

# 天线选择算法在高速铁路中的应用

段俊毅

(南京铁道职业技术学院, 江苏 南京 210015)

**摘要:**文章通过对高速铁路特性的分析,介绍了一种基于 MIMO 系统无线信道相关性比较的天线选择算法。该算法与传统的选择算法相比,能够更快地选择出对信道容量贡献最大的接收端和发送端天线,并能够有效对抗列车高速运行时产生的多普勒频移等影响因素,降低高速移动条件下通信的误码率。

**关键词:**MIMO; 天线选择算法; 误码率

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1674-5787(2011)04-0157-03

## 1 引言

近几年,随着高速铁路迅速发展,我国已建成世界上综合技术最全面、集成能力最强、运营里程最长、运行速度最高的高速铁路网络。在数小时的长途旅程中,乘客所需的通信服务从传统的语音服务、电子邮件、上网浏览、多媒体业务发展到综合信息系统服务,对移动通信技术提出了新的挑战,需要列车无线通信时满足高速移动环境中的高数据传输速率。一方面,我国高铁乘客人数众多,每趟列车约 500 至 1 000 名乘客,为如此多乘客提供高质量的宽带接入需要高信道容量和高传输速率;另一方面,在列车高速运行过程中,将产生相应的多普勒频移,导致时间选择性衰落,严重影响通信质量。因此,如何为高速移动的列车提供高质量的信息服务已经成为移动通信技术研究中备受关注的热点问题。

自 20 世纪 80 年代以来,在发射端和接收端同时使用多天线阵列(Multiple Element Array, MEA)的多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 技术成为通信过程中的关键技术。研究表明:在多径衰落环境中,MIMO 系统的信道容量随天线数量的增长而线性增加。同时,它还可以改变接收信号的分布,降低深度衰落的概率,从而可以大大提高无线覆盖率,这样既可以减小系统的发射功率,又降低误码率<sup>[1]</sup>。将天线选择算法用于 MIMO 系统,是多天线无线通信技术的又一次革新和飞跃。天线选择,顾名思义,即在  $M_r \times M_t$  的天线阵列系统中,分别从接收端和发射端选择  $L_r$  根和  $L_t$  根天线,使系统在硬件资源有限的条件下实现性能最优化。通过采用天线选择算法,一方面可以在简化 MIMO 系统硬件环境基础上保持高信道容量特性;另一方面可以有针对性地消除信号在传输过程中的干扰,实现系统性能最优化<sup>[2]</sup>。本文将天线选择算法应用于高速铁路的 MIMO 系统当中,能有效解决高速环境下多普勒频移带来的时间选择性衰落问题。

## 2 高速环境下的多普勒频移

无线信道主要特征是由多径传播引起的时延扩展和由于移动台运动引起的 Doppler 频移以及由阴影效应引起的慢衰落<sup>[3]</sup>。与普通的移动通信环境相比,高速移动环境中的无线信道最突出的问题是 Doppler 频移对通信产生的影响。如:当载波  $f_c=900\text{MHz}$ ,移动速度  $v=300\text{km/h}$  时,则最大 Doppler 频移  $f_d=v/\lambda \approx 250\text{Hz}$ 。考虑上述因素,假设发射信号为:

$$s(t)=A(t)\cos(\omega_c t+\theta(t)) \quad (1)$$

在多普勒频移影响下,接受信号为:

$$r(t)=A(t)\cos((\omega_c+\omega_{\max})t+\theta(t)) \quad (2)$$

其中  $A(t)$  为幅度,  $\omega_c$  为频率,  $\theta(t)$  为相位,  $\omega_{\max}$  为最大多普勒频移。

## 3 多普勒频移对 MIMO 系统的影响

在列车高速运行过程中,根据高速环境下无线电传播的特征,“多普勒频移”在“阴影衰落、瑞利衰落、多径时延”等因素的作用下,将使无线信号产生多普勒扩展,称为多普勒效应<sup>[4]</sup>。

多普勒扩展(效应)描述了无线信道的时变性所引起的接收信号的频谱展宽程度。当发射机在无线信道上发送一个频率为  $f_0$  的单频正弦波时,由于多普勒效应,接收信号的频谱被展宽,将产生频率为  $(f_0-f_d) \sim (f_0+f_d)$  的频谱分量,其中  $f_d$  为多普勒频移,这一频谱称为多普勒频谱。接收信号的多普勒频谱上不等于 0 的频率范围定义为多普勒扩展,用  $B_d$  来表示。

假设在给定的 MIMO 系统中,OFDM 系统信道划分成若干个频分的子信道(如图 1 所示),由于子信道之间载频相互正交,所以彼此之间相关性较小。如果在该系统传输信号过程中引入“多普勒效应”,并使所传送的基带信号的多普勒扩展大于相邻子信道间的相干带宽,可以看出,基带信号的传输过程中将发生严重混叠,相干性增强,导致接收信号解调时无法复原发送波形,产生失真。

