

# 基于干扰对齐的高铁无线宽带接入方案\*

安永丽<sup>1,2</sup>, 肖扬<sup>1</sup>, 王东<sup>1</sup>, 纪占林<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学信息科学研究所, 北京 100044; 2. 河北联合大学信息工程学院, 河北唐山 063009)

**摘要:** 依据高速铁路信号传输的特点,提出了基于干扰对齐的高铁无线宽带接入系统。该系统车载两套双天线设备,可以同时支持两个双天线用户无线接入,而接收端可以分离有用信号与干扰信号,实现无干扰接收。在车载设备与高铁沿线基站的通信中,提出基于传输时延的干扰对齐算法及与之相适应的网络覆盖方案。该算法按照时间传输奇偶顺序将来自不同发送端的信号分离。仿真结果表明,基于干扰对齐的车内接入子系统信号传输时可以达到四个和自由度,系统误码率优于未采用干扰对齐的系统,且下行误码率的性能略优于上行;基于传输时延的干扰对齐车地回传子系统可以同时支持两套车载设备接入网络且解码复杂度低,其覆盖方案可解决高铁越区切换易失败的问题。

**关键词:** 宽带接入; 干扰对齐; 高速铁路; 误码率

中图分类号: U285.21

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)05-1543-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.063

## Wireless broadband accessing scheme in high-speed railway based on interference alignment

AN Yong-li<sup>1,2</sup>, XIAO Yang<sup>1</sup>, WANG Dong<sup>1</sup>, JI Zhan-lin<sup>2</sup>

(1. Institute of Information Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. College of Information Engineering, Hebei United University, Tangshan Hebei 063009, China)

**Abstract:** According to the characteristics of high-speed railway, this paper proposed a wireless broadband access system based on interference alignment. This system contained two sets of dual-antenna train access units. It could support two dual-antenna users access to the inside access system simultaneously. The receiver could separate expected signal from interference signal. It also proposed an improved interference alignment algorithm based on transmitting delay and its corresponding network coverage scheme. This algorithm could separate expected signal from interference signal according to different transmitting delay. Simulation results show that the inside access system can obtain totally four degrees of freedom and its performance of bit error rate is better than the system which does not adopt this interference alignment technology. Moreover, its performance of downlink bit error rate is slightly better than the uplink's. In the backhaul system, two sets of train access units can access to the network simultaneously. Its decoding complexity is more lower and its coverage scheme can solve the problem of handoff failure.

**Key words:** broadband accessing; interference alignment; high-speed railway; BER

## 0 引言

目前我国高速铁路飞速发展,大规模的高速铁路建设及建成运营,给人们的日常生活、工作带来了极大的便利。而乘客对高铁的无线通信业务的需求也越来越高。这不仅表现在能够进行稳定的语音通信业务,还包括高速率的无线数据业务传输以满足商务办公或休闲娱乐的要求。铁路无线通信系统具有高速移动,带状网络覆盖等不同于公共无线通信系统的特点。这使得高速铁路无线通信存在诸多难题:车体穿透损耗大;高速引起频繁的越区切换;重叠区域难以满足切换和重选的需求导致掉话;高速带来的多普勒效应难以克服等<sup>[1]</sup>。普通公共网络覆盖主要是针对中低速移动的场景进行网络设计,

并没有特别针对高速移动的场景。如果采用敷设专用网的方式,运营商需要重新建立高铁沿线的网络覆盖,这将导致高成本及资源的浪费。同时,采用敷设专网的方式对于 GSM-R 列控无线网络系统来说也是不允许的。这是因为在列控无线网络周围大规模地部署 3G 移动网络会对列车无线控制系统带来安全性的威胁<sup>[2,3]</sup>。

目前的状况是我国的高速铁路建设发展迅速,已成为世界上高速铁路领域中技术领先的国家。同时,移动通信技术也经历了从 2G 到 3G,乃至到未来 4G 的迅速发展。两项技术分别在各自的领域里飞速发展,均取得了大量的研究成果。但是高速铁路与先进的移动通信技术相结合的研究还很少。大部分研究是基于现有的 GSM-R 无线列控系统的网络覆盖、网络优

收稿日期: 2013-06-17; 修回日期: 2013-08-06 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61106022);北京市自然科学基金资助项目(4102050);河北省自然科学基金资助项目(F2014209276);河北省高等学校科学研究基金资助项目(Q2012029)

