

文章编号: 1001-8360(2017)09-0081-08

# 适应高速铁路场景的新型基扩展信道估计模型

李 倩<sup>1</sup>, 王公仆<sup>1</sup>, 李清勇<sup>1</sup>, 缪德山<sup>2</sup>, 钟章队<sup>1</sup>

(1. 北京交通大学 交通数据分析与挖掘北京市重点实验室, 北京 100044;

2. Nokia/Technology & Innovation/Research/Radio System, 北京 100102)

**摘 要:** 时变信道估计是高速铁路无线通信系统的关键技术, 通常利用基扩展模型来逼近时变信道并简化估计参数。经实践表明, 现有基扩展模型并不能够满足高速铁路场景中信道估计精度的要求。因此, 本文研究了高速铁路场景下快时变信道的信道估计方法, 提出一种新型基扩展模型。与现有基扩展模型对比, 新型基扩展模型通过挖掘历史测量数据, 有效地利用了高速铁路在不同时刻经过同一地点的信道之间具有相关性的特点。基于 Jakes 模型和高架桥场景中的实测数据, 对新型基扩展模型的信道估计性能进行仿真, 验证了新型基扩展模型对时变信道的估计更为准确, 能够较好应用到高速铁路场景中。

**关键词:** 时变信道; 基扩展模型; 信道估计; 多普勒频移

**中图分类号:** TN929.5 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-8360.2017.09.012

## A New Basis Expansion Model for Channel Estimation in High-speed Railway Scenario

LI Qian<sup>1</sup>, WANG Gongpu<sup>1</sup>, LI Qingyong<sup>1</sup>, MIAO Deshan<sup>2</sup>, ZHONG Zhangdui<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Lab of Transportation Data Analysis and Mining, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Nokia/Technology & Innovation/Research/Radio System, Beijing 100102, China)

**Abstract:** Time-selective channel estimation is one key technology for wireless communication system of high-speed railways(HSRs). Basis expansion models (BEMs) are usually used to approximate and simplify the time-varying channel parameters to be estimated. However, the existing BEMs such as complex exponential basis expansion model (CE-BEM) and polynomial basis expansion model (P-BEM) cannot obtain satisfactory channel estimation accuracy for wireless communication systems on HSRs. To solve this problem, the channel estimation method for fast time-varying channel under the scenario of high-speed railway was studied and a novel BEM was proposed. Compared with the existing BEMs, the new model, based on the historical measurement data, can effectively utilize the characteristics of the correlation between the wireless channels at different time intervals in the same position on the railway. Based on the Jakes model and practical measurement data from viaduct situation, the simulation was conducted on the channel estimation performance of the new BEM, which verified the new BEM outperformed existing BEMs in time-varying channel estimation. The new BEM can be applied to future wireless communication systems on HSRs.

**Key words:** time-varying channel; basis expansion model; channel estimation; Doppler frequency shift

随着交通事业的发展, 高速铁路行驶的速度不断提高, 目前最高速度已达 575 km/h<sup>[1]</sup>。虽然高速铁路的发展给人类的出行带来了极大的方便, 但是高速的

移动性加剧了无线信道的时变特性, 使无线信道呈现出时间和频率的双选择性衰落。当信号经过这种信道传播时, 质量会变差, 这给高速铁路通信系统带来了严峻的挑战。然而, 如果能够快速准确地估计出信道, 就可以增加检测发送信号的有效性。因此, 信道估计的快速性和准确性很大程度上影响着高速铁路通信系统的性能。

收稿日期: 2015-12-01; 修回日期: 2016-08-04

基金项目: 国家自然科学基金(61571037); ZTE 委托开发合同

作者简介: 李 倩 (1991—), 女, 河北保定人, 硕士研究生。

E-mail: 15120414@bjtu.edu.cn

目前用于时变信道估计的主要模型有基扩展模型 BEM(Basis Expansion Models)<sup>[2]</sup>和高斯马尔科夫模型 GMM(Gaussian Markov Model)<sup>[3]</sup>,本文研究的是基于基扩展模型的时变信道的估计法。基扩展模型将信道分解成时变的基函数和系数线性组合的形式。在一定条件下,它能够较好地估计时频双选信道,并且对拥有较大的时延和多普勒扩展的快时变信道同样适用<sup>[4]</sup>。近年来学术界也提出了其他基扩展模型,如复指数基扩展模型 CE-BEM<sup>[5]</sup>、多项式基扩展模型 P-BEM<sup>[6-7]</sup>、椭圆基函数基扩展模型 DPS-BEM<sup>[8]</sup>。但高速铁路场景十分复杂,列车在行驶过程中会经过高架桥、隧道、路堑等多种复杂环境,而现有的这些基扩展模型构造出的基函数没有结合实际场景。所以将它们应用于高速铁路场景中时,并不能够得到很好的逼近效果和估计性能。

因此,需要寻找出适合于高速铁路场景的新型基扩展模型。由于列车途经的基站和铁轨的位置相对固定,列车的行驶轨迹基本不变,再加上同一地点的信号传播环境变化不大,所以列车在不同时刻到达同一地点的无线信道之间具有相关性。基于此,高速铁路场景的信道能够通过结合历史测量数据提取出信道的自相关矩阵,并以此构造出基函数来进行信道估计。