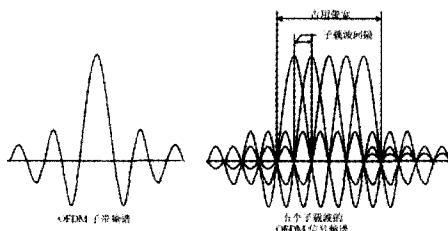


图 1 MIMO-OFDM 系统频率谱图

#### 4 MIMO 系统中的天线选择

天线选择算法在 MIMO 系统中的应用如图 2 所示, 其中  $M_t, M_r$  分别表示发射端和接收端的天线数,  $L_t, L_r$  分别表示发射端和接收端的射频链路数。输入码流通过信号处理和空时编码, 经过串并转换器将编码后的数据转换成并行的数据流。受射频链路数量限制, 多路选择开关从  $M_t$  根发射天线中选出  $L_t$  根最佳天线, 发射数据流。接收端从  $M_r$  根天线中选出  $L_r$  根最佳天线接收数据流, 进行空时译码, 还原成原始的数据流。

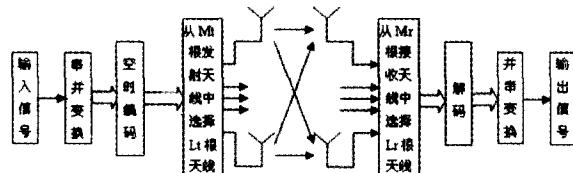


图 2 MIMO 系统天线选择模型图

在上述系统模型中, 令输入信号为  $x[k]$ , 信道噪声为  $n[k]$ , 接收信号可以表示为:

$$y[k] = Hx[k] + n[k] \quad (3)$$

其中,  $H$  表示接收端和发射端天线选择后  $L_r \times L_t$  的信道状态矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1L_t} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2L_t} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{L_r 1} & h_{L_r 2} & \dots & h_{L_r L_t} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$h_{ij}$  为从第  $j$  根发射天线到第  $i$  根接收天线的衰落系数;  $x[k]$  是  $L_t \times 1$  的向量, 表示在  $k$  时刻发射信号序列;  $n[k]$  是  $L_r \times 1$  的向量, 表示在  $k$  时刻信道高斯加性白噪声。

假设在 MIMO 系统中, 每根天线的传输功率相等, 且接收端已知信道矩阵  $H$ , 由香农公式可以得出接收端天线选择后信道容量为:

$$C(H) = \log \det \left( I_{M_r} + \frac{\rho}{M_t} H^H H \right) \quad (5)$$

$$= \log \det \left( I_{L_r} + \frac{\rho}{M_t} H H^H \right) \quad (6)$$

其中  $\rho$  为接收信噪比,  $H$  为经过天线选择后的信道状态矩阵。发射端天线选择后, 信道容量公式与(5)式和(6)式相似。通过天线选择, 目标是挑选出使系统获得最大信道容量和最小误码率的  $L_t$  根发射天线和  $L_r$  根接收天线。

#### 5 天线选择算法在高铁场景中的应用

根据上文分析可知, 在高速运行的铁路系统中, 大量用户对带宽的需求导致原有信道容量的不足, 多普勒效应的影响导致信道间相关性增强, 接收端解码误码率上升。因此, 将天线选择算法应用于高铁的 MIMO 系统中万方数据

时, 需要兼顾考虑高信道容量和低信道相关性两个关键特性。

在以往的天线选择算法中, 最佳选择算法是一种理想的、复杂度较高的算法, 它采用穷举法, 从发射端和接收端选取使信道容量最大的天线<sup>[5]</sup>。该算法计算量大, 且未考虑在高铁环境下信道间相关性较大的特点, 因此不是最适用的算法。基于相关性的天线选择算法又称为NBS 算法(norm based selection), 在该算法中主要利用信道间相关性以及信道能量两点因素决定天线是否被删除。

通过香农公式计算可知: 信道状态不确定性越大, 那么信息系统的信道容量也随之增大。由于接收端已知信道状态矩阵  $H$ , 每条天线支路的通信状况可以由此获得。那么当我们设  $Q_{ij}$  为任意  $i$  行和  $j$  行的相关系数时

$$Q_{ij} = \text{Cov}(h_i, h_j) \quad (7)$$

则可以确定: 当  $Q_{ij}$  值越大时, 则天线  $i$  和  $j$  之间的通信状况越接近、相关性越强, 继而这两条支路所含的信息量就越小; 反之, 则信道容量越大。