作者简介: 安永丽(1979-),女,河北唐山人,讲师,博士研究生,主要研究方向为认知无线网络、MIMO 技术(10112059@bjtu.edu.cn);肖扬(1955-),男,教授,博导,主要研究方向为 MIMO 无线通信系统、多维空时信号处理;王东(1981-),男,讲师,博士(后),主要研究方向为可重构处理器;纪占林(1974-),男,副教授,博士(后),主要研究方向为云计算、认知无线网络。

化等。高速铁路的 3G 网络覆盖及方案设计逐渐成为了当前的研究热点。文献[2]阐述了高速铁路公众宽带通信接入体制及关键技术,探讨了认知网络、压缩感知、OFDM、MIMO 及 RoF 等技术在高速铁路公众宽带通信接入网络上应用的可行性。文献[3]给出了高速铁路 3G 网络的覆盖方案与优化。高速铁路 LTE 车载基站方案的提出,成为在高速铁路上研究 4G 实现技术的开端。文献[4]提出基于干扰对齐技术的 LTE 上行虚拟 MIMO 系统,简化了虚拟 MIMO 用户配对选择策略的算法复杂度,同时使更多的用户可以同步接入上行系统。但文献[4]只是针对公众网络的 LTE 系统给出了适用的干扰对齐算法,并没有考虑该干扰对齐技术在高速铁路系统宽带接入中可能存在的问题。本文正是针对高速铁路的特点,提出基于干扰对齐技术的 HRC (high-speed railway communication) 解决方案。

### 1 干扰对齐技术

干扰对齐是一种能够使多个用户同时接入无线网络、可以解决多个用户同时收发信号而避免相互干扰的新技术。干扰对齐的概念最早由 Jafar 于 2007 年提出,因其能够保证多用户接入并提高网络的吞吐量,最近得到了国内外学者的关注并开展了广泛研究。干扰对齐的基本思想是将信号空间分成期望信号子空间和干扰信号子空间,通过不同的对齐方式,使干扰信号在接收机处不会占用整个可用的信号空间,而是联合到维数较小的子空间内,这样有用信号就可以避免落入干扰子空间,那么接收机就可以容易地恢复其期望信号。文献[5~7]提出了空间线性干扰对齐,通过在发射机和接收机上的多根天线所形成的信号空间内进行空间波束赋形,以达到每个接收机的信号空间分为独立的信号子空间和干扰子空间的目的。文献[8]提出基于信号传输延迟的时间域干扰对齐。下文将结合高速铁路无线通信系统信号传输的特点,提出改进的干扰对齐算法及其在 HRC 子系统中的应用。

### 2 高铁宽带接入系统

针对高铁覆盖的特点,端到端的 HRC 解决方案主要由 IAS (inside access system)、BHS (backhaul system)、ONS (outside network system) 三个子系统构成,各个系统分别实现如下的功能:

- a) IAS 车内接入系统。它主要由车厢内综合接入系统组成,该系统可以整合多种制式的基站,包括视频监控、电视转播、WiFi 及宽带接入,并能够支持 GSM/EDGE/TD-SCDMA/LTE/WCDMA 等多种无线接入方式。
- b) BHS 回传系统。它主要由 HRC 车载台 TAU (train access unit) 和 HRC 基站及 SAE (system architecture evolution) 构成,完成车地之间的无线高速宽带回传。
- c) ONS 外网处理系统。它包括各接入制式的基站控制器、计费、网关以及铁路地面客服系统。

### 3 BHS 系统传输时延干扰对齐接入

#### 3.1 3G 高铁网络覆盖方案

本文主要研究车地回传子系统中车载设备与 HRC 基站之

间的通信。传统的铁路沿线覆盖方案采用带状网,每个基站覆盖一定的距离,两个基站之间预留出重叠区域,以保证列车高速行驶中完成越区切换。时速 350 km/h 的移动速度下,至少要求 97 m 的重叠覆盖距离。这种网络覆盖示意图如图 1 所示。