对于一般场景,因为移动台随意移动,发送的信号方向任意,导致信道的自相关矩阵很难预测。但对于高速铁路场景,基站天线和车顶天线之间的信道自相关矩阵是可获得的。这是由于铁路轨迹固定,列车运行速度可以提前知道,而且基本速度恒定,基站能够保存前几趟列车的发送信号。因此,本文提出新型基扩展模型的思路:利用基站保存的历史数据分析并提取出信道的自相关矩阵。得到信道的自相关矩阵后,就可以提取出特征向量构造基函数,然后利用基扩展模型的思路估计信道。

本文首先说明快时变无线信道的特性,并探究速度对信道特性的影响。然后对比现有的几种基扩展模型及其优缺点,分析基扩展模型的阶数及列车的速度对信道估计性能的影响,并且挖掘高速铁路场景中的信道在时域上的相关性,提出基于历史测量数据的新基扩展模型。最后利用 Jakes 模型和历史测量数据,通过仿真的方式验证新型基扩展模型的逼近性能优于现有的基扩展模型,且能够较好应用到高速铁路场景中。

## 1 信道的特性分析

### 1.1 快时变无线信道

无线信道易受到外界环境的影响,信道参数具有

可变性。当信道参数随着时间变化比较剧烈时,无线信道称之为快时变无线信道,其特性包括时延性和时变性。实际中由于传播路径上障碍物的存在,从发射端发射的单一信号会发生多径效应,即沿多条路径到达接收端。多径效应会导致接收端接收到的信号是 1 个脉冲序列,使信道呈现出时延性。时延扩展很大时易引发符号间干扰。另外,当接收端或发射端发生快速移动时,无线信道所处的环境会剧烈变化,导致接收的信号在幅度、相位甚至多径数目上发生明显变化。此时的信道与双方静止时相比,时变特性更为明显,从而引发信号传播环境恶化。同时,运动带来的多普勒频移现象也会严重影响无线信道的通信质量。

### 1.2 多普勒频移及信道时变性

在高速铁路场景中,基站的位置固定,列车的快速移动会导致发射信号在传播过程中容易受到多普勒频移的影响。到达接收端的信号产生的多普勒频移  $f_d$  与信号载波频率  $f_c$ 、列车的运动速度  $v$  及其运动方向和信号传播方向之间的夹角  $\varphi$  有关,见图 1。多普勒频移表示为

$$f_d(t) = \frac{vf_c}{c} \cos \varphi(t) \quad (1)$$

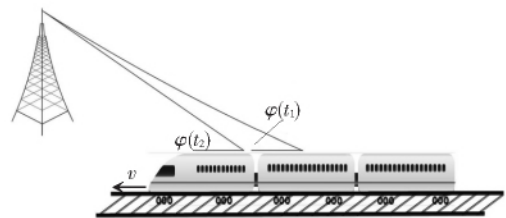


图1 多普勒频移关系图

式中: $c$  为电磁波的传播速度; $\varphi(t)$  为时间函数。当列车运动方向和信号传播方向一致时,多普勒频移达到最大值

$$f_{\max} = \frac{vf_c}{c} \quad (2)$$

接收信号的频率范围是  $[f_c - f_{\max}, f_c + f_{\max}]$ 。

列车的高速移动性不仅会使信号在传播过程中伴随严重的多普勒频移,而且还会加剧信道的时变性。为研究速度对信道时变性的影响,可通过仿真进行分析。在仿真中,利用 Jakes 模型<sup>[9]</sup>模拟信道。Jakes 模型模拟的是,接收端以恒定速度移动时,发射端发射的信号因环境中物体反射的作用,从而沿各个方向均匀到达接收端的场景。Jakes 模型是 1 种易于实现、能够较好地模拟平坦衰落信道的仿真模型。在高速铁路场景中,信号从发射端一般以视距 LoS(Line-of-Sight)传播的方式到达接收端。所以,Jakes 模型并不完全符合高速铁路场景,本文利用 Jakes 模型只是进行理

论分析。信道  $h$  的自相关矩阵可以通过 Jakes 模型获得,即

$$E\{h(n)h^H(m)\} = J_0(2\pi f_{\max}(n-m)t_s) \quad (3)$$

式中:  $J_0(x)$  为第 1 类零阶贝塞尔函数;  $t_s$  为符号采样的时间间隔;  $n, m = 0, 1, \dots, N-1$ ,  $N$  为 1 个采样模块内的采样点数。

仿真中,取  $t_s = 5 \mu s$ ,  $N = 1000$ ,  $f_c = 2 \text{ GHz}$ , 用信道幅值随时间变化的剧烈程度来反映信道的时变特性。仿真结果见图 2。图中分别给出了移动端速度为 100、300、500 km/h 时的信道幅值的变化情况。由此,说明随着速度的提高,信道的幅值变化越来越剧烈,从而反映出信道的时变性加剧。当速度增至 300 km/h 时,信号的传播环境非常恶劣。

