

文章编号: 1005-8451 (2011) 11-0049-04

## MIMO 在高速铁路 GSM-R 车地通信系统中应用的研究

李高科<sup>1</sup>, 封志宏<sup>1</sup>, 吴 卉<sup>2</sup>

(1 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070;

2 中国铁道科学研究院 电子计算技术研究所, 北京 100081)

**摘 要:** GSM-R(GSM for Railways)系统作为一种新的铁路无线通信网络, 应用于 CTCS-3 级列车控制系统, 以满足高速铁路可靠的信号传输需求。但从实际的运行效果来看, 对于车地无线传输质量的影响主要来自于多径效应, 为此, 本文在分析 MIMO(Multiple-Input-multiple-output, 多输入多输出)的基础上, 证实了将 MIMO 技术引入 GSM-R 系统能使通信质量得到改善, 非常适合高速铁路移动通信的特点。

**关键词:** 高速铁路; 多输入多输出; 车地通信系统

**中图分类号:** U285.21 : TP39 **文献标识码:** A

### Application research on MIMO technology in Train-ground Communication System of GSM-R for high speed railway

LI Gao-ke<sup>1</sup>, FENG Zhi-hong<sup>1</sup>, WU Hui<sup>2</sup>

(1.School of Electronics and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2.Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China )

**Abstract:** With the rapid construction of high speed railway and dedicated passenger railway lines, GSM-R System, as a new railway wireless communication network, was used in the CTCS level 3 Train Operating Control System to fulfill the high speed railway reliability requirements of signal transforming. According to the test result of several lines, which for the most part seriously affected the communication quality was the multi-path effect. To deal with these problems, Based on the analysis of MIMO technology, it was certified by this dissertation that, using MIMO technology in the GSM-R System could improve the communication quality and fit the characteristic of high speed railway communication.

**Key words:** high speed railway; MIMO; Train-ground Communication System

GSM-R系统是专门为铁路通信设计的综合专用数字移动通信系统。可为列车自动控制与检测信息提供数据传输通道, 它在 GSMPhase2+ 规范协议的高级语音呼叫功能, 如组呼、广播呼叫、多优先级抢占和强拆业务的基础上, 加入了基于位置寻址和功能寻址等功能, 适用于铁路通信特别是铁路专用调度通信的需要。不但可以提供无线列调、编组调车通信、应急通信和区段养护维修作业通信等语言通信功能, 而且可以传输列车诊断数据, 提供货运信息、车载旅客信息和其他增值服务, GSM-R 的业务应用如图 1。

### 1 GSM-R 技术

#### 1.1 GSM-R 技术基本原理

GSM-R 系统包括网络子系统 (NSS)、基站子

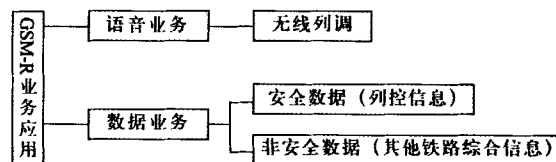


图 1 GSM-R 的业务应用

系统 (BSS)、运行和业务支撑子系统 (OSS/BSS) 和终端设备等 4 个部分。其中, 网络子系统包括移动交换子系统 (SSS)、移动智能网 (IN) 子系统和通用分组无线业务 (GPRS) 子系统。GSM-R 传输系统指的是为 GSM-R 系统各子系统之间的连接提供通道的数字传输系统, 包括 GSM-R 系统为提供基本服务所必需的传输配套单元, 如传输光、电缆和传输设备。利用 GSM-R 的数据业务, 每台机车都与地面中心维持一条实时双向数据传输通道, 所有与调度相关的应用数据 (车地双向) 都可以通过这条通道进行传输, 彻底解决铁路信息化建设中车地之间信息传输的瓶颈, GSM-R 的系统框图