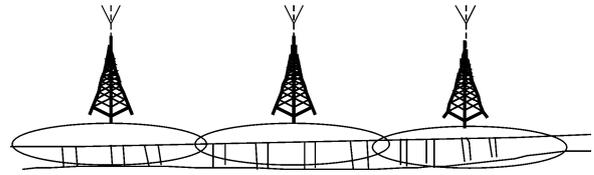


图 1 单天线小区中心沿线覆盖方案

本文提出 BHS 子系统时域干扰对齐接入方案,该方案中每组列车顶端配备两套车载设备,每套设备配有两根天线,因此图 1 中的覆盖方案不再适用,进而提出一种新的网络覆盖方案,如图 2 所示。

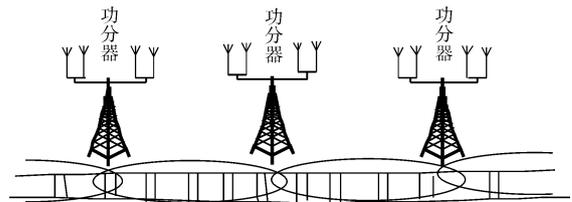


图 2 双天线小区边缘沿线覆盖方案

该方案中每一个基站有两根发射天线,通过功分器分开向两个方向发送,发射功率仅比不采用功分器损失约 3 dB。同时,一个小区由相邻的两个基站共同覆盖。这样,每个小区就由分别来自两个基站的四根天线即每个小区共由四根天线共同覆盖。这种覆盖方案保证了实现所提出的基于传输时延的干扰对齐算法应用于 BHS 子系统。

#### 3.2 基于传输时延干扰对齐的车地回传系统设计

本文将网络覆盖方案图简化成由两套车载设备(每套设备配备两根天线)及相邻的共同覆盖同一个小区的两个基站(每个基站由功分器分开向两个方向发射,每个方向均有两根天线,即每个小区由来自两个基站的共四根天线共同覆盖)组成,如图 3 所示。

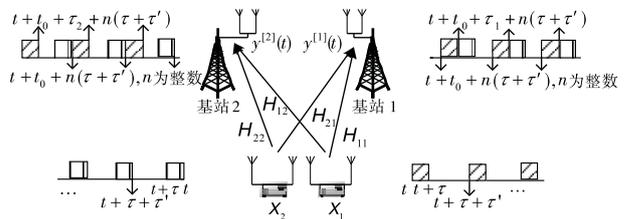


图 3 基于传输时延的干扰对齐

首先考虑车载设备的上行发送系统。假设两个车载设备分别发送数据包向量  $X_1$  和  $X_2$ ,由于铁道线路多架设在空旷地,远离市区,因此传输路径中的障碍物较少,可以近似认为信号传输时间差受信道传播环境影响较小而与信号传输距离有关。因两个车载设备间隔一定的距离  $d_0$ ,必然导致每一个基站收到的来自两套车载设备的信号存在一定的传输时间差。设两基站收到的来自两套车载设备的发送信号传输时间差分别为  $\tau_1$  和  $\tau_2$ 。令发送端发射每一个数据包的长度为  $\tau$  ( $\tau = \min \{ \tau_1, \tau_2 \}$ ),同时,每间隔时间  $\tau + \tau'$  发送一次 ( $\tau' = \max \{ \tau_1, \tau_2 \}$ ),则在接收基站  $y^{[k]}$  处,  $k \in \{ 1, 2 \}$ ,信道输出可分别表示为

$$y^{[1]}(t) = H_{11} X_1(t + t_0 + n(\tau + \tau')) + H_{21} X_2(t + t_0 + \tau_1 + n(\tau + \tau')) \quad n \text{ 为整数} \quad (1)$$

$$y^{[2]}(t) = H_{12}X_1(t+t_0+\tau_2+n(\tau+\tau')) + H_{22}X_2(t+t_0+n(\tau+\tau')) \quad n \text{ 为整数} \quad (2)$$

其中:在时刻  $t$  发送端  $j \in \{1, 2\}$  发送  $X_j(t)$ , 分别经过信道传输时延  $t_0$  及  $t_0 + \tau_j$  到达接收基站  $j$ ;  $H_{11}$ 、 $H_{21}$ 、 $H_{12}$ 、 $H_{22}$  分别代表两个车载设备与两个接收基站之间的信道传输衰落系数矩阵。本文以基站 1 为例分析信号的传播时延及接收解码过程。