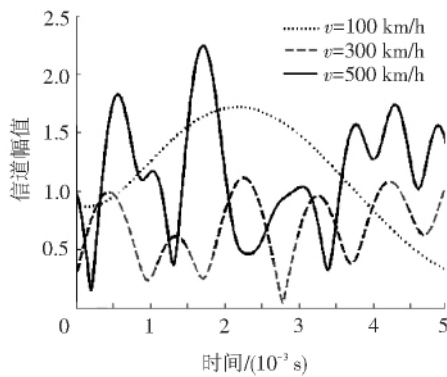


图2 速度对信道时变性的影响

## 2 现有基扩展模型分析

基扩展模型是常用的适用于时变信道的信道估计模型,其主要思路是将信道分解成若干个基函数和相应系数的线性组合。定义在 1 个采样模块的时间间隔  $Nt_s$  内采样得到的信道信息为 1 帧,则在任意采样时刻  $n$  处,第  $l$  条路径的信道在基扩展模型下的表现形式为

$$h(n, l) = \sum_{q=0}^Q \eta_q(l) \mu_q(n) \quad (4)$$

式中:  $l = 0, 1, \dots, L-1$ ,  $L$  为路径总数;  $Q$  为基扩展模型的阶数,至少取  $2 \lceil f_{\max} Nt_s \rceil$  才能保证足够的采样自由度;  $\mu_q(n)$  为基函数,以时间为自变量,在任一帧的时间间隔  $Nt_s$  间始终保持不变;  $\eta_q(l)$  为第  $l$  条路径的系数,在一帧的时间间隔  $Nt_s$  间保持不变,在进入下一帧时才会改变。为简化只研究窄带信号,即路径数为 1。此时信道能够简化地表示成

$$h(n) = \sum_{q=0}^Q \eta_q \mu_q(n) \quad (5)$$

式(5)的矩阵形式为

$$h = U\eta \quad (6)$$

式中:  $h = [h(0), h(1), \dots, h(N-1)]^H$ ;  $\eta = [\eta(0), \eta(1), \dots, \eta(Q)]^H$ ;  $U_{nq} = \mu_q(n)$ , 表示大小为  $N \times (Q+1)$  的基函数。当确定了信道估计利用的基扩展模型后,基函数是已知的。

基扩展模型形式简单,当利用基扩展模型表示信道时,就不需要直接估计信道  $h$ ,而是转变为估计系数  $\eta$ 。由于基扩展模型的阶数  $Q$  远远小于信道  $h$  的长度  $N$ ,从而大大降低了信道估计的复杂度。另外,基扩展模型的关键在于如何构造基函数,这很大程度上影响着信道估计的性能。3 种现有的基扩展模型及各自的优缺点如下所述。

### 2.1 复指数 BEM 模型(CE-BEM)

复指数 BEM 模型是比较常用的基扩展模型,它采用傅里叶基作为基函数,其基本形式为

$$U_{nq} = e^{j\frac{2\pi(q-Q/2)}{N}n} \quad (7)$$

CE-BEM 模型构造方法简单,通过有限的傅里叶基模拟信道的频域特性。但是由于吉布斯现象的存在,傅里叶级数的截断效应会导致在观察区间的边界处发生频率泄露,产生较大的建模误差<sup>[10]</sup>。

### 2.2 多项式 BEM 模型(P-BEM)

多项式 BEM 模型的基函数是由泰勒级数展开并近似得到的,其表达形式为

$$U_{nq} = \left(n - \frac{N}{2}\right)^q \quad (8)$$

P-BEM 模型没有 CE-BEM 模型严重的边缘误差,但它不适用于基函数的阶数很大的情况。由于 P-BEM 模型的基函数成指数增长,当阶数很大时,基函数的变化会使各项数值之间产生较大差异,从而引发近似误差变大,此时利用 P-BEM 模型进行信道估计的性能很差。

### 2.3 椭圆基函数 BEM 模型(DPS-BEM)

DPS-BEM 模型的基函数是由一系列正交的球函数组成的。假设信道  $h$  的长度为  $N$ ,为了得到 DPS-BEM 模型的基函数,首先需要构造一个  $N \times N$  的核矩阵  $C$ ,该矩阵的第  $i$  行第  $j$  列元素为

$$C_{ij} = \frac{\sin(2\pi(n-m)f_{\max}t_s)}{\pi(n-m)} \quad (9)$$

然后对核矩阵  $C$  进行奇异值分解 SVD(Singular Value Decomposition),即

$$C = V \Sigma W^H \quad (10)$$

式中:  $\Sigma$  为一个由特征值构成的对角阵,且特征值按照从大到小的顺序依次排列;  $V$ 、 $W$  均为由对应的特征向量构成的一组正交矩阵。取  $V$  的前  $Q+1$  列特征向量作为 DPS-BEM 模型的基函数,即

$$U=V(:,1:(Q+1)) \quad (11)$$

理论上 DPS-BEM 模型的基函数具有很强的能量集中性,不易引起明显的频率泄露,估计信道的性能较好。但 DPS-BEM 模型及前两种基扩展模型的基函数都是由固定函数生成的,其相关参数没有结合高速铁路的复杂场景。

