,通过低通滤波器将信道特性分量与噪声分量分离,从而有效地提高了估计性能。仿真结果得出:在违反采样定律的条件下,采用 LS-SVM 预测的方法用较少导频信号获得优于典型插值算法的信道估计性能,从而提高了系统的传输效率;在各径功率延迟谱服从负指数分布的条件下,低通滤波器的下限截止频率取 1 时 BER 最小,经检

验该结论具有鲁棒性。信道估计技术还可以与信号检测构成联合迭代接收技术,从而进一步提高无线通信接收机性能。

参考文献

- [1] Karimi O B, Liu J, Wang C. Seamless wireless connectivity for multimedia services in high speed trains. *IEEE Journal on Selected areas in communications*, 2012, 30 (4): 729-739
- [2] He L L, Wu Y C, Ma S D, et al. Superimposed training-based channel estimation and data detection for OFDM amplify-and-forward cooperative systems under high mobility. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60 (1): 274-284
- [3] Li H, Jan W M B, Frans M J W. Low-complexity LMMSE-based MIMO-OFDM channel estimation via angle-domain processing. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55 (12): 5668-5680
- [4] Hung K C, Lin D W. Pilot-based LMMSE channel estima-

- tion for OFDM systems with power-delay profile approximation. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(1):150-159
- [5] 孙建成,郑崇勋,周亚同等. 基于 RLS-SVM 的 OFDM 信道估计算法. 系统仿真学报,2009,21(13):4009-4013
- [6] Wu D X, Fan W P. A New Channel Estimation Method Based on Pilot-aided and Local Adaptive Least Squares Support Vector Regression in Software Radio OFDM System. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence, Los Alamitos, USA, 2009. 349-352
- [7] 刘海员,孙建成,龚政委. 基于导频的 OFDM 信道估计小波核 SVM 算法. 系统工程与电子技术,2007,29(9):1249-1253
- [8] Muralidhar K, Li K H. A low-complexity kalman approach for channel estimation in doubly-selective OFDM systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 2009, 16(7):632-635
- [9] 程履帮. OFDMA 系统中基于 LMMSE 信道估计算法的改进及其性能分析. 电子学报,2008,36(9):1782-1785
- [10] 曾孝平,赵铁军,韩庆文. 基于信号噪声子空间的 OFDM 信道估计. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(9):80-83
- [11] Wang X D, Vincent P. Blind multi-user detection: a subspace approach. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1998, 44(2): 677-690
- [12] 李悦,李子,蔡跃明等. OFDM 系统中基于导频的低秩信道估计方法. 通信学报,2004,25(10):155-162
- [13] 汪晋宽,王旭,许鹏. 高精度 OFDM 信道估计算法. 东北大学学报:自然科学版,2011,32(1):32-35
- [14] 李世平,李鑫. 基于 OFDM 判断门限的 OFDM 信道估计算法. 计算机应用,2011,31(12):3230-3232
- [15] 贾明华. 地铁隧道环境毫米波传播特性的研究:[博士学位论文]. 上海:上海大学通信与信息工程学院,2010. 81-88
- [16] 吴琼,彭章友. 地铁隧道中信道的统计建模. 微计算机信息,2009,25(9-1):191-193

A novel LS-SVM based channel estimation algorithm for OFDM systems in tunnel multi-path environment

Ding Qingfeng^{* **}, Zheng Guoxin^{*}, Yang Liu^{*}

(^{*} Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072)

(^{**} School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013)

Abstract

A novel channel estimation algorithm for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems based on least square support vector machine (LS-SVM) is presented according to the multi-path propagation characteristics of the systems in tunnel environments. The algorithm separates the noise components from the information component of the channel characteristics by using the subspace theory and then utilizes a low-pass filter to filter them off. The simulation results show that the estimation performance of the algorithm is significantly superior to the traditional linear minimum mean square error (LMMSE) estimation algorithm. On the one hand, the transmission efficiency of OFDM system is increase by utilizing LS-SVM to predict the frequency characteristics of the channel; on the other hand, the bit error rate (BER) of the channel estimation value is ameliorated by filtering noise components.

Keywords: channel estimation, least square support vector machine (LS-SVM), low-pass filter, linear minimum mean square error (LMMSE), low rank