考虑在基站 1 处会发生什么情况,如图 3 所示为  $\tau_1 < \tau_2$  情况下的信号传输示意图。基站 1 期望接收的信号为来自第一个车载设备的发送信号  $X_1$ 。基站 1 的接收信号  $y^{[1]}(t)$  中包含分别来自两个车载设备的发送信号  $X_1$  及  $X_2$ 。而车载设备 1 发送的信号  $X_1$  将会在  $t+t_0+n(\tau+\tau')$  ( $n$  为整数) 的时刻接收且没有叠加来自其他发射机所发送信号的干扰,即期望信号  $X_1$  在该时刻被无干扰地接收。同时,不需要的干扰信号  $X_2$  将会在  $t+t_0+\tau_1+n(\tau+\tau')$  ( $n$  为整数) 时刻接收。这样,基站 1 处的接收信号可分离成相差时刻  $\tau_1$  而先后到达的期望信号  $X_1$  和干扰信号  $X_2$ 。从基站 1 可以定义被分离的接收信号分别为

$$y^{[1]}(t_e) = H_{11}X_1(t+t_0+n(\tau+\tau')) \quad n \text{ 为整数} \quad (3)$$

$$y^{[1]}(t_o) = H_{21}X_2(t+t_0+\tau_1+n(\tau+\tau')) \quad n \text{ 为整数} \quad (4)$$

其中:符号  $y^{[1]}(t_e)$  和符号  $y^{[1]}(t_o)$  分别代表接收基站 1 按照奇偶时序接收时接收到的信号。同理,基站 2 处接收到的信号也可以按奇偶时序接收,从而将接收信号分离开,并定义为

$$y^{[2]}(t_e) = H_{22}X_2(t+t_0+n(\tau+\tau')) \quad n \text{ 为整数} \quad (5)$$

$$y^{[2]}(t_o) = H_{12}X_1(t+t_0+\tau_2+n(\tau+\tau')) \quad n \text{ 为整数} \quad (6)$$

如上可以看出,将接收信号按接收时间顺序奇偶分开,便可实现对发送信号  $X_1$  和  $X_2$  的解码。进一步解码二维发送信号向量  $X_1$  和  $X_2$  中包含的  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$  及  $x_4$  可应用端到端的 MIMO 空时编解码技术。两基站分别解码的信号由上一级网络实现分集合并接收,从而提高信号接收质量。

同样地,该算法可应用于下行信号传输。同时,高铁无线通信系统应用该算法还可以解决列车运行时速快、越区切换距离短、越区失败的问题。这是因为该算法的实现依靠两个双天线的车载设备及两个双天线并经过功分器双向发射的基站共同组成。越区切换将会发生在列车逐渐远离其中一个基站而与另一个基站逐渐接近的过程中,如图 4 所示。

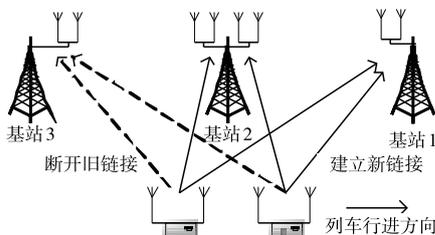


图4 基于传输时延的干扰对齐系统越区切换

理论上,越区切换发生在列车上的两个车载设备与逐渐接近的基站 2 间距离相等的时刻,即此时两个车载设备距离基站 3 最远而距离基站 2 最近。这时仅需要断开与远基站 3 的通信并保持与近基站 2 的通信,同时与逐渐靠近的再下一个基站 1 间建立通信链路。这样越区切换后,两个车载设备仍然保持与两个基站即基站 1 和 2 之间的通信,可继续应用所提出的基于传输时延的干扰对齐算法。越区切换过程中,即便出现了不稳定的断开,但因越区时车载设备总会与基站 2 保持较近的距离,因此仅需要由现算法的两个车载设备同时接入并与两个基

站的通信改为越区切换时两个车载设备按时分多址接入并仅与一个基站保持通信,这便使问题得到了解决。

#### 4 IAS 系统空间线性干扰对齐接入

车内接入子系统主要由车载设备及用户移动台组成。4G 公共移动通信网络采用 MIMO 技术,基站及用户移动台均可配备多根天线。文献[9]中提出的干扰对齐算法实现了三个分别配备两根天线的用户可以同时接入网络。在接收端,三个接收机独立解码,每个用户仅有一个自由度。该干扰对齐算法相较于传统的 TDMA 方式具有一定的优势。第一,允许更多的用户同时接入网络,不必按时分多址轮流接入;第二,从系统和自由度的角度来说,该算法的系统 and 自由度为 3。而采用双天线的 TDMA 系统,每个时隙可以同时发送两个数据包,三个双天线用户轮流发送,三个时隙共发送六个数据包,这相当于系统的和自由度为 2。可见,干扰对齐技术在多用户干扰环境下具有以上的优势。

