高铁场景下一种基于信噪比判决的双模切换信道估计算法

王传云[1]，王敏[1]，赵军辉[1,2]，尹燕[1]
（1. 华东交通大学，江西 南昌 330013；2. 北京交通大学，北京 100044）

摘　要：为了提高信道在信噪比大范围变化环境下信道估计的精度，确保高速铁路通信系统的可靠性，提出高铁场景下一种基于信噪比判决的双模切换信道估计算法。该算法利用离散卡—洛基扩展模型（discrete Karhunen-Loeve basis expansion model，DKL-BEM）及线性最小均方误差（linear minimum mean square error，LMMSE）算法进行信道建模和不同速度环境下的信道估计。仿真发现，当信噪比增大至某值时，基于 ICI 消除的二次信道估计算法性能劣于传统的 DKL-BEM 算法（出现交叉点），且交叉点值随速度的提高左移（小信噪比方向）。通过对参数分析和两种算法交叉点值的提取，给出交叉点随速度变化的移动轨迹，自适应地实现两种算法的切换，提高信道估计算法的适应性和有效性。

关键词：高铁场景；双模切换；自适应；交叉点；时变信道
中图分类号：TN929
文献标识码：A
doi: 10.11959/j.issn.1000−0801.2018199

A dual mode switching channel estimation algorithm based on SNR decision in high speed railway scenarios

WANG Chuanyun[1], WANG Min[1], ZHAO Junhui[1,2], YIN Yan[1]
1. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China
2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract: A dual mode switching channel estimation algorithm based on SNR decision in high speed railway scenarios was proposed. The algorithm adopted DKL-BEM and LMMSE modelling the channel and estimating the channel under different speed conditions, respectively. The simulation results show that the SNR increased, the performance of the twice channel estimation algorithm based on ICI cancellation became worse than that of the traditional DKL-BEM algorithm, and a cross-point appeared, its value moved towards the small SNR as the speed increased. Through analyzing the parameters and extracting the cross-point values of the two algorithms, the moving trajectory of the cross-point with the speed changing was given. The proposed algorithm can adaptively achieve the switching between two algorithms and improve the applicability and effectiveness of the channel estimation algorithm.

Key words: high speed railway scenario, dual mode switching, adaptive, cross-point, time-varying channel

收稿日期：2017−12−12；**修回日期**：2018−06−08
基金项目：国家自然科学基金资助项目（No.61661021）；江西省教育厅科学技术研究项目（No.GJJ150545）
Foundation Items：The National Natural Science Foundation of China (No.61661021), Education Department Scientific and Technological Project of Jiangxi Province of China (No.GJJ150545)

1　引言

世界范围内的信息技术进步带动了高速铁路的迅猛发展[1]，国外的铁路通信已经开始陆续采用 LTE-R，其中三星与电信运营商 SK Telecom 及釜山运输公司联合开发的 LTE-R 已正式运行；国内也在不断地开展相关研究工作，试图打破传统，尝试新技术，从而推动铁路移动通信行业的进一步发展。对于铁路通信产品而言，第一要求是安全可靠，获得精确的信道状态信息，才能保证系统通信的可靠性。随着我国高速铁路运行速度的提升，还需进一步研究高速移动对信道估计带来的诸多影响。

在高速移动环境下，信道待估计参数的数量大大增加，需要使用能够减少未知量个数的信道模型来拟合真实的时变信道。目前，常用的时变信道拟合方法有线性时变（Linear time-varying，LTV）模型[2-3]和基扩展模型（basis expansion model，BEM）[4-6]。BEM 作为时频双选信道的最佳模型，近些年来受到普遍关注。BEM 的种类有很多，各有优劣。其中，离散卡—洛基扩展模型（discrete Karhunen-Loeve basis expansion model，DKL-BEM）是 MMSE 准则下的最优模型[7]。因此当采用 MMSE 或 LMMSE 方法估计时普遍选用 DKL-BEM 对信道进行建模。

此外，在高速移动环境下，无线通信系统还会产生明显的多普勒频移[8]，破坏各个子信道的正交性，引起严重的载波间干扰（inter-carrier interference，ICI）[9]，影响系统性能，降低信道估计精度。因此，消除 ICI 是提高时变信道估计精度的关键之一。