收稿日期: 2010-11-19

作者简介: 李高科, 在读硕士研究生; 封志宏, 教授。

如图2。

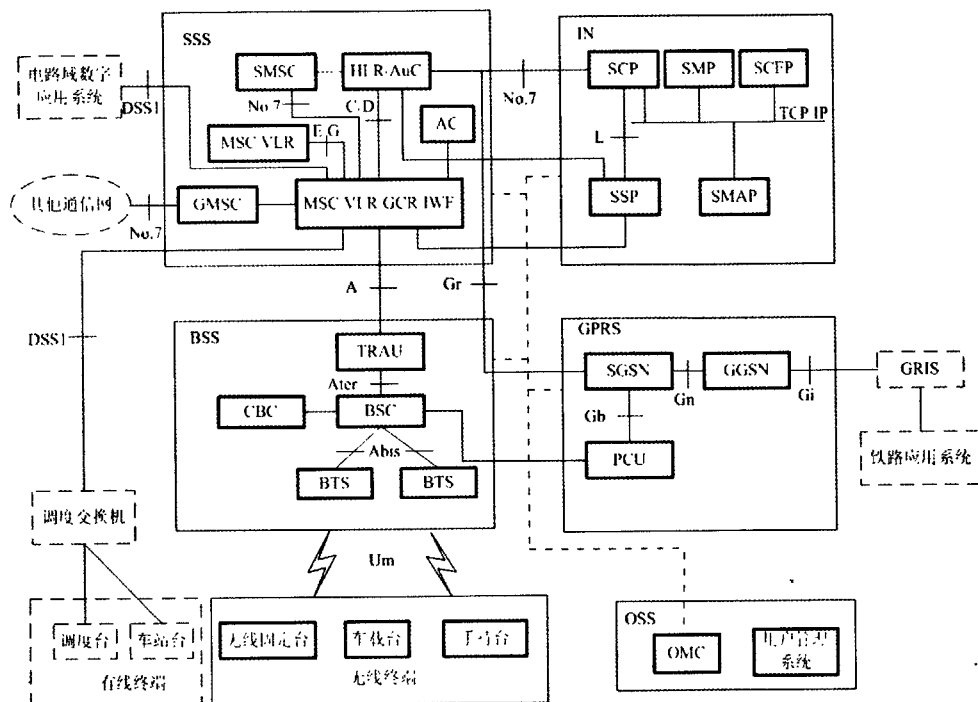


图2 GSM-R的系统框图

## 1.2 GSM-R 技术应用中存在的问题

在我国已开通GSM-R系统的高速铁路均出现越区切换阻塞率较高、小尺度衰落严重的问题。主要是由于铁路沿线复杂的地理环境导致车地间时间、空间上相互区别的无线电波，造成多径传播，从而引起信号强度的波动和码间干扰的产生。同时，高速列车的移动速度使得多普勒频移加大，衰落现象加重。由于多径时延扩展引起的时延色散和多普勒扩展带来的频率色散，严重降低了接收信号质量。

## 2 MIMO 技术基本概述

MIMO(Multiple- Input-multiple-output)是多输入多输出的简称，MIMO技术的好处是能够在不增加信道带宽的情况下，大幅度提高通信系统的信道容量，并能在很大程度上提高系统的频谱利用率。

### 2.1 MIMO 技术基本原理

如图3，在MIMO系统中，传输信息流 $s(k)$ 要经过空时编码方式形成 $N$ 个信息子流 $c_i(k)$ ， $i=1, \dots, N$ 。这 $N$ 个信息流再由 $N$ 个天线分别

发射出去，经空间信道传输后由 $M$ 个接收天线进行接收。多天线接收机要利用先进的空时编码处理分别对这些接收到的数据子流信号进行解码，以此方式来实现最佳接受与处理。

这 $N$ 个子流信息能同时发送到信道，并且各发射信号都占用的是同一个频带，因而MIMO技术并没有增加信道的带宽。若各发射接收天线间通道彼此独立，则多入多出系统可以创造多个并行空间信道。通过这些并行空间信道独立的传输信息，数据率必然能够得到很大程度的提高。MIMO将多径无

线信道与发射、接收作为一个整体来优化实施，从而可以实现高通信容量和频谱利用率，这是一种近于最优的空域时域联合的分集和干扰对消处理。

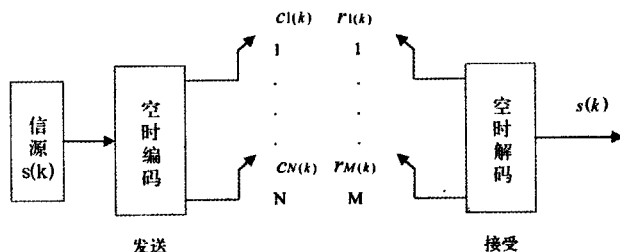


图3 MIMO 系统框图

### 2.2 MIMO 系统容量

对于发射天线数目为 $N$ ，接收天线数目为 $M$ 的MIMO系统而言，假定信道为独立的瑞利衰落信道，并 $N \gg 0$ 、 $M \gg 0$ ，根据香农公式则信道容量 $C$ 近似为：

