

高速铁路环境下的 MIMO 信道建模及仿真

李校林^{1,2}, 高飞²

(1. 重庆信科设计有限公司, 重庆 400065;

2. 重庆邮电大学 通信新技术应用研究所, 重庆 400065)

摘要: 根据高速铁路环境下电波传播特性, 基于多入多出(MIMO)无线散射信道模型, 提出一种高速铁路无线环境下的 MIMO 无线信道模型, 详细分析了其构建过程, 并通过仿真得出 MIMO 信道的空域相关性随天线单元间距的增大而减小, 拓展了 MIMO 信道衰落模型的研究。

关键词: 高速铁路环境; MIMO 信道; 空域相关性

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

MIMO channel modeling and simulation under the environment of high-speed railway

LI Xiao Lin^{1,2}, GAO Fei²

(1. Chongqing Information Technology(Group) Co., Ltd., Chongqing 400065, China;

2. New Communication-Technology Applied institute of CQUPT, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper proposes an MIMO channel model under the environment of high-speed railway, based on the radio propagation around high-speed railway and the MIMO scattering wireless channel model, then emphasizes the construction of the modeling. The simulation results show that the spatial correlation consistently decrease with the increasing antenna spacing, which extends the research field of the MIMO channel modeling.

Key words: high-speed railway; MIMO channel; spatial correlation

MIMO 多天线技术能够成倍地提高无线通信系统的容量和频谱效率, 是新一代无线通信系统的关键技术之一^[1]。目前国内外很多科研院所和商业公司都争相对 MIMO 通信技术进行深入研究, 并开发出了相应的试验系统和试商用系统, 而这些系统大多应用于静止或低速运动环境下^[2]。当前世界发达国家已步入高速铁路化时代, 我国高速铁路建设也取得显著成就, 已开通运行的高速铁路有上海磁悬浮列车、京津城际列车等, 京沪高速铁路也已开工建设。为了满足移动通信用户在高速铁路上的高速数据业务需求, 把 MIMO 技术应用于高速铁路上的移动通信逐渐成为一个值得关注的研究课题。本文分析了高速铁路无线电波传播特性, 建立了高速铁路环境下的 MIMO 信道模型, 研究了收发天线间信号的衰落特性和空域相关性, 并仿真了该模型的性能。

1 高速铁路电波传播特性

影响高速铁路无线通信系统性能的因素主要有地形条件和多普勒频移两方面。地形一方面决定了无线电波的传播方式, 另一方面决定了信号的多径径数和多径

时延。根据高速铁路无线电波传播的具体特性来建立无线信道模型时主要考虑以下几方面因素的影响: 阴影衰落、瑞利衰落、多普勒频移、多径时延, 另外还需要考虑各个因素变化快慢的关系^[3]。

综合考虑上述因素, 建立如下的铁路无线信道模型, 假设发射信号为 $s(t) = A(t)\cos(\omega_c t + \theta(t))$, 其中 $A(t)$ 为幅度, ω_c 为载频, $\theta(t)$ 为相位。接收信号模型为:

$$c(t) = A(t) \{ \cos[\omega_c \cos(\phi_0)t + \theta(t)] + \alpha(t) \left[\sum_{i=1}^N R_i(t) \cos(w_{\max} \cos(\phi_i)(t - \tau_i) + \theta(t - \tau_i)) \right] \} \quad (1)$$

式中, $\alpha(t)$ 为阴影衰落系数; $R_i(t)$ 为瑞利衰落系数; ϕ_0 为多径信号入射角, τ_i 为多径信号时延, w_{\max} 为最大多普勒频移。

2 高速铁路 MIMO 信道建模

2.1 MIMO 系统模型

基本的 MIMO 系统模型假设为: 基站(BS)有 M 根天线, 移动台(MS)有 N 根天线, 基站天线上的信号可以表示为 $s(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)]^T$, 其中, $s_m(t)$ 表示基站第 m