## 2.4 现有基扩展模型的仿真分析

### (1) 阶数对基扩展模型估计性能的影响

为了更加深入地了解基扩展模型,通过仿真的方式分析了阶数对信道估计性能的影响,本文利用 CE-BEM 模型估计信道。仿真中,多普勒频移的最大值  $f_{\max}=60$  Hz,符号采样时间  $t_s=1$  ms,以及采样点数  $N=50$ ,仿真结果见图 3。理论上,阶数  $Q$  至少为  $2 \lceil f_{\max} N t_s \rceil = 6$  才能提供足够的自由度,以保证相对精确地估计出信道。从图中可以看出,当  $Q=4$  时,由于缺少足够的采样自由度,估计出的信道包络线与原信道包络线的偏离程度较大,估计效果不好;当  $Q \geq 6$  时,估计出的信道包络线比较接近原信道的包络线,而且,阶数  $Q$  取值越大会使信道的逼近效果越好。在实际应用中,考虑到计算复杂度,通常使用较大的  $Q$  值以保证信道估计的准确性。

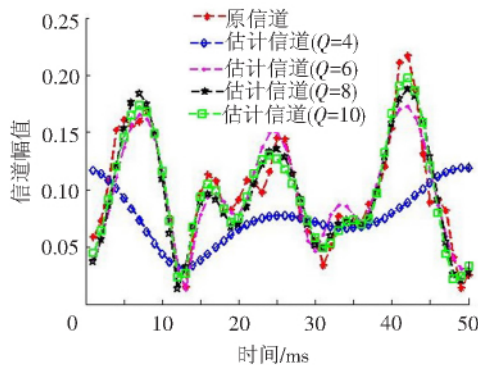


图3 阶数对基扩展模型逼近效果的影响

### (2) 速度对基扩展模型估计性能的影响

现有基扩展模型均可用来估计快时变信道,可通过仿真探究上述 3 种基扩展模型在高速情况下的信道估计性能。用均方误差 MSE (Mean Squared Error) 来量化信道的估计误差,即

$$P_{\text{MSE}} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |h(n) - \hat{h}(n)|^2 \quad (12)$$

同时定义归一化均方误差 NMSE (Normalized Mean Squared Error) 为

$$P_{\text{NMSE}} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |h(n) - \hat{h}(n)|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |h(n)|^2} \quad (13)$$

仿真中同样利用 Jakes 模型模拟信道,通过 Jakes 模型中的参数  $f_{\max}$  的取值变化引入速度对信道估计的影响。取  $f_c=900$  MHz,  $t_s=5$   $\mu$ s,  $N=1\ 000$ ,以及  $Q=4$ ,移动端速度从 200 km/h 至 500 km/h 变动,最终得到的仿真结果见图 4。从图中可见,高速情况下,CE-BEM 模型的信道估计性能基本上不受速度的影响,P-BEM 模型的估计性能相对 DPS-BEM 模型较稳定;虽然 P-BEM、DPS-BEM 这两种模型的信道估计性能随着速度的增加均有所下降,但 DPS-BEM 模型的估计性能始终保持最好。

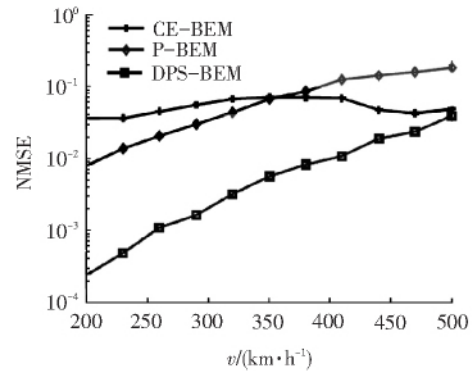


图4 速度对信道估计性能的影响

## 3 新型基扩展模型

根据图 4 的仿真结果,由于高速情况下 DPS-BEM 模型的信道估计性能最好,所以本文提出的新型基扩展模型借鉴 DPS-BEM 模型构建基函数的方法。同时考虑到高速铁路场景中,列车在不同时刻经过同一地点的信道之间具有相关性,所以新型基扩展模型基于历史测量数据,利用信道的自相关矩阵构建基函数来估计时变信道,其基本思路是:首先从历史测量数据中提取出小尺度衰落作为模拟的信道  $h$ ,这是由于小尺度衰落能够反映出信道在短距离内的波动情况,从而更加有效地模拟出信道;然后根据自相关矩阵  $R$  的定义

$$R = E(hh^H) \quad (14)$$

求解出  $R$  作为核矩阵,新型基扩展模型的基函数同样满足式(11)。由于新型基扩展模型最大的特点是基于历史测量数据来估计信道,所以本文将新型基扩展模型表示为 HMB-BEM (Historical Measurement Based-BEM)。虽然 HMB-BEM 模型和现有的离散卡-洛基函数 BEM 模型(DKL-BEM)<sup>[11]</sup>构造基函数的方法相同,但必须强调 HMB-BEM 模型是通过挖掘高速铁路场景中的信道在时域上的相关性,在 DPS-BEM 模型的基础上进行改进得到的,所以两者的基本原理有本质的区别。