本文依据高速铁路 IAS 子系统的特点,提出一种空间线性干扰对齐算法。在 IAS 子系统中,车厢内配有专用的车载设备负责与车厢内 2G/3G、WiFi 等用户终端通信。由于采用 MIMO 技术,本文在每个车载设备上配备两根天线。将列车的若干个车厢编为一组,每组共配备两套相同的车载设备并间隔一定的距离,如图 5 所示。该模型与经典的干扰对齐模型相似,但由于每组列车上的两套车载天线系统是固定的且相互间具有较强的通信能力,因此,该算法相较于传统的干扰对齐算法可以使 IAS 子系统获得更高的系统和自由度。

本文将 IAS 子系统简化后如图 6 所示。该模型中有两个用户同时接入了 IAS 系统网络。下面分别就车载设备的下行发送及上行接收给出空间线性干扰对齐算法描述。

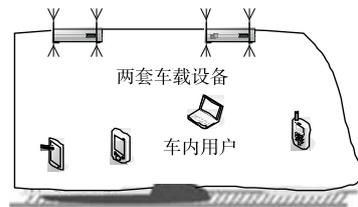


图5 双接收设备的 IAS 子系统

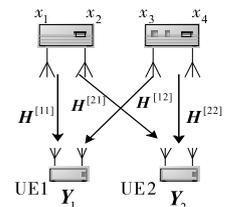


图6 车载下行发送 IAS 子系统

图 6 的系统由两个车载设备及两个终端用户共同组成,其中每套车载设备配备两根天线,同时每个终端用户也具有两根天线。两个车载设备的共四根天线同时发送四个数据包到两个具有双天线的终端接收用户。设第一个车载设备两根天线发送的两个数据包为  $x_1$  及  $x_2$ , 写成向量形式可表示为  $X_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$ ; 同样,第二个车载设备两根天线发送的两个数据包为  $x_3$  及  $x_4$ , 写成向量形式可表示为  $X_2 = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$ 。又设  $H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}$  是一个  $4 \times 4$  阶的信道系数矩阵,其中  $H_{ij} (i, j \in \{1, 2\})$  是  $2 \times 2$  维的矩阵。 $H$  的逆矩阵设为  $G = H^{-1}$ 。现将矩阵  $G$  写成分块矩阵的形式可表示为  $G = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix}$ , 其中  $G_{ij} (i, j \in \{1, 2\})$  是  $2 \times 2$  维的矩阵。令第一个车载设备通过两根天线发送如下的  $2 \times 1$  维的信号向量为

$$T_1 = G_{11} X_1 + G_{12} X_2 \quad (7)$$

同时,令第二个车载设备通过其两根天线发送  $2 \times 1$  维的信号向量为

$$T_2 = G_{21} X_1 + G_{22} X_2 \quad (8)$$

这里,  $T_1$  和  $T_2$  均是  $2 \times 1$  维的列向量,即两个车载设备的共四根天线同时发送信号。以下为简化,省略了信道高斯白噪声项,信号经过信道传输后,在两个终端用户处接收到的信号可以表示为

$$Y_1 = H_{11} T_1 + H_{12} T_2 \quad (9)$$

$$Y_2 = H_{21} T_1 + H_{22} T_2 \quad (10)$$

将式(7)(8)分别代入式(9)(10)可以得到

$$Y_1 = (H_{11} G_{11} + H_{12} G_{21}) X_1 + (H_{11} G_{12} + H_{12} G_{22}) X_2 \quad (11)$$

$$Y_2 = (H_{21} G_{11} + H_{22} G_{21}) X_1 + (H_{21} G_{12} + H_{22} G_{22}) X_2 \quad (12)$$