天线上的信号,移动台上的信号可以表示为 $y(t)=[y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T$, 其中, $y_n(t)$ 表示移动台上第 n 天线上的信号,考虑下行链路,则 MIMO 无线信道可表示为:

$$H(\tau) = \sum_{i=1}^L H_i \delta(\tau - \tau_i) \quad (2)$$

式(2)中, $H(\tau) \in C^{N \times M}$, $H_i = [h_{nm}^i]_{N \times M}$ 表示第 i 个路径的信道矩阵,其中元素 h_{nm}^i 表示基站的第 m 根天线到移动台第 n 根天线的信道增益; L 表示可分辨路径的数目。因此接收信号 $y(t)$ 与发射信号 $s(t)$ 之间的关系可表示为:

$$y(t) = \int H(\tau) s(t - \tau) d\tau.$$

2.2 高速铁路场景下的 MIMO 信道建模

高速铁路环境下的 MIMO 无线通信系统传播场景如图 1 所示。以下行链路为例:邻近接收天线阵列 R_x 的 S_r 个本地散射体构成了高速列车上移动通信用户的本地散射环境,散射体的分布半径为 D_r ;基站端 S_t 个散射体构成了发射端的本地散射环境;基站发射端散射体到接收端散射体的距离为 $R(t)$ 。 v_r 为高速列车的运行速度,与接收端天线阵列发现方向的夹角 α_r 表示列车的运动方向,即移动台的运动方向,BS 发出的信号在发射端散射体经过反射、衍射或散射后,再经接收端散射体传到移动台接收天线阵列。

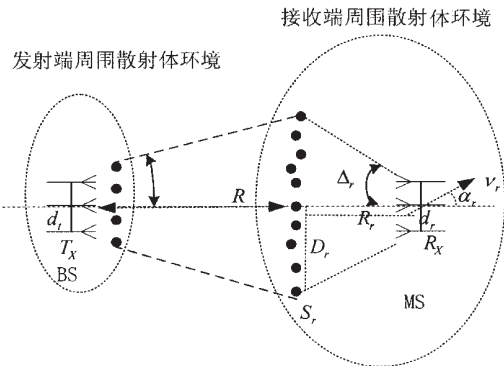


图 1 高速铁路 MIMO 系统无线传播环境

假设散射体位于多天线单元的辐射场区,可以认为散射信号以平面波形式入射到多天线单元。若只考虑接收天线的运动,接收天线收到的来自散射体的信号角度扩展由接收天线的初始位置及其运动速度决定,可表示为:

$$\Delta_r(t, v_r, \alpha_r) = \arctan\left(\frac{D_r}{R_r(t)}\right) = \arctan\left(\frac{D_r}{R_{r0} + v_r t \cos(\alpha_r)}\right) \quad (3)$$

基站天线上的信号可以表示为 $s(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_t(t), \dots, s_M(t)]^T$, 则 S_r 接收端散射体捕获这些信号并重新辐射,然后信号到达接收天线阵列。用一个 S_r 维矢量 $x_i(t)=[x_{i,1}(t), x_{i,2}(t), \dots, x_{i,S_r}(t)]^T$ 表示从天线 i 发出并被 S_r 个接收散射体捕获的信号,为简化解析式的复杂性,省去 t , 则 $x_i = K_s g_i s_i$, 式中, 散射体相关矩阵 $\Theta_s = K_s K_s^H$, g_i 是一个由 S_r 个不相关的复高斯随机变量元素构成的列矢量,表示从发射天线到 S_r 个散射体的信道系数。所有从 M 根发射天

线发出的信号矢量 $S_i(t)$ 都被 S_r 个散射体捕获并重新发射,所有被重新发射的信号组成一个 $S_r \times M$ 矩阵,用 X 表示:

$$X = K_s G_t S \quad (4)$$

式(4)中, $G_t = [g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_M]$ 是一个 $S_r \times M$ 矩阵,其元素为不相关的复高斯随机变量; S 是由发射信号为对角元素的 $M \times M$ 矩阵,满足 $S_{i,i} = S_i, i=1, 2, \dots, M$, 而 $S_{i,j} = 0, i \neq j$ 。

由发射天线元素之间的相关性,得到矩阵 X 。

$$X = K_s G_t K_T S \quad (5)$$

其中,发射相关矩阵 $\Theta_T = K_T K_T^H$ 。

接收端重新发射信号传播到接收端,接收天线接收来自发射天线 i 的 N 维信号可以表示为: $y_i = [y_{i,1}, y_{i,2}, \dots, y_{i,N}]^T, i=1, 2, \dots, M$ 。

这样就得到: $y_i = K_R G_R x_i$, 式中, $G_R = [g_1, g_2, \dots, g_N]$ 是一个 $N \times S_r$ 矩阵,其元素为不相关的复高斯随机变量;接收相关矩阵 $\Theta_R = K_R K_R^H$ 。