ICI 消除的方法有 ICI 自消除、频域均衡等。由于相邻子载波间的 ICI 相近，且以载波数的中心为对称位置的 ICI 也相近[10]，ICI 自消除算法得到广泛关注[11-12]。这类方法虽然对 ICI 的消除效果好，且简单易行，但是由于在 N 个子载波上只能传输 $N/2$ 个数据，系统的符号率大大降低。频域均衡是去除 ICI 的有效方法[13]。参考文献[14]提出一种基于最小均方误差（MMSE）的三步 ICI 消除算法，包括 MMSE 信道估计、MMSE 均衡和 ICI 消除。仿真结果表明，该方法明显减小了系统的误码率，但 MMSE 算法的计算复杂度较高。利用频域均衡的方法消除 ICI 需要事先获得信道状态信息，即 ICI 的消除与信道估计有关，而信道估计精度又受 ICI 的影响。因此，需要综合考虑 ICI 消除与信道估计之间的相互影响。在参考文献[14]的基础上提出基于 ICI 消除的二次信道估计方法，包括 DKL-BEM 信道建模、LMMSE 信道估计、MMSE 均衡和 ICI 消除、第二次信道估计。传统的 DKL-BEM 算法只包括前两个步骤。仿真结果表明，二次信道估计算法在小信噪比条件下更适用且与传统的 DKL-BEM 算法在性能曲线上存在交叉点。

为了提高信道信噪比在大范围变化环境下的时变信道估计精度，保证高速铁路通信系统的可靠性，本文给出了交叉点的散点图及其拟合曲线，提出高铁场景下一种基于信噪比判决的双模切换信道估计算法，以交叉点为临界点，在小信噪比条件下采用二次信道估计算法，在大信噪比条件下采用传统的 DKL-BEM 算法。仿真结果表明，在信噪比大范围变化环境下，所提算法能提高信道估计精度。

2　传统的 DKL-BEM 算法

传统的 DKL-BEM 算法过程如下：首先采用 DKL-BEM 对时变信道建模，然后利用 LMMSE 算法进行信道估计，得到频域信道矩阵 H_1。

2.1　信道模型建立

利用 DKL-BEM 来描述双选信道，当最大时延 $t_{\max}$ 和最大多普勒频移 $f_{\max}$ 满足 $2t_{\max}f_{\max}<1$ 时，可以将双选信道建模为一个 FIR 滤波器，其每个抽头被表示为一组基函数的叠加，则时域信道响应可以表示为：

$$h_1(n)=\sum_{q=0}^{Q} g_q(1)b_q(n) \tag{1}$$

其中，$b_q(n)$为第 q 个基函数在 n 时刻的 DKL-BEM 基函数，Q 为 DKL-BEM 的阶数，$g_q(l)$为基系数，在一个 OFDM 符号周期内保持不变。

对于一个具有 N 个子载波的 OFDM 系统，假定接收端理想同步。则接收信号 Y 的频域表示为[15]：

$$Y=H_{\text{ave}}X+H_{\text{ICI}}X+W \tag{2}$$

$$H_{\text{ave}}=\text{diag}(\text{diag}(H)),H_{\text{ICI}}=H-H_{\text{ave}} \tag{3}$$

$$H_{k,v}=\frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}\sum_{l=0}^{L-1}h_l(n)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{2\pi}{N}[v(1-n)+nk]} \tag{4}$$

其中，X 和 Y 分别为 $N\times1$ 的频域发送和接收信号，W 为时域加性高斯白噪声的频域表示，$H_{k,v}$ 为信道频域矩阵 H 的元素，$k=v$ 时为对角元素，L 为抽头数，H_{ave} 为以 $H_{k,v}$（$k=v$, $k=0,1,\ldots,N-1$）为对角元素的对角矩阵，H_{ICI} 为以 $H_{k,v}$（$k\neq v$）为非对角元素的干扰矩阵，其对角线元素为 0。对式（3）分析可以发现，$h_l(n)$随时间 n 变化时，H 有非对角元素，即时变信道中存在 ICI 项。因此，需要对 ICI 干扰进行消除，提高时变信道的估计精度。

2.2 LMMSE 信道估计

BEM 采用随时间变化的基函数与不随时间变化的基系数来表征信道，将时变信道的估计问题转化为对线性参数（基系数）的估计问题。常用的基系数估计方法有最小二乘估计（LS）[16]和线性最小均方误差估计（LMMSE）[17]。