$$C = [\min(M, N)] B \log_2(\rho/2)$$

式中 $B$ ：信道带宽； $\rho$ ：接收端平均噪声比； $\min(M, N)$ ： $M$ 、 $N$ 为2者中的小者。

通过上式我们可以看出：在信号功率和信道带宽固定的时候，MIMO系统的最大容量或者容量上限都会随着最小天线数的增加而线性增加。

### 3 MIMO 技术应用于 GSM-R 系统

#### 3.1 国际铁路联盟的演进思路

LTE (Long Term Evolution) 项目被视作从 3G 向 4G 演进的主流技术。它改进并增强了 3G 的空中接入技术, 采用 OFDM 和 MIMO 作为其无线网络演进的标准。3GPP 的 LTE 项目在铁路通信上的主要优越性能包括: 在 20 MHz 频谱带宽能够提供下行 100 Mbps、上行 50 Mbps 的峰值速率; 改善小区边缘用户的性能; 提高小区容量; 降低系统延迟, 用户平面内部单向传输时延低于 5 ms, 支持 100 km 半径的小区覆盖; 能够为 350 km/h 高速移动用户提供 >100 kbps 的接入服务; 支持成对或非成对频谱, 并可灵活配置 1.25 MHz 到 20 MHz 多种带宽<sup>[1]</sup>。

由于 3G 系统在支持 IP 数据业务时频谱效率低, 其面向连接固定带宽的结构不适应突发式 IP 数据业务的需求。为此, 3GPP/3GPP2 都认识到 3G 的局限性, 鉴于 3G 技术使用的频点太高, 不满足铁路部门希望经济、实惠地实现网络在广泛地域内的覆盖目标等因素, 国际铁路联盟 (UIC) 明确表示 3G 技术不适用于铁路。因此, 未来 GSM-R 不会过渡到 3G, 而是直接过渡到 LTE-R 技术。

作为 LTE 的 3 大技术之一的 MIMO 多天线技术, MIMO 技术通过多天线提供不同的传输能力, 提供空间复用的增益, 提供覆盖和干扰协调能力。因此, MIMO 在 LTE 以及 LTE-R 的后续演进系统中是非常重要的技术。

#### 3.2 MIMO 技术对车地通信质量的改善

MIMO 系统通过对时间和空间都进行编码的空时编码技术分别提供了分集增益、编码增益和阵列增益, 从而较大的降低了由于多径效应带来的误码率; 不需要增加带宽便翻倍地提高了车地无线通信系统的容量和频谱利用率, 将多径的不利因素转化利用。

##### 3.2.1 MIMO 技术的空间分集

多径效应对车地高速铁路无线通信有严重的干扰, 为了保证车地无线信道的可靠传输, 提出了很多技术, 用于补偿信道衰落损耗的分集技术就是有效方法之一, 分集技术利用多条路径传输相同信息, 各条路径具有基本相等的信号强度和相互独立的衰落特性, 使得接收机的判断准确性提

高, 主要有时间分集、频率分集、空间分集 3 种分集方式。

其中空间分集没有时延和环境限制, 能够获得更好的系统性能, 空间分集技术分为接收分集和发射分集。在接收分集中, 接收机对它受到的多个衰落特性相互独立但携带同一信息的信号进行特定的处理, 以降低信号电平的起伏, 发射分集技术使得各个发射天线到达接收机端的信号是相互独立的, 接收机区别来自不同天线的信号将他们合并在一起, 从而获得分集增益。

以 M 条独立同分布的 Rayleigh 平坦衰落信道推导出的接受端系统平均误符号率的表达式公式:

$$P_e \approx \frac{1}{N_e} \left( \sum_{i=1}^M |h_i|^2 \right) \frac{\rho d_{\min}^2}{4M}$$

当信道  $h_i$  是方差为 1 的独立加性高斯白噪声随机变量, 且在高 SNR ( $\rho \gg 1$ ) 范围内从上式可以得到系统平均误符号率的上限

$$\bar{P}_e \leq \bar{N}_e \left( \frac{\rho d_{\min}^2}{4M} \right)^{-M}$$

从上式可以看出, 当信道数 M 的递增, 平均误符号率的上限减小。

此外 MIMO 采用接收分集信道可以获得阵列增益, 即 MIMO 系统的 SNR 较传统天线系统得到了改善。接收分集不仅能够提供满分集度而且还能够提供阵列天线增益。