在具体选择过程中, 我们首先可以根据(7)式计算出任意两根天线之间的通信状态相关性, 并得到其中最小的一对天线。尽管在计算方面仍然相当复杂, 但是比较最佳选择算法还是简化不少。然后根据系统在信噪比方面的要求, 分别计算两根天线各自的信道能量, 并从中选择信道能量较大者, 删除信道能量较小者, 达到天线选择的目的。

由于这种方法计算量相对较小, 且只需要很小的单位带宽速率便能够获得很大的信道容量, 因此在理论上可以获得更大的实用价值。

#### 6 仿真及算法性能比较

为了对比文中提出的相关性天线选择算法、最佳天线选择算法以及天线随机选择在信道容量方面的差异性, 本文利用 matlab7.0 设定以下仿真环境: (1)MIMO 系统的接收端和发射端天线数量均为 4 根; (2)采用经过准静态、最大频移为 250Hz、平坦衰落且独立同分布复高斯白噪声信道; (3)信道发射与接收均不相关; (4)天线选择在接收端进行。

图 3 是在信噪比为 10dB 条件下, 运用四种算法在接收端循环选择天线 100 次后(即接收端天线数  $L_r$  从 4 减少到 1 的过程循环 100 次), 累计信道容量的对比曲线。通过比较可以看出: 采用相关性天线选择算法后的 MIMO 信道容量接近最佳天线选择算法性能, 远优于随机选择结果。

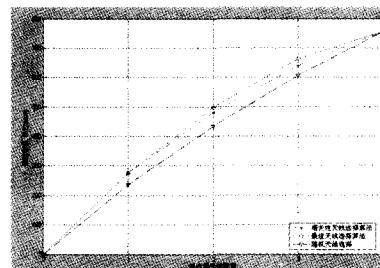


图 3 对接收端天线循环选择 100 次后累计信道容量对比曲线

从图 4 的仿真结果可以看出: 在多普勒频移最大为 250Hz, 最大时延扩展为 2ms, 符号周期为 1ms 条件下, 系统信噪比由 1dB 增长到 3dB 时, 通过对 4x4 的 MIMO 系

统发射端天线和接收端天线进行选择( $L_t=L_r=2$ ),可以看出相关性天线选择算法相对于随机天线选择不仅可以显著增加信道容量,还能够降低系统信噪比,与最优化差距仅为约千分之一,且算法复杂度远低于最佳天线选择算法,从而验证理论分析的正确性。

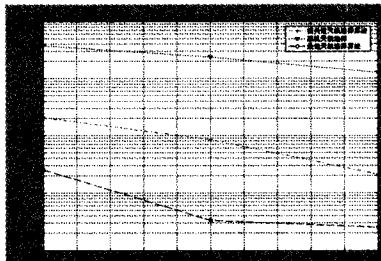


图4 三种收发联合天线选择算法在误码率方面的对比曲线

## 7 结语

本文介绍了一种基于信道相关性比较的天线选择算法。该算法从无线信道的基本特征出发,通过选择相关性较弱的无线信道,有效增加信道容量并抑制高速运行条件下多普勒频移产生的影响。仿真表明,该算法在增大信

道容量、降低信噪比方面优势明显,获得的结果非常接近全搜索方法,是一种较为实用的天线选择算法。

## 参考文献:

- [1] Andreas F. Molisch, Moe Z. Win, Yang-Seok Choi, Jack H. Winters. "Capacity of MIMO Systems With Antenna Selection" [J]. IEEE Transaction on wireless communication, 2005, 4(4): 1759-1772.
- [2] Andreas F. Molisch, Moe Z. Win. "MIMO System with Antenna Selection" [J]. IEEE Microwave Magazine, March, 2004: 46-56.
- [3] 王健康, 刘江华, 罗涛, 乐光新. "时变平衰落信道下结合 Doppler 分集的 MIMO 系统性能分析" [J]. 北京邮电大学学报, 2004, 21(5): 50-84.
- [4] 解坤, 朱刚. "高速移动通信中的多普勒分集技术" [J]. 数据通信, 2005, (5): 8-11.
- [5] Shahab Sanaye, Aria Nosratinia. "Antenna Selection in MIMO System" [J]. IEEE Communications Magazine, 2004, (8): 68-73.

责任编辑 王荣辉

## Antenna Selection in High-speed Railway

DUAN Junyi

(Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing Jiangsu 210015, China)

**Abstract:** This paper analyses the feature of the high-speed railway, and proposes an antenna selection algorithm which is based in comparing the channel correlation and used in MIMO system. Compared with conventional antenna selection algorithm, this algorithm can decrease the interference of Doppler drift and the Bit Error Rate reduction(BER) in the receiver.

**Key words:** MIMO; antenna selection; BER

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>