LMMSE 估计方法综合考虑了 ICI、噪声以及多径时延的影响，虽然依赖信道信息、涉及自相关矩阵的计算，复杂度较高，但相较于 LS 估计方法而言有更高的精确度。采用 LMMSE 的方法估计基系数，即找到一个估计矩阵 F_{LMMSE}，使基系数与基系数的估计值之间的线性均方误差最小。估计矩阵的表达式为：

$$F_{\text{LMMSE}}=R_gD^{\text{H}}/(DR_gD^{\text{H}}+R_d+R_{P,W}) \tag{5}$$

$$D=A_qS_P \tag{6}$$

$$A_q=F\text{diag}(b_q)F^{\text{H}} \tag{7}$$

$$S_P=I_{Q+1}\otimes(\text{diag}(X_P)F_{P,L}) \tag{8}$$

其中，R_g、R_d、$R_{P,W}$ 分别为 BEM 的基系数向量、ICI 干扰项和导频位置噪声的自相关矩阵，上标 H 表示对矩阵做共轭转置，I_{Q+1} 为 Q+1 行 Q+1 列的单位矩阵，$\otimes$ 表示 Kronecker（克罗内克）积，$b_q=[b_q(0),b_q(1),\ldots,b_q(N-1)]^{\text{T}}$ 为基函数向量，X_P 为所有导频子载波处对应的发送信号，F 为傅里叶变换矩阵，F_L 表示矩阵 $N^{1/2}F$ 的前 L 列，$F_{P,L}$ 是 F_L 的子矩阵，对应着导频子载波处的元素构成。

利用式（4）中的估计矩阵进行基系数估计，则基系数向量可以表示为：

$$g_1=F_{\text{LMMSE}}Y_P \tag{9}$$

$$Y_P=Y(\text{pilot_position},:) \tag{10}$$

$$g_{1,q}=[g_q(0),g_q(1),\cdots,g_q(L-1)]^{\text{T}} \tag{11}$$

其中，Y_P 为 $K\times1$ 的向量，是所有导频子载波处对应的接收信号，K 为一个 OFDM 符号中的导频总数；$g_{l,q}$ 对应第 q 个基函数的 BEM 系数。则信道时域响应的估计矩阵 h_l 可以表示为：

$$h_1=\sum_{q=0}^{Q}\text{diag}(b_q)G_q \tag{12}$$

$$G_q(,1)=[g_{1,q}{}^{\text{T}},0,\cdots,0]^{\text{T}} \tag{13}$$

其中，G_q 是 N 行 N 列的循环矩阵，其第一列为 $G_q(,1)$。则频域信道的估计矩阵可以表示为：

$$H_1=Fh_1F^{\text{H}} \tag{14}$$

随着高速铁路移动速度的提高，多普勒频移造成的 ICI 越来越严重，尤其在信噪比较小时，仅仅在 LMMSE 估计时处理 ICI，对 ICI 的缓解效果不明显。因此，需要在信道估计前消除 ICI，提高信道估计的精度。

3 基于 ICI 消除的二次信道估计算法

基于ICI消除的二次信道估计算法过程如图1所示，在第 2 节的基础上，采用简化的 PIC 算法消除 ICI，获得 ICI 消除后的频域接收信号 Y_2；最后用 Y_2 进行第二次信道估计，得到 H_2，完成信道估计。采用该方法可以减弱 ICI 对时变信道估计

的影响，进一步提高信道估计精度。

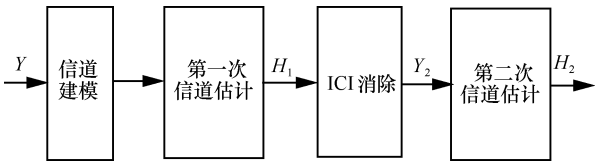


图 1　OFDM 系统二次信道估计算法过程

3.1　ICI 消除

采用简化的并行干扰消除（parallel interference cancellation，PIC）算法消除 ICI，直接用接收信号 Y 减去 ICI 项得到干扰消除后的接收信号 Y_2，则其可以表示为：