图 4 为引入 MIMO 技术的 GSM-R 的 BTS 结构和功能模块。

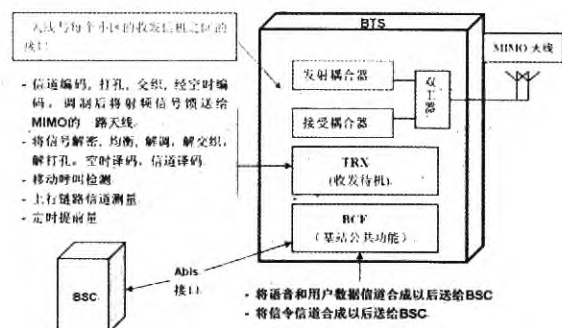


图 4 加入 MIMO 的 BTS 结构和功能

车地译码接收: 在接收端使用多天线 Rake 接收机进行相关和分离的分集处理后, 经过空时译码器进行解码, 然后解交织、去打孔、速率调整、通过信道译码器进行卷积码解码, 最后恢复出原

始数据流。如为分层空时码可以由线性判决反馈均衡器实现分层的反馈干扰抵消,如图5。

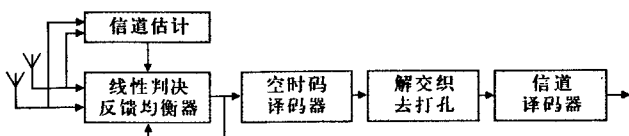


图5 车地译码接收模型

车地2端编码发送:在发射端基带信号经过普通的并行信道编码、速率调整、和交织后,对其进行时空编码,经调制、扩频、形成时隙后用多个天线发送,如图6。

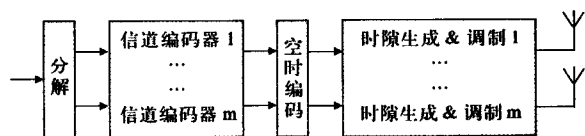


图6 车地译码发送模型

### 3.2.2 空时编码

MIMO 技术通过多天线发射多数据流并由多天线接受实现了系统最佳处理,这种最佳处理是通过空时编解码在时间和空间上的2维编码来实现的,其中时域编码可以实现编码增益,空间域编码可以得到分集增益。

基于发射分集的空时码主要有2种:空时分组码(STBC, Space Time Block Code)和空时格码(STTC, Space Time Trellis Code),由于空时格码的译码过程也较为复杂,这里主要应用S. M. Alamouti 发现的正交发射分集技术来说明,此分集技术实际上采用了空时域正交分组编码。

GSM-R的信息传输为双向,以车载台或者基站天线分别采用2根发射天线和1根接收天线的正交发射分集方案是用2个符号周期发射2个符号,第1个符号周期天线1和天线2分别输出 $s_1$ 和 $s_2$ ;第2个符号周期天线1和天线2分别输出 $-s_2^*$ 和 $s_1^*$ 。因此空时码字矩阵可以表示为

$$S = \begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2^* & s_1^* \end{pmatrix}$$

MIMO 采用正交发射分集2个发射天线的STBC编码具有2阶的分集增益,达到了满分集度(满分集度等于收发天线数之积),这种正交发射分集不需要知道信道参数,降低了车地无线通信

系统的复杂度。

## 4 引入MIMO技术的GSM-R系统优点

与传统的GSM-R车地通信系统相比,显然引入MIMO技术的车地无线通信系统减小了多径效应引起的小尺度衰落,而且将多径效应带来的不利因素转化成分集增益,从而改善了由于列车高速移动和沿线多变的地理因素对车地无线通信质量的影响。

(1) MIMO 技术充分的利用多径效应传播的特点将危害有效利用,进一步开发空域资源,能满足列车运行控制所需信息吞吐量和实时性要求提高无线传输性能,从而提高了高速移动的车地通信质量。

(2) 将MIMO引入GSM-R车地通信系统不会牺牲任何功率和频谱资源,如果在传统的SISO系统中实现这些目标,就必须不断的提高发射功率,增加交织和纠错编码的深度与冗余度以及提高扩频增益,如此就增加了信道带宽。

(3) 确保GSM-R的生命周期随电信技术的不断发展而获得延长,既提高了性能又节省了运营成本。

## 5 结束语

MIMO 技术充分的利用了多径效应来传播有用信号,有效的提高了高速移动和复杂多变的地理因素下高速铁路车地无线通信的可靠性,作为LTE的关键技术之一,MIMO技术在我国铁路无线通信网络建设中具有一定的可行性,最终将推动LTE-R成为高速铁路无线通信发展的趋势。

### 参考文献:

- [1] 曾召华. LTE 基础原理与关键技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [2] 杨 维, 陈俊士, 等. 移动通信中的阵列天线技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [3] Vahid Tarokh, Hamid Jafarkhani, A R Calderbank. Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1999, 45(5).

责任编辑 方 圆