由于  $G = H^{-1}$ ,可知  $H_{11} G_{11} + H_{12} G_{21} = 1$  且  $H_{11} G_{12} + H_{12} G_{22} = 0$ ;同理, $H_{21} G_{11} + H_{22} G_{21} = 0$  且  $H_{21} G_{12} + H_{22} G_{22} = 1$ 。因此,由式(11)终端用户 1 的接收信号  $Y_1$  中只包含发送信号  $X_1$ ,而去除了发送信号  $X_2$ 。发送信号  $X_1$  对于接收信号  $Y_1$  来说是期望接收的信号,而发送信号  $X_2$  对于接收信号  $Y_1$  来说是非期望接收的干扰信号。通过这种线性干扰对齐算法,在终端用户 1 处,其非期望接收的干扰信号  $X_2$  与其期望接收信号  $X_1$  便实现了相互分离。非期望的干扰信号  $X_2$  与期望信号  $X_1$  分属不同的子空间,这里,非期望的干扰信号  $X_2$  被对齐在期望信号  $X_1$  的零空间内。由此,可从接收信号  $Y_1$  中解码用户 1 的期望信号  $X_1$ 。同理,由式(12)可知,在终端用户 2 的接收信号  $Y_2$  中只包含其期望接收的发送信号  $X_2$ ,而去除了其非期望接收的干扰信号  $X_1$ 。因此可以从接收信号  $Y_2$  中解码用户 2 的期望信号  $X_2$ 。两个车载设备实现了下行同时发送四个数据包,两个终端用户可以分别相互独立且无干扰地线性解码其期望接收的信号。这便达到了系统的和自由度为 4。

与现有的干扰对齐算法相比,该改进算法基于 IAS 子系统车载双发射设备的特点可以实现单位时间数据传输速率更快、系统可用自由度更高。现有的多用户 MIMO 无线干扰系统为了避免干扰、提高系统可用自由度,解决方法主要有依靠时间扩展或空间扩展。如文献[10]提出的索引编码问题,实际是干扰对齐思想的原型,它利用了时间扩展,实际是用了两个信号维度,即两个连续的时隙发送信号,因此单位时间数据传输速率下降。而文献[11,12]提出了  $M \times N$  个用户的  $X$  型无线网络中,当每个用户有  $A$  根天线时,自由度总数的上界为  $AMN/(M+N-1)$ 。文献[13]证明了两个用户  $X$  型干扰网络中,当每个用户有三根天线时,仅仅有三个自由度。即使采用现有的干扰对齐算法可以达到自由度的上限  $AMN/(M+N-1)$ ,即实现系统的和自由度为 4,但现有算法实际是通过空间扩展来实现的,每个用户均配置了三根天线。本文所提出的算法在每个用户仅具有两根天线的情况下,即可以实现系统的和自由度为 4。这种空间线性干扰对齐算法恰恰是利用了 IAS 子系统车载两套设备,可以实现上行接收及下行发送在车载设备端进行联合编解码的特点。因此,本文所提出的算法其编解码过程均在车载设备上实现,减轻了终端用户的设备复杂度。

与下行发送干扰对齐算法类似,在车内接入子系统的上行接收方式下,亦可以采用所提出的空间线性干扰对齐算法应用于 IAS 子系统上行接收。

## 5 仿真及性能评价

车地回传 BHS 子系统,如图 3 所示,共由两个车载设备(每个车载设备配备两根天线)及两个基站(每个基站两根天线且每根天线均用功分器分开向两个方向同时发送信号)组成。图 7 分别对车地回传子系统中采用基于传输时延干扰对齐算法的系统及未采用干扰对齐技术而仅是基站采用双天线且车载设备亦采用双天线的系统进行了仿真,并且比较了两种系统的误码率特性。仿真参数中信道为随机产生的瑞利衰落复信道矩阵,阶数为  $2 \times 2$  阶。端对端的两天线 MIMO 收发均采用 Alamouti 空时编解码算法。为便于比较,两种算法的仿真实验均采用了相同的复信道衰落系数矩阵。