$$Y_2=Y-H_{1,\mathrm{ICI}}X_2 \tag{15}$$

$$X_2=H_1^{\mathrm{H}}\left(H_1H_1^{\mathrm{H}}+\frac{\sigma_w^2}{\sigma_x^2}I(N)\right)^{-1}Y \tag{16}$$

$$H_{1,\mathrm{ICI}}=H_1\text{-diag}(\mathrm{diag}(H_1)) \tag{17}$$

其中，Y_2 为 ICI 消除后的频域接收信号，$H_{1,\mathrm{ICI}}$ 为矩阵 H_1 的非对角元素构成的矩阵，X_2 为用 MMSE 均衡方法得到的检测信号，上标（−1）表示求逆矩阵，$I(N)$为 N 行 N 列的单位矩阵，σ_w^2 为噪声的平均功率，σ_x^2 为发送信号的平均功率，$H_{1,\mathrm{ICI}}X_2$ 为 OFDM 符号中的 ICI 项。由于计算得到的干扰项和实际干扰存在一定的误差，ICI 消除后仍会存在残余误差。残余误差越小，ICI 消除的效果越好。

3.2　第二次信道估计

采用 Y_2 进行第二次信道估计，则基系数可以表示为：

$$g_2=F_{\mathrm{LMMSE}}Y_{2,P} \tag{18}$$

$$Y_{2,P}=Y_2(\text{pilot_position},:) \tag{19}$$

其中，$Y_{2,P}$ 为 $K\times1$ 的向量，对应于所有导频子载波处的 ICI 消除后的频域接收信号；求得基系数后，采用与第 2.2 节中相同的方法得到时域信道矩阵 h_2 和频域信道矩阵 H_2，完成信道估计。

3.3　算法仿真及分析

在不同速度条件下，采用 LMMSE 估计方法，对传统的 DKL-BEM 算法和基于 ICI 消除的二次信道估计算法的性能进行对比分析，如图 2 所示。定义归一化均方误差（NMSE）来衡量信道估计的性能，如式（20）所示。

$$\mathrm{NMSE}=E[(h_r-h_2)^2]/E[(h_r)^2] \tag{20}$$

其中，h_r 是实际信道的抽头响应（由 Jakes 模型产生）。在仿真中系统载波频率 G=2 GHz，仿真一帧数据包括 20 个 OFDM 符号样本，本文采用常见的频域梳状导频结构（FDKD）[18]进行信道估计，具体的导频结构如图 2 所示。一个 OFDM 符号中有 M 个导频簇，每个导频簇中有 a 个非零导频，非零导频两侧分别有 b 个零导频，导频总数 $K=M(a+2b)$，M 个导频簇等间隔的插入一个 OFDM 符号中，具体参数设置见表 1。

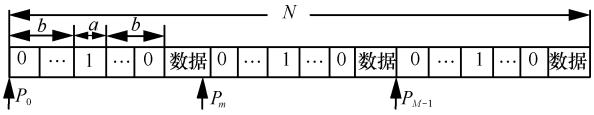


图 2　FDKD 导频结构

表 1　OFDM 时变信道估计仿真参数设置

参数	设置值
子载波个数 N	256
调制方式	QPSK
信道多径数 L	6
各径时延/μs	0，1，2，3，4，5
采样时间间隔 t_s /μs	1
循环前缀长度	32
BEM 阶数 Q	4
梳状导频簇数 M	8
每簇中的非零导频个数 a	1
非零导频两侧保护导频数（单侧）b	4
导频簇之间的间隔载波个数	23

在大信噪比条件下，信号状态良好、噪声较小，在第一次信道估计采用的 LMMSE 估计方法中已经考虑了噪声和 ICI 的影响，如式（5）所示。因此，再进行额外的处理反而会增大噪声使 ICI 消除后的接收信号 Y_2 的准确度下降，使二次信道估计算法在同等条件下的信道估计精度劣于传统

的 DKL-BEM 算法，出现交叉点，如图 3 中 A1、A2、A3 所示。参考文献[19]提出了一种 OFDM 系统信道盲估计算法，该算法是在参考文献[20]基础上的改进。参考文献[19]所提算法在小信噪比条件下性能较好，在大信噪比条件下性能劣于参考文献[20]所提算法，可验证大信噪比时额外的处理反而会降低信道估计的精度。基于 ICI 消除的二次信道估计算法在小信噪比（信噪比值小于交叉点值）情况下，可以有效地提高信道估计精度。