同时,还需要借助导频估计出系数  $\eta$ 。实际中,当发送信号经过单条时变信道到达接收端时,如果接收到的信号没有发生符号内干扰,那么接收信号  $y$  与发送信号  $x$  在采样时刻  $n$  处的关系为

$$y(n) = h(n)x(n) + w(n) \quad (15)$$

矩阵形式即

$$y = Hx + w \quad (16)$$

式中:  $x$ 、 $y$  分别是由各个时刻的发送信号和接收信号组成的大小为  $N \times 1$  的信号序列;  $w = [w(0), w(1), \dots, w(N-1)]^H$  为信号传播过程中引入的噪声;  $H$  为信道的矩阵,在单径情况下满足

$$H = \begin{bmatrix} h(0) & & & \\ & h(1) & & \\ & & \ddots & \\ & & & h(N-1) \end{bmatrix}$$

如图5所示,将发送信号  $x$  分成导频和数据信息

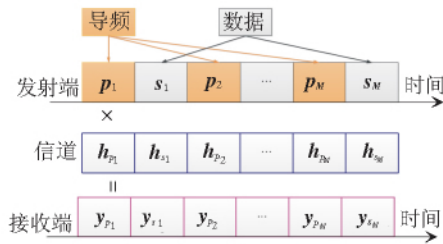


图5 导频设置示意图

两部分进行传输,发送形式为

$$x = [p_1^H, s_1^H, p_2^H, s_2^H, \dots, p_M^H, s_M^H]^H$$

式中:  $p_m$ 、 $s_m$  分别为第  $m$  组发送信号的导频部分和数据部分,  $m = 1, 2, \dots, M$ ,  $M$  为分隔的组数。这样,信道  $H$  被分成  $H_p$  和  $H_s$  两部分,式(16)则可以用  $y_p = H_p p + w_p$  和  $y_s = H_s s + w_s$  来代替表示。其中,  $p = [p_1^H, p_2^H, \dots, p_M^H]^H$ ,  $s = [s_1^H, s_2^H, \dots, s_M^H]^H$ ,  $w_p$  和  $w_s$  为相对应的噪声部分。若第  $m$  组的导频和数据信息的数目分别为  $N_{m,p}$  和  $N_{m,s}$ ,同时满足

$$\sum_{m=1}^M (N_{m,p} + N_{m,s}) = N$$

并且起始位置用  $n_{m,p}$  表示,则第  $m$  组的导频经过的信道为

$$H_{m,p} = \begin{bmatrix} h(n_{m,p}) & & & \\ & h(n_{m,p} + 1) & & \\ & & \ddots & \\ & & & h(n_{m,p} + N_{m,p} - 1) \end{bmatrix}$$

由式(5)得到

$$H_{m,p} = \sum_{q=0}^Q U_{m,q} \eta_q \quad (17)$$

式中:

$$U_{m,q} =$$

$$\begin{bmatrix} u_q(n_{m,p}) \\ u_q(n_{m,p} + 1) \\ \vdots \\ u_q(n_{m,p} + N_{m,p} - 1) \end{bmatrix}$$

从而相对于导频部分的接收信号  $y_p$  为

$$y_p = \sum_{q=0}^Q \begin{bmatrix} U_{1,q} \eta_q p_1 \\ U_{2,q} \eta_q p_2 \\ \vdots \\ U_{M,q} \eta_q p_M \end{bmatrix} + w_p \quad (18)$$

令  $\eta_q p_m = B_m \eta$ ,  $B_m$  为发送的第  $m$  组导频构成的  $N_{m,p}$  阶对角阵,代入上式后得到

$$y_p = D\eta + w_p \quad (19)$$

式中:

$$D = \begin{bmatrix} U_{1,0} B_1 & U_{1,1} B_1 & \cdots & U_{1,Q} B_1 \\ U_{2,0} B_2 & U_{2,1} B_2 & \cdots & U_{2,Q} B_2 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ U_{M,0} B_M & U_{M,1} B_M & \cdots & U_{M,Q} B_M \end{bmatrix}$$

由于估计的目标系数  $\eta$  的大小为  $(Q+1) \times 1$ ,根据方程组解的唯一性,需要的导频数至少为  $Q+1$  才能保证估计出  $\hat{\eta}$ 。然后利用最小二乘估计 LSE (Least Square Estimation) 法<sup>[12]</sup> 最终得到  $\eta$  的估计值

$$\hat{\eta} = (D^H D)^{-1} (D^H y_p) \quad (20)$$

则信道的估计值为  $\hat{h} = U\hat{\eta}$ 。

## 4 新型基扩展模型的仿真

### 4.1 利用 Jakes 模型的仿真分析

为了提高新型基扩展模型信道估计性能的可信度,首先基于 Jakes 模型在理论方面对其进行性能分析。在仿真中,设定阶数  $Q$  的取值范围是 2 到 10 的整数,  $f_c = 900$  MHz,  $t_s = 5$   $\mu$ s,  $N = 1\ 000$ , 移动端速度分别为  $v = 450$  km/h 和  $v = 250$  km/h, 仿真结果见图 6。图中各条曲线分别表示利用不同的基扩展模型得出的信道均方误差随阶数  $Q$  的变化情况。