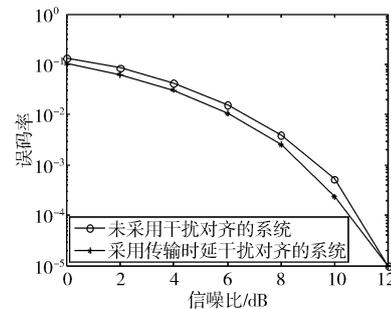


图 7 瑞利信道下 BHS 子系统误码率

可见,在瑞利衰落信道条件下,传输时延干扰对齐系统与未采用干扰对齐技术的系统相比较,其误码率相当,优势不明显。

考虑到实际的高速铁路车地无线接入系统的传输环境多为空旷地或高架桥,存在一定比例的直射路径信号。因此,无线传播模型可采用莱斯信道模型作更进一步的仿真比较。信道加入高斯白噪声,在莱斯信道模型条件下,两种系统的信噪比与误码率的关系曲线如图 8 所示。其中,“圆圈”型曲线和“米”字型曲线分别代表仿真了 20 次随机产生莱斯信道下两系统的误码率取平均的结果;而“菱形”曲线和“叉”字型曲线分别代表这 20 次随机信道中两系统误码率最小情况下的仿真结果。

可见,莱斯信道下两种系统在随机产生多次信道矩阵取平均的条件下,其系统误码率非常接近,传输时延干扰对齐系统仅有很小的优势。某些信道条件下,传输时延干扰对齐系统误码率还会高于未采用干扰对齐的系统。根据 3.2 节中的算法描述,基于传输时延干扰对齐算法的 BHS 子系统,其接收基站实时解码复杂度低。同时如图 3 所示,采用基于传输时延干扰对齐算法的系统支持两个双天线的车载设备同时接入网络,而未采用干扰对齐算法的系统由铁道沿线的双天线基站及双天线车载设备组成,但该系统仅支持一个双天线的车载设备与一个双天线的基站间的通信。因此,本文所提出的算法应用在车地回传 BHS 子系统中,虽在误码率特性上与未采用该算法的系统相比较其优势不明显,但在车载设备同时接入网络的数量上,即系统和自由度具有明显优势且解码复杂度更低。

在车内接入 IAS 子系统中,将列车的若干车厢编为一组,设第  $m$  组列车上安装有两个车载设备,每个车载设备配备两根天线,可以同时支持两个用户接入无线网络,每个用户均具有两根天线。

图 9 分别对车内接入子系统中基于空间线性干扰对齐的下行发送算法、上行接收算法及未采用干扰对齐技术而将干扰

视为噪声的算法进行了仿真,并且比较了三种算法的误码率特性。车厢内的信号传播损耗大于自由空间传播损耗,仿真采用瑞利衰落信道模型。设每个终端用户与任意车载设备之间的信道衰落系数矩阵都是随机产生的  $2 \times 2$  阶瑞利衰落信道矩阵。信道均加入了高斯白噪声,仿真了信噪比与误码率的关系曲线。每个信噪比所对应的误码率均为仿真了 50 000 数据帧的结果。

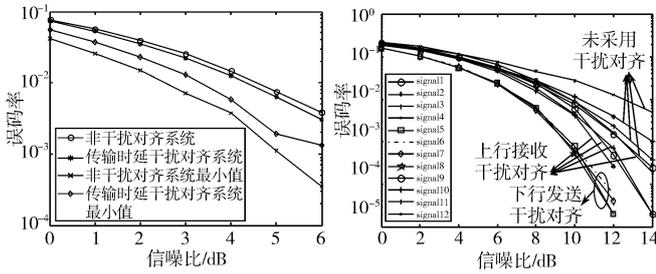


图 8 莱斯信道下 BHS 子系统误码率 图 9 IAS 子系统误码率

图 9 中,仿真信号名称与对应曲线的描述关系如表 1 所示。信号 1~4 所绘出的四条曲线代表采用空间线性干扰对齐算法的下行发送车内接入子系统的误码率曲线。在相同的信道条件下,本文又仿真了上行接收算法。图 9 中的信号 5~8 所绘出的四条曲线代表采用空间线性干扰对齐算法的上行接收车内接入子系统的误码率曲线。为便于比较,同时仿真了未采用干扰对齐技术而直接将非期望接收的信号作为噪声处理时,车内接入子系统的误码率曲线,如图 9 中信号 9~12 所示。

表 1 信号名与曲线对应关系

信号名	曲线含义
signal1	下行 UE1 的天线 1 接收误码率
signal2	下行 UE1 的天线 2 接收误码率
signal3	下行 UE2 的天线 1 接收误码率
signal4	下行 UE2 的天线 2 接收误码率
signal5	上行车载 1 的天线 1 接收误码率
signal6	上行车载 1 的天线 2 接收误码率
signal7	上行车载 2 的天线 1 接收误码率
signal8	上行车载 2 的天线 2 接收误码率
signal9	未采用干扰对齐 UE1 的天线 1 接收误码率
signal10	未采用干扰对齐 UE1 的天线 2 接收误码率
signal11	未采用干扰对齐 UE2 的天线 1 接收误码率
signal12	未采用干扰对齐 UE2 的天线 2 接收误码率