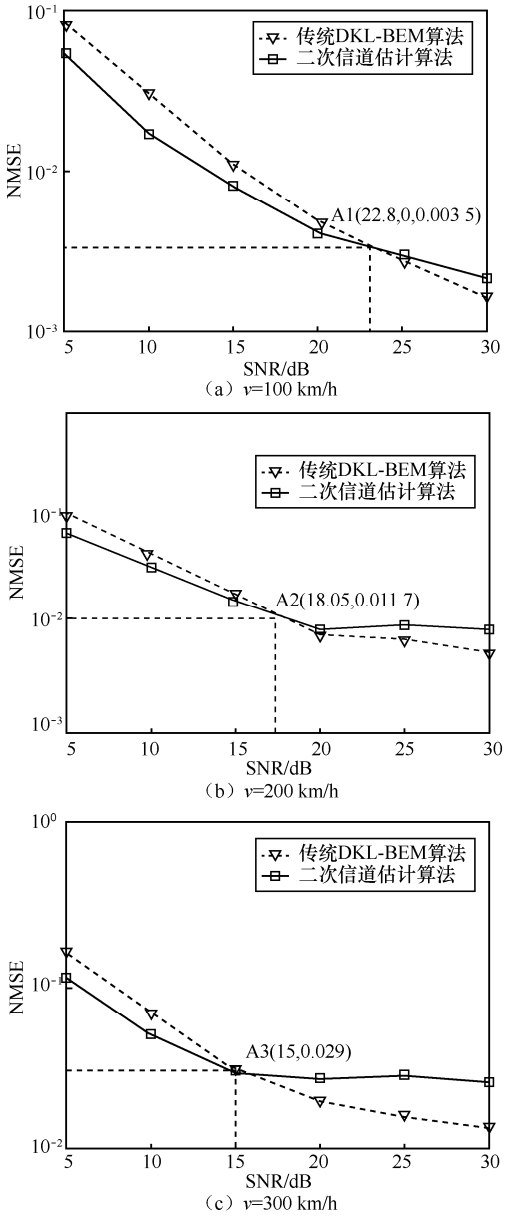


图 3　不同速度条件下 NMSE 随信噪比变化的曲线

观察可知，交叉点值的变化具有一定的规律，随着速度增加交叉点对应的信噪比值减小。因此，若能找到交叉点随速度变化的移动轨迹，就能以交叉点为临界点，自适应地实现两种算法的切换，提高信噪比大范围变化环境下信道估计的精度。

4　基于信噪比判决的双模切换信道估计算法

根据上述分析，为了提高所提信道估计算法的适应性，确保高速铁路通信的可靠性，提出高铁场景下一种基于信噪比判决的双模切换信道估计算法，自适应地实现两种算法的切换，在后面的描述中将该算法简称为自适应信道估计算法。算法流程如图 4 所示。其中，判决条件为交叉点位置对应的信噪比 y_{snr} 与实际信道的信噪比 SNR 比较大小，当 SNR<y_{snr}，采用第 3 节中所提的基于 ICI 消除的二次信道估计算法，否则采用第 2 节中提到的传统的 DKL-BEM 算法。因此，问题的关键在于找出 y_{snr} 值的位置即交叉点的移动轨迹。