由图可见,CE-BEM 模型的估计性能随着  $Q$  的增大缓慢增强;P-BEM 模型由于自身基函数性质的局限,在  $Q=4$  处估计性能骤然恶化,当移动速度为 250 km/h 时,P-BEM 模型的估计性能在  $Q=4$  处优于 CE-BEM 模型;DPS-BEM 模型的估计性能在达到一定精度后呈稳定状态;而 HMB-BEM 模型的信道估计性能明显好于现有的几种基扩展模型,并且随着阶数  $Q$  的增大,性能优势越明显。这说明通过信道的自相关矩阵构建基函数,确实有助于提高信道估计的性能。但是这个方法是否适用于结合历史测量数据估计高速

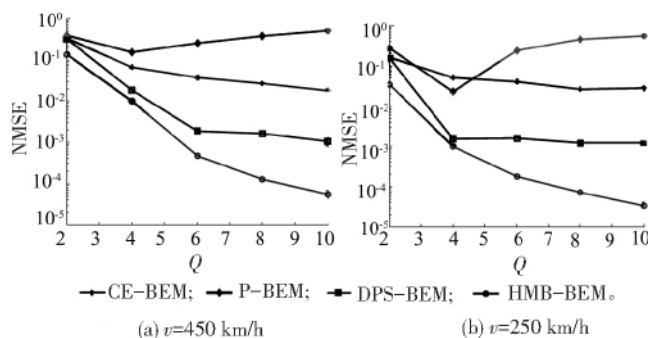


图6 不同移动速度时各种基扩展模型信道估计性能对比

铁路场景下的快时变信道还需要讨论。

## 4.2 结合历史测量数据的仿真分析

### 4.2.1 实测场景及测量方法

本次沿“郑州—西安”高速铁路线,在高架桥场景下开展数据测量<sup>[13]</sup>。测量系统包括发射天线、接收天线、距离传感器、GPS 和计算机 5 部分。发射天线利用现有的基站,具有 43 dBm 的发射功率和 17 dBi 的增益,基站在垂直方向上高出列车顶部 20 m,位于距离轨道 15 m 处。发射信号指向轨道的方向,其载波频率为 930 MHz,带宽为 200 kHz,光束宽度在水平方向上为  $65^\circ$ ,垂直方向上为  $6.8^\circ$ 。接收天线具有 4 dBi 的增益,位于列车顶部、整个车身中部的的位置,高出列车顶部 30 cm,全方向接收信号。使用威尔泰克 8300 型 Griffin 快速测量接收机测量和存储各个采样点的功率,该接收机能够通过距离传感器改变采样的速率,以保证采样点间隔在空间上是一定的,测量中基本上每隔 0.13 m 采样 1 次。计算机上安装的场强测量软件用来对数据进行存储和处理。

列车长 204 m,高 3.8 m,宽 3.3 m,测量过程中往远离基站的方向行驶。列车行驶的周围环境分为 3 个场景,3 个场景中高架桥的高度分别为 10、20、25 m。在场景 1 中轨道附近有 1 个低于 5 m 的废弃工厂,远离轨道处有 1 个城镇,房屋高度均低于 8 m;场景 2 是开阔空间,周围基本上无建筑物,散射体的平均高度低于 8 m;场景 3 是一个房屋高度均低于 10 m 的城镇,也是位于远离轨道的位置;这 3 个场景均是典型的郊区环境。在每个场景下按列车速度为 71、76、72 m/s 分别测量 3 次,得到 3 组相应的数据,包括行驶距离和接收功率。高速铁路测量场景示意图见图 7。

### 4.2.2 测量数据及应用

图 8 为场景 1 下测量得到的接收功率随列车行驶距离的变化情况。由图可见实测得到的接收功率伴随着剧烈的波动,从而反映出信号在传播过程中的衰落现象十分明显。

结合上述历史测量数据,可将 HMB-BEM 模型应

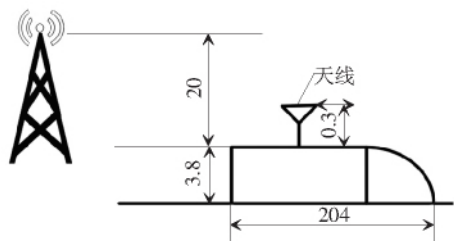


图7 测量场景示意图(单位:m)