接收到的信号矢量 $y_i (i=1, 2, \dots, M)$ 可以组成一个 $N \times M$ 的矩阵 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_M]$, 表示为:

$$Y = K_R G_R X \quad (6)$$

把式(5)代入式(6),得到 $Y = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} K_R G_R K_s G_t K_T S$, 在式

中加入 $\frac{1}{\sqrt{\Delta}}$ 是为了归一化信道能量。由于信道输入输出关系一般都写为: $Y = HS$, 故可以得到信道矩阵^[4-6]:

$$H = \frac{1}{\sqrt{\Delta}} K_R G_R K_s G_t K_T \quad (7)$$

下面给出高速铁路场景下的 MIMO 信道的构造步骤:

(1) 确定信道场景大小、收发端散射体分布、均匀直线阵的单元间距列车的运动速度。选择 $S_r, S_t, d_r, d_t, D_r, D_t, R, v$ 等量的初值。

(2) 生成 K_R, G_R, K_s, G_t, K_T 。

$$[\Theta_R]_{m,k} = E[\exp(-j2\pi \frac{d_{mkr}}{\lambda} \sin\theta_r)]$$

$$[\Theta_s]_{m,k} = E[\exp(-j2\pi \frac{d_{mkr}}{\lambda} \sin\theta_s)]$$

$$[\Theta_T]_{m,k} = E[\exp(-j2\pi \frac{d_{mkr}}{\lambda} \sin\theta_t)]$$

$$G_R = [g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_{S_r}], G_t = [g_1, g_2, \dots, g_i, \dots, g_M]$$

其中, θ_r 表示入射信号与接收天线阵列法向量的夹角, θ_s 为发射信号与发射天线阵列法向量的夹角, θ_t 为到达接收端散射体的信号与接收端散射体(假设为线形排列的虚拟天线阵列)的法向量的夹角,它们都随着 MS 的移动时刻发生变化。

(3) 得到信道矩阵 H 。

3 高速铁路 MIMO 信道仿真

参照 3GPP TR 25.996 V7.0.0 和 IEEE 802.20-07-05 中的参数设置对该 MIMO 信道进行仿真,对于下行链路,基站端天线阵列单元数 $M=2$,接收端移动台的天线阵列单元数 $N=2$,基站的的天线单元间距 $d_t=10\lambda$,移动台

天线单元间距 $d_r=0.5\lambda$, 列车的运动速度为300 km/h, 载波频率为 2 100 Hz, 收发端散射体的个数 $S_r=S_t=6$, $D_r=D_t=100$ m, 收发端散体的初始距离 $R=1\ 000$ m。并假设接收端每个天线单元上的接收信噪比 $SNR=10$ dB。

图 2 给出了高速运动的移动终端经历了多径衰落后, Tx1 和 Rx1 天线对之间的信号 envelopes 的衰落情况。可见在高速运动时, 信号快衰落非常剧烈, 最大衰落处达到几十 dB, 这对移动终端接收机的正确接收判决影响十分严重。

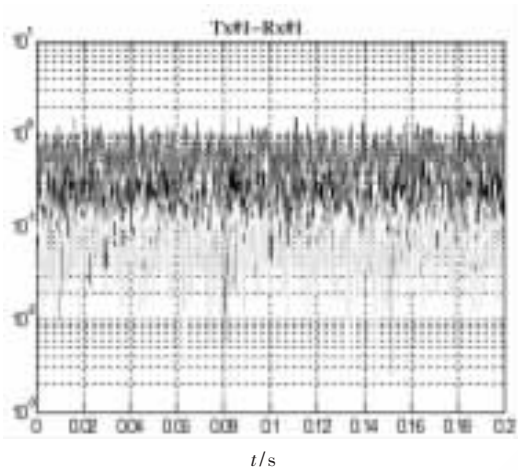


图 2 第一对收发天线之间多径信号时域的包络衰落

图 3 给出了 AOA 在 2Δ 内均匀分布以及平均方位角 $\phi_0=0^\circ$, 电压相关系数实部与角度扩展 $AS(\Delta)$ 和天线单元间距 ($d=d_r/\lambda$) 的关系。可见在相关系数的第一个零点对应的天线单元间距随着 Δ 的增大而减小, 且相关系数幅值随 d 的增大而减小。图 4 给出了 AOA 分别在均匀分布、高斯分布和拉普拉斯分布情况下电压相关系数实部与天线单元间距 d 之间的关系, 可以看出在相同的天线单元间距下, 来波角均匀分布的相关性最强, 拉普拉斯分布的相关性次之, 高斯分布的相关性最小。