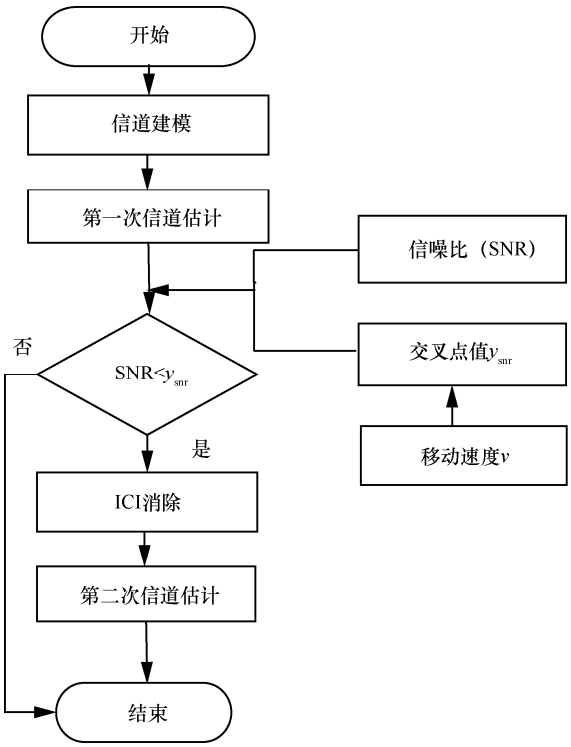


图 4　自适应信道估计算法流程

4.1　交叉点的移动轨迹

采用参数提取的方法，如图 5 所示，给出了交叉点随速度变化的散点图，其具有一定的变化趋势。

基于对拟合曲线的精度和算法复杂度的综合考虑，对交叉点移动轨迹进行二次多项式曲线拟合，其计算式为：

$$y_{\mathrm{snr}}=P_1v^2+P_2v+P_3 \tag{21}$$

其中，P_1、P_2、P_3 的取值区间分别为（2.579×10^{-5}, 7.641×10^{-5}）、（−0.067 72, −0.045 19）、（26.36, 28.66），通过对拟合结果进行分析、比较，本节分别取 $P_1=5.11\times10^{-5}$、$P_2=-0.056\,46$、$P_3=27.51$。

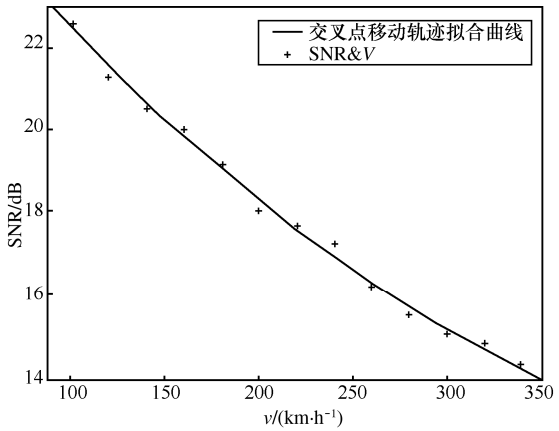


图 5　交叉点随速度变化的散点图及其拟合曲线

4.2　自适应信道估计算法

自适应信道估计算法以交叉点为分界点，在信噪比大范围变化环境下实现两种算法的切换。传统的 DKL-BEM 算法和基于 ICI 消除的二次信道估计算法最大的不同在基系数的求法上。自适应信道估计算法基系数向量的表达式如下：

$$g_3=\begin{cases}F_{\mathrm{LMMSE}}Y_P,\mathrm{SNR}\geqslant y_{\mathrm{snr}}\\F_{\mathrm{LMMSE}}Y_{2,P},\mathrm{SNR}\geqslant y_{\mathrm{snr}}\end{cases} \tag{22}$$

求得基系数后，采用与第 2.2 节中相同的方法得到时域信道矩阵 h_3 和频域信道矩阵 H_3，完成信道估计。

4.3　算法仿真及分析

在不同速度条件下，对传统的 DKL-BEM 算法、基于 ICI 消除的二次信道估计算法和自适应信道估计算法的性能进行了对比分析，如图 6 所示，系统仿真条件及参数设置见表 1。