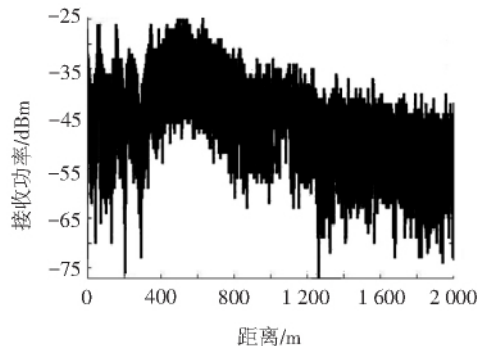


图8 接收功率实测图

用到高速铁路场景中。由于目前车顶的接收天线并不具备存储和分析数据的能力,在实际应用中需要将历史测量数据转存到基站中。考虑到 HMB-BEM 模型的可行性,如果基站作为接收端能够做到实时的存储和分析测量数据,可进一步提高信道估计的效率。

另外,为了从接收功率中提取出小尺度衰落作为信道信息,首先需要使用一定波长的滑动窗口对接收功率进行平均以得到大尺度衰落与文献<sup>[13]</sup>分析了利用不同波长的滑动窗口求出的大尺度衰落类似。然后在接收功率上去除大尺度衰落的干扰后,进一步提取出小尺度衰落来模拟信道  $h$ <sup>[14]</sup>。HMB-BEM 模型的两种具体应用算法步骤如下。显然,当获取的历史数据的组数  $G=1$  时,两种算法相同。

#### 算法 I

Step1 对基站处理存储的  $G(G \leq 10)$  组历史测量数据(接收功率)进行处理得到的小尺度衰落用来模拟信道  $h$ ;

Step2 分别求解  $G$  组模拟信道  $h$  的自相关矩阵  $R$ ;

Step3 对  $G$  组自相关矩阵  $R$  取平均;

Step4 对平均后的自相关矩阵进行 SVD 分解,取前  $Q+1$  列特征向量作为基函数;

Step5 借助导频,估计对应系数  $\hat{\eta}$ ;

Step6 求得信道  $h$  的估计值  $\hat{h} = U\hat{\eta}$ 。

#### 算法 II

Step1 同算法 I 中的 Step1;

Step2 同算法 I 中的 Step2;

Step3 分别对  $G(G \leq 10)$  组的自相关矩阵  $R$  进

行 SVD 分解,取前  $Q+1$  列特征向量生成  $G$  组基函数;

**Step4** 将  $G$  组基函数按列合并成一个基函数,并求其自相关矩阵;

**Step5** 对 Step4 得到的自相关矩阵再进行 SVD 分解,取其前  $Q+1$  列特征向量作为基函数;

**Step6** 同算法 I 中的 Step5;

**Step7** 同算法 I 中的 Step6。

当  $G=1$  时,不需要再取平均值,直接对信道的自相关矩阵进行 SVD 分解,取特征向量的前  $Q+1$  列即可。

#### 4.2.3 仿真结果

根据上述应用算法,利用场景 1 下测量的 3 组数据,分别基于 3 种现有的基扩展模型和新型基扩展模型进行信道估计,得到的仿真结果见图 9。仿真中设定的窗口大小为 40 个波长,图中用 HMB1-BEM(算法 I)和 HMB2-BEM(算法 II)区分两种不同的应用算法。与图 6(b)中的理论分析对比,图 9 中 DPS-BEM 模型的信道估计性能并不理想。这是由于 DPS-BEM 模型在构建基函数时引入了环境变量  $f_{\max}$  和  $t_s$ ,因此其估计性能易受到外界环境的影响。从图 4 也可看出,DPS-BEM 模型的估计性能随着速度的变化而明显变化,CE-BEM 和 P-BEM 模型的性能相对比较稳定。这进一步说明了 DPS-BEM 模型并不适用于高速铁路场景。另外,虽然 HMB-BEM 模型是对 DPS-BEM 模型的一种改进方法,但其构建基函数时引入的环境变量有效地结合了历史测量数据,充分利用了高速铁路场景中信道在时域上的相关性,从而极大地克服了 DPS-BEM 模型在高速铁路场景中应用的劣势。不仅如此,随着阶数的增大,HMB-BEM 模型很大程度上改善了对高速铁路场景中快时变信道的估计性能。

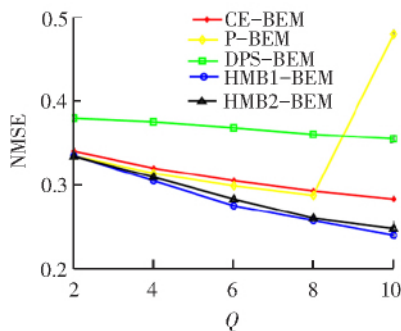


图9 场景1下的仿真结果

#### 4.3 新型基扩展模型的性能分析

通过利用 Jakes 模型和高速铁路场景中获取的历史测量数据,本文从理论和现实场景两方面分析了

HMB-BEM 模型信道估计的性能。图 6 和图 9 所示的仿真结果均表明,相对于现有的基扩展模型,HMB-BEM 模型在估计信道的性能上有很大程度的提高,并且极大的改进了 DPS-BEM 模型在高速铁路场景中应用的不足。从构造基函数的过程分析,现有基扩展模型生成的基函数的相关参数几乎和高速铁路场景无关。而 HMB-BEM 模型不仅基于历史测量数据模拟信道,而且通过自相关矩阵生成基函数,充分利用了高速铁路场景中的信道在时域上的相关性,构造基函数的方法比较灵活。这也是 HMB-BEM 模型在高速铁路场景中能够保证其信道估计性能优势的原因。