以上数值结果直观地显示了均匀直线阵天线单元间距和通信环境对信号包络衰落及接收信号空域相关

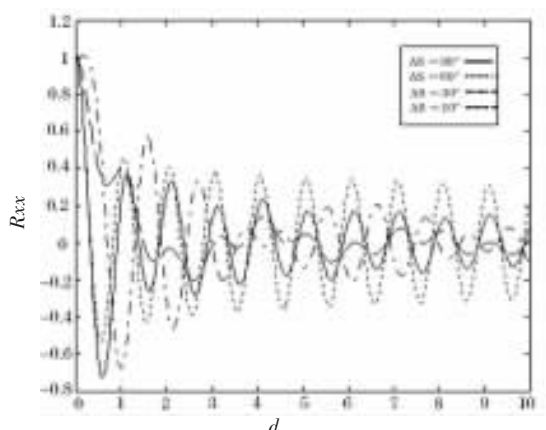


图 3 AOA 在 2Δ 内均匀分布下信号电压相关系数实部

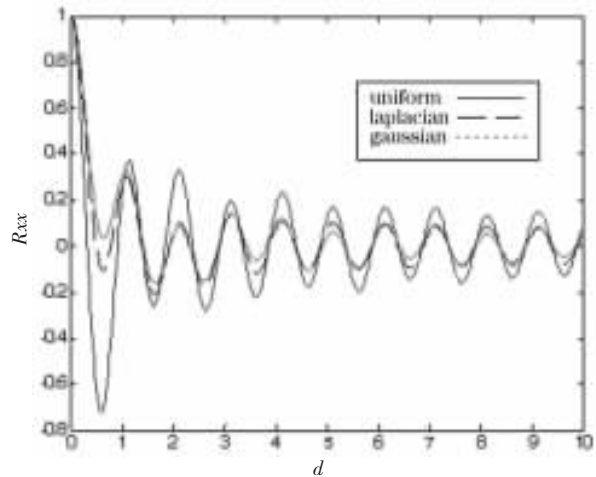


图 4 AOA 在不同分布下的信号电压相关系数实部

性的影响, 这些结论对 MIMO 系统性能分析、系统构建及 MIMO 系统多天线设计都有重要的指导作用。

近几年, MIMO 无线通信技术受到国内外众多研究机构的关注, MIMO 信道模型可以模拟各种实际信道条件、评估各种空时处理算法的性能、仿真并优化算法, 因此是 MIMO 无线通信的一个重要的研究方向。然而现有的研究大多局限于准静态或低速运动的环境下, 本文根据高速铁路场景的无线电波传播特性建立了高速铁路环境下的 MIMO 信道模型, 分析了收发天线间信号的衰落特性和空域相关性, 并通过仿真验证该模型的性能, 具有广阔的应用价值。

参考文献

- [1] 王晓婷, 郭进. MIMO 多天线系统在高速铁路应用中的仿真. 铁道通信信号, 2008, 44(5).
- [2] 李忻, 聂在平, 黄绣江. 动态 MIMO 散射无线信道模型及性能分析. 电子学报, 2005(9).
- [3] 蒋秋华, 沈海燕. 铁路无线信道模型的建立及应用. 交通运输系统工程与信息, 2005(3).
- [4] GESBERT D, BOLCSKEI H, GORE D A, et al. Outdoor MIMO wireless channels: models and performance prediction. Communications, IEEE Transactions on, 2002, 50(12): 1926-1934.
- [5] GESBERT D, BLOCSKEI H, GORE D A, et al. Performance evaluation for scattering MIMO channel models. Signals, Systems and Computers, 2000. Conference Record of the Thirty-Fourth Asilomar Conference on, 2000, 1(1): 748-752.
- [6] GESBERT D, BOLCSKEI H, GORE D A. MIMO wireless channels: capacity and performance prediction. Paulraj, A Global Telecommunications Conference, 2000. GLOBECOM apos;00. IEEE, 2000, 2(2): 1083-1088.

(收稿日期: 2008-12-31)