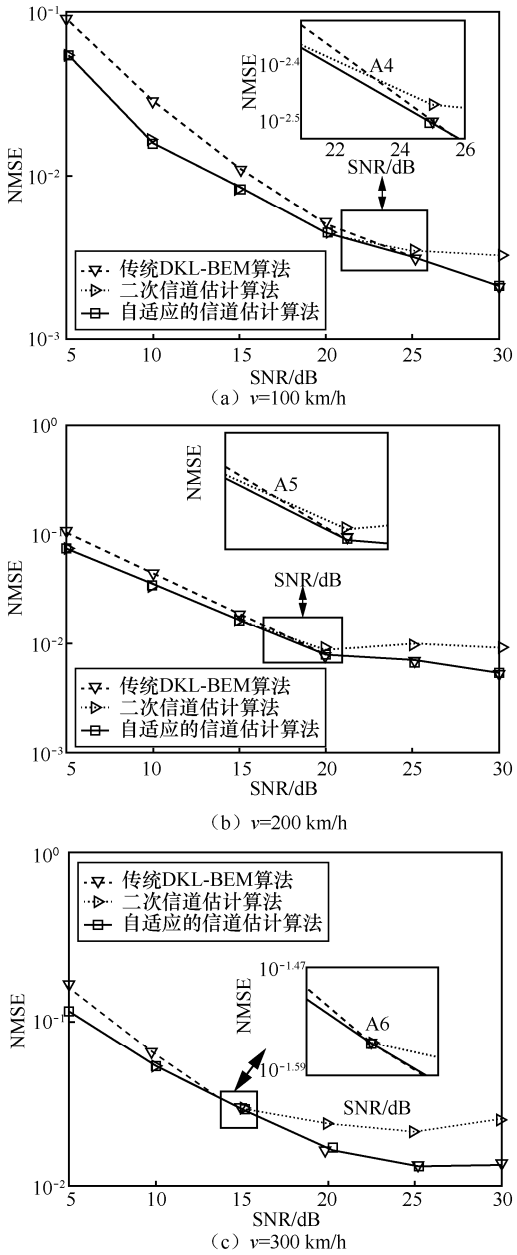


图 6　不同速度条件下自适应信道估计算法的性能曲线

由图 6 可知，所提的自适应信道估计算法在信噪比大范围变化环境下都有较高的估计精度，既保证了小信噪比条件下信道估计精度的提高，又保留了大信噪比时原有的精度。

因为实验时只对 5 dB、10 dB、15 dB、20 dB、

25 dB、30 dB 这 6 个信噪比值进行了仿真验证，所以从图形上看自适应信道估计算法与传统 DKL-BEM 算法的交叉点总是在这些整点上，不能准确地反映所给拟合曲线的准确性。故表 2 对由拟合曲线计算出的理论值与仿真实验中得到的实际值进行了比较，相对误差最大为 3.57%，验证了所给拟合曲线的准确性与有效性。

表 2　交叉点处对应信噪比的理论值与实际值比较

交叉点	A4	A5	A6
实际信噪比值/dB	23.197	18.065	14.883
理论计算值 y_{snr}/dB	22.370	18.260	15.170
相对误差	3.57%	1.08%	1.93%

5　结束语

本文提出高铁场景下一种基于信噪比判决的双模切换信道估计算法，该算法由传统的 DKL-BEM 算法和二次信道估计算法组成，随着信噪比变大，两种算法在性能曲线上出现交叉点，在大信噪比条件下二次信道估计算法性能劣于传统的 DKL-BEM 算法。本文给出交叉点随速度变化的移动轨迹，自适应地实现两种算法的切换。不同速度条件下的仿真结果表明，所提算法改善了信噪比在大范围变化环境下的信道估计精度，提高了信道估计算法的适应性和有效性。随着课题组的进一步研究，力争达到复杂度与精确度之间的最优平衡，提高算法的实时性，所提算法将更能适应铁路移动通信的发展。

参考文献：

[1] 刘云毅, 赵军辉, 王传云. 高速铁路宽带无线通信系统越区切换技术[J]. 电信科学, 2017, 33(11): 37-46.
LIU Y Y, ZHAO J H, WANG C Y. Handover technology in high-speed railway broadband wireless communication system[J]. Telecommunication Science, 2017, 33(11): 37-46.

[2] Bi Y M, ZHANG J H, ZENG M, et al. Channel modeling and estimation for OFDM systems in high-speed trains scenarios[C]//The IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, May 15-18, 2016, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

[3] HAO J X, WANG J T, PAN C Y. Low complexity ICI mitigation for MIMO-OFDM in time-varying channels[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2016, 62(3): 1-9.

[4] ABOUTORAB N, HARDJAWANA W, VUCETIC B. A new iterative doppler-assisted channel estimation joint with parallel ICI cancellation for high-mobility MIMO-OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(4): 1577-1589.

[5] SHENG Z C, FANG Y, WANG C. A BEM method of channel estimation for OFDM systems in high-speed train environment[C]//The International Workshop on High Mobility Wireless Communications, November 1-3, 2013, Shanghai, China. [S.l.: s.n.], 2013: 6-9.

[6] DENG L, CHENZ H, ZHAO Y S. Basis expansion model for channel estimation in LTE-R communication system[J]. Digital Communications & Networks, 2016, 2(2): 92-96.