#### 5 结束语

本文针对高速铁路场景,研究了快时变信道的估计方法。通过挖掘出列车在不同时刻经过同一地点的信道之间的相关性,提出了基于历史测量数据的新型基扩展模型。相比于现有基扩展模型,新型基扩展模型极大地改善了信道估计的性能。利用 Jakes 模型和历史测量数据的仿真分析均验证了新型基扩展模型信道估计性能的优势,从而说明了新型基扩展模型能够较好地应用到高速铁路场景中。

#### 参考文献:

- [1] AI B, CHENG X, KRNER T, et al. Challenges Toward Wireless Communications for High-speed Railway [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2014,15(5):2143-2158.
- [2] GIANNAKIS G B, TEPEDELENLIOGLU C. Basis Expansion Models and Diversity Techniques for Blind Identification and Equalization of Time-varying Channels [J]. Proceedings of the IEEE,1998,86(10):1969-1986.
- [3] GASTON A, CHRISS W, WALKER E. A Multipath Fading Simulator for Radio[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1973,22(4):241-244.
- [4] 李昕.基于基扩展快时变信道模型的 OFDM 系统信道估计[D].成都:西南交通大学,2013.
- [5] CHOO W R C, RONG Y, XIANG Y. Channel Estimation for Time-varying MIMO Relay Systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2015,14(12):1-11.
- [6] YANG L, REN G, YANG B, et al. Fast Time-varying Channel Estimation Technique for LTE Uplink in HST Environment[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2012,61(9):4009-4019.
- [7] BORAH D K, HART B D. Frequency-selective Fading Channel Estimation with a Polynomial Time-varying Channel Model[J]. IEEE Transactions on Communications,1999,47(6):862-873.

- [8] ZEMEN T, MECKLENBRAUKER C F. Time-variant Channel Estimation Using Discrete Prolate Spheroidal Sequences [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(9): 3597-3607.
- [9] JAKES W C. Microwave Mobile Communications [M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1974.
- [10] CHEN S, DAI G, RAO W. A BEM for Estimation of Time-varying Channels in OFDM [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Communications and Mobile Computing. New York: IEEE, 2009: 256-259.
- [11] TEO K D, OHNO S. Optimal MMSE Finite Parameter Model for Doubly-selective Channels [C]. IEEE Global Telecommunication Conference. New York: IEEE, 2005: 3503-3507.
- [12] LIU Y, JIANG W, REN S, et al. Least Square Estimation of Doubly Selective Wireless Fading Channels [J]. Journal of Electronic & Information Technology, 2008, 9: 2185-2188.
- [13] HE R, ZHONG Z D, AI B, et al. Measurements and Analysis of Propagation Channels in High-speed Railway Viaducts [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 794-805.
- [14] HE R, ZHONG Z D, AI B, et al. Short-term Fading Behavior in High-speed Railway Cutting Scenario: Measurements, Analysis and Statistical Models [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(4): 2209-2222.

(责任编辑 江 峰)

## 2017 中国—阿拉伯国家博览会高铁分会在银川开幕

2017 年 9 月 6 日,由中国铁路总公司、宁夏回族自治区人民政府主办,中国铁道科学研究院、宁夏回族自治区发展和改革委员会承办的 2017 中国—阿拉伯国家博览会高铁分会在银川国际交流中心开幕。来自阿拉伯联盟、阿富汗、约旦、印度尼西亚、摩洛哥、埃及、苏丹等国家,国内相关政府机构、协(学)会、高校和企业代表共 300 余人参加了开幕式。

中国铁路总公司副总经理刘振芳在开幕式上致辞并发表主旨演讲,全面介绍了中国高铁发展成就和中国铁路国际交流与合作情况。开幕式后,中国铁路总公司举办了高铁分会主题演讲、圆桌会议等交流活动。中国铁路总公司、宁夏回族自治区、印尼经济统筹部、苏丹投资部相关负责人围绕“中阿铁路合作与发展:意义与作用”进行主题演讲;约旦交通部、摩洛哥国家铁路局、埃及国家铁路局相关负责人,中国中铁股份有限公司、中国铁路通信信号集团公司、中国铁建股份有限公司、中国交通建设股份有限公司、中国中车股份有限公司、中国电力建设集团有限公司等中方联合体企业,就“中阿铁路合作与发展:路径与模式”开展专题研讨。作为高铁分会的重要组成部分,为期 3 天的中国高铁技术成就专题展与 2017 中国—阿拉伯国家博览会同期举行,专题展设中国铁路成就及铁路国际合作展区,展览面积 1 000 余平方米。中方联合体企业将全面展示近年来中国铁路特别是高速铁路在工程建设、装备制造、运营管理等方面最新创新成果、中国铁路国际交流与合作成果,助力中国与阿拉伯和其他地区国家在轨道交通领域合作共赢。