可见,采用空间线性干扰对齐算法的上行接收及下行发送车内接入子系统的误码率均优于未采用干扰对齐算法的系统误码率。基于空间线性干扰对齐的上行接收算法及下行发送算法用于车内接入子系统信号传输,仅有较小的误码率差异。下行发送算法的误码率特性略优于上行接收算法。该误码率特性符合无线网络设计的一般原则,即下行发送误码率特性优于上行接收。这里,终端用户的接收误码率优于基站接收的误码率,这可以使终端用户获得更好的网络体验。

## 6 结束语

本文针对高速铁路信号传输的特点,提出了一种基于干扰对齐技术的高铁宽带通信 HRC 系统。该系统分为干扰对齐车内接入子系统及传输时延干扰对齐车地无线回传子系统。在

车内接入子系统中,利用两个车载设备可以相互通信的特点,提出可以支持两个无线终端用户同时收发四个数据包的干扰对齐算法,得到了比现有的经典干扰对齐算法更高的系统和自由度。仿真比较了采用所提出的干扰对齐算法的车内接入子系统与未采用该算法的系统误码率。在车地回传子系统中,根据两个车载设备具有固定间隔,从而有一定的传输时延差的特点,提出了一种基于传输时延的干扰对齐算法。该算法支持两个车载设备同时接入网络,而未采用干扰对齐技术的车地回传系统仅支持一个车载设备同时接入网络。仿真比较了采用所提出的传输时延干扰对齐算法与未采用该算法的车地回传子系统的误码率特性曲线。同时,与所提出的传输时延干扰对齐算法相适应的高铁沿线网络覆盖方案还解决了高速铁路越区切换时速度快、时间短、需要较长的重叠覆盖距离、容易越区失败的问题。

## 参考文献:

- [1] 钟章队,艾渤,刘秋妍,等. 铁路数字移动通信系统(GSM-R)应用基础理论[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [2] 章嘉懿,谈振辉,于晓溪,等. 高速铁路公众宽带通信接入体制与关键技术综述[J]. 铁道学报, 2012,34(1): 46-53.
- [3] 凌云. 高速铁路 3G 网络覆盖与优化研究[D]. 广州:中山大学, 2010: 15-20.
- [4] 安永丽,肖扬. 基于干扰对准的 LTE 上行虚拟 MIMO 系统[J]. 北京交通大学学报,2011,35(5): 68-72.
- [5] CADAMBE V, JAFAR S. Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2008,54(8): 3425-3441.
- [6] AN Yong-li, XIAO Yang, QU Guang-zhi. Multi-source cooperative MIMO cognitive network based on distributed interference alignment [C]//Proc of the 4th IET International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks. 2011:160-165.
- [7] GOLLAKOTA S, PERLI S D, KATABI D. Interference alignment and cancellation[C]//Proc of ACM SIGCOMM Conference on Data Communication. New York:ACM Press, 2009:159-170.
- [8] CADAMBE V R, JAFAR S A. Degrees of freedom of wireless networks-what a difference delay makes[C]//Proc of the 41st Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. 2007: 133-137.
- [9] TRESCH R, GUILLAUD M, RIEGLER E. On the achievability of interference alignment in the K-user constant MIMO interference channel[C]//Proc of the 15th IEEE/SP Workshop on Statistical Signal Processing. 2009: 277-280.
- [10] BERNIK I, KLEINBOCK D, MARGULIS G. Khintchine-type theorems on manifolds: the convergence case for standard and multiplicative versions[J]. International Mathematics Research Notices, 2001(9):453-486.
- [11] CADAMBE V, JAFAR S. Interference alignment and the degrees of freedom of wireless X networks [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2009,55(9):3893-3908.
- [12] CADAMBE V R, JAFAR S A. Degrees of freedom of wireless networks with relays, feedback, cooperation and full duplex operation [J]. IEEE Trans on Information Theory, 2009,55(5): 2334-2344.
- [13] JAFAR S, FAKHEREDDIN M. Degrees of freedom for the MIMO interference channel[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2007, 53(7):2637-2642.