[7] TEO K A D, OHNO S. Optimal MMSE finite parameter model for doubly-selective channels[C]//IEEE Global Telecommunications Conference, Nov 29-Dec 3, 2005, St.Louis, USA. Piscataway: IEEE Press, 2005: 3507.

[8] 江戬. TD-LTE 系统中信道估计技术研究[J]. 电信科学, 2010, 26(11): 141-145.
JIANG J. Research on channel estimation technology in TD-LTE system[J]. Telecommunication Science, 2010, 26(11): 141-145.

[9] 刘顺兰, 汪佳丽. 快时变 OFDM 系统中非采样间隔信道的信道估计[J]. 电信科学, 2015, 31(9): 112-117.
LIU S L, WANG J L. New channel estimation algorithm for non-sample-spaced channels in fast time-varying OFDM system[J]. Telecommunication Science, 2015, 31(9): 112-117.

[10] 蔡明, 曾嵘. 高速铁路中基于组导频的 OFDM 系统时变信道估计算法[J]. 铁道学报, 2015, 37(5): 52-56.
CAI M, ZENG R. Group-pilot-aided time-varying channel estimation for high-speed railway OFDM system[J]. Railway Transaction, 2015, 37(5): 52-56.

[11] ZHAO Y, HAGGMAN S G. Intercarrier interference self-cancellation scheme for OFDM mobile communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2001, 49(7): 1185-1191.

[12] MA J, ORLIK P V, ZHANG J, et al. Reduced-rate OFDM transmission for inter-subchannel interference self-cancellation over high-mobility fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2012, 11(6): 2013-2023.

[13] 李丹, 柯峰. 高速移动环境下基于 OFDM 的 LTE 系统 ICI 消除技术综述[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2013, 25(3): 292-299.
LI D, KE F. ICI mitigation techniques for OFDM based LTE system over highly mobile environment: a survey[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2013, 25(3): 292-299.

[14] NISSEL R, RUPP M. Doubly-selective MMSE channel estimation and ICI mitigation for OFDM systems[C]//The 2015 IEEE International Conference on Communications, June 8-12, 2015, London, UK. Piscataway: IEEE Press, 2015: 4692-4697.

[15] ZUO H L, SONG H G, YUAN T P, et al. Channel modeling and estimation in high-speed mobile environment[C]//The IEEE 83rd Vehicular Technology Conference, May 15-18, 2016, Nanjing, China. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-5.

[16] 赖晓阳, 朵琳. OFDM 系统中一种实用的干扰抑制信道估计算法[J]. 电信科学, 2016, 32(1): 88-92.
LAI X Y, DUO L. Utility channel estimation algorithm with interference suppression in OFDM system[J]. Telecommunication Science, 2016, 32(1): 88-92.

[17] KASHOOB M, ZAKHAROV Y. Data-aided iterative reweighted LMMSE channel estimation for MIMO OFDM[C]//IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, December 7-10, 2015, Abu Dhabi, UAE. Piscataway: IEEE Press, 2015: 663-667.

[18] 梁文莉. 高速铁路环境下 OFDM 系统信道估计研究[D]. 兰州：兰州交通大学, 2015.
LIANG W L. Research on channel estimation of OFDM system in high-speed railway environment[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015.

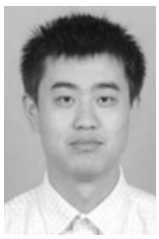
[19] 陈少平. 时变信道中的正交频分复用系统 ICI 分析、消除与系统均衡[D]. 武汉：华中科技大学, 2004.
CHEN S P. ICI Analysis, cancellation, and equalization for OFDM sytems over time-varying channels[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.

[20] MUQUET B, COURVILLE M, DUHAMEL P. Subspace-based blind and semi-blind channel identification method for OFDM systems[J]. IEEE Transactions on Signal processing, 2002, 50(7): 1699-1712.

[作者简介]

王传云（1977−），男，华东交通大学信息工程学院院长助理、副教授、硕士生导师，主要研究方向为无线通信、微波电路与天线。

王敏（1992−），女，华东交通大学信息工程学院硕士生，主要研究方向为无线通信、物联网技术等。



赵军辉（1973−），男，华东交通大学信息工程学院院长，北京交通大学教授、博士生导师，主要研究方向为宽带无线和移动通信系统。

尹燕（1978−），女，华东交通大学软件学院讲师，主要研究方向为复杂网络和物联网等。