

# MIMO-OFDM 技术在煤矿井下的应用研究

王艳丽<sup>1</sup>, 张 鹏<sup>2</sup>, 张 佳<sup>2</sup>

(1. 渭南师范学院 数学与信息科学学院, 陕西 渭南 714000;  
2. 中煤科工集团西安研究院, 陕西 西安 710077)

**摘 要:**针对矿井巷道中信号传播特性及多径衰落对矿井无线移动通信可靠性的影响,将多输入多输出-正交频分复用(MIMO-OFDM)技术应用于矿井无线通信,给出矿井巷道宽带信道统计模型并建立矿井 MIMO-OFDM 系统,分析 MIMO-OFDM 技术在多径衰落下的传输性能。仿真结果表明,系统的误码率随着多径数目的递增而递减,采用 MIMO-OFDM 技术有效地克服了矿井巷道空间的多径衰落,能极大地提高矿井无线通信系统的性能。

**关键词:**矿井通信;MIMO-OFDM;多径衰落;误码率

中图分类号:TN929;TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2014)08-0191-03

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2014.08.045

## Research on Application of MIMO-OFDM Technology in Mine Tunnel

WANG Yan-li<sup>1</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>, ZHANG Jia<sup>2</sup>

(1. College of Mathematics and Information Science, Weinan Normal University, Weinan 714000, China;  
2. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In view of the impact of signal transmission feature in mine tunnel channel and the multi-path fading on wireless communication reliability in mine tunnel, make the MIMO-OFDM technology used in the mine wireless communication, put forward the statistical model of mine tunnel bandwidth channel and establish the MIMO-OFDM system, analyzing the transmission performance of MIMO-OFDM in multi-path fading. The simulation results indicate that the error rate of system decreases as the number of multi-path increases, MIMO-OFDM technology can resist the multi-path fading of mine tunnel channel, and the performance of mine wireless communication is greatly improved.

**Key words:** mine tunnel communication; MIMO-OFDM; multi-path fading; error rate

## 0 引 言

煤矿井下特殊的工作环境使煤矿的生产具有极高的危险性,对煤矿安全生产进行实时监测可以有效提高井下人员安全的可靠性,因此,矿井通信系统的有效性和可靠性是煤矿安全生产的重要保障。矿井无线通信成本低廉、设备维护容易实现,但在实际的矿井无线通信系统中存在着严重的多径衰落。多径衰落会破坏信号的传输特性,产生码间干扰,使无线通信系统的质量下降,降低通信系统的可靠性<sup>[1-3]</sup>。

现有的矿井无线通信系统都没能很好地解决信号的多径衰落效应。对 MIMO 来说,多径可以作为一个有利因素来加以利用,MIMO 技术的关键是能够将传统通信系统中存在的多径衰落影响因素变成对用户通

信性能有利的增强因素,MIMO 技术有效地利用随机衰落和可能存在的多径传播来成倍地提高业务传输速率,因此,它能够在不增加所占用户信号带宽的前提下使无线通信的性能改善几个数量级<sup>[14-15-13-10]</sup><sup>[4-7]</sup>。无线信道的频率响应曲线大多是非平坦的,而 OFDM 的主要思想是在频域内将给定信道分成许多正交子信道,在每个子信道上使用 1 个子载波进行调制,各子载波并行传输。尽管总的信道是非平坦的,即具有频率选择性,但是每个子信道是相对平坦的,在每个子信道上进行的是窄带传输,信号带宽小于信道的相应带宽,因此可以大大消除信号波形间的干扰<sup>[8-9]</sup>。

MIMO 技术和 OFDM 技术具有先天的结合优势,由两种技术结合而成的 MIMO-OFDM 技术实现了

收稿日期:2013-10-15

修回日期:2014-01-25

网络出版时间:2014-05-21

基金项目:国家科技部专项基金(2004DIA2J005);陕西省教育科研计划项目(2013JK1071);渭南师范学院科研资助项目(13YKP021)

作者简介:王艳丽(1978-),女,硕士,研究方向为无线通信信号处理、无线网络技术。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20140524.2149.017.html>

MIMO 和 OFDM 间的优势互补。文中分析了 MIMO-OFDM 技术解决矿井巷道多径衰落的可行性,并对系统性能进行分析。

## 1 宽带信道统计模型

在非常复杂的煤矿井下环境之下,电磁波的传播经过散射、反射和绕射后到达接收端,接收端的信号是经历了各种障碍物的绕射、反射和散射的信号。各个信号的传播路径和传播时间不同,即到达接收机的时间、幅度和相位也各不相同,信号之间的相互作用造成了瞬时接收信号相位和幅度的随机波动,即多径衰落。井下无线信道不同于陆地上的无线信道,其多径传播统计特性非常复杂,矿井的传输环境以及载波频率都对多径幅度分布产生影响。

根据已有的研究成果<sup>[10]</sup>,当收发信机位于空直巷道中时,存在视距传输路径,多径幅度分布与莱斯分布具有很好的拟合程度。然而,当收发信机分别位于主巷道与支巷道时,或收发信机间的视距路径遭到阻挡时,多径幅度不再服从莱斯分布,有时与瑞利分布具有一定的拟合度。井下的多径幅度分布具有可变性,采用参数可变的 Nakagami 分布函数描述井下多径信号的幅度分布;依据宽带多径传播信道的实际测量,矿井巷道中的功率延迟分布服从指数分布<sup>[10-11]</sup>。

基于以上分析,利用经典的时不变冲激响应信道模型表示矿井巷道宽带信道统计模型,即

$$h(t) = \sum_{k=0}^{N-1} r_k \delta(t - \tau_k) e^{j\theta_k}$$

其中,  $N$  为多径数;  $r_k$ 、 $\tau_k$ 、 $\theta_k$  分别为多径的幅度、延时和相位;  $\delta(\cdot)$  为狄拉克雷函数。

根据前面的分析,多径幅度  $r_k$  服从参数可变的 Nakagami 分布,  $m$  的取值范围是  $1 \leq m \leq 4$ ,  $m$  的取值与收发天线在巷道中的相对位置、收发天线之间的距离、巷道截面大小以及载波频率有关。

## 2 矿井 MIMO-OFDM 系统

矿井移动终端在移动通信过程中,其移动速度较慢,多普勒扩展对信道特征在时域内的变化影响不大。而时延扩展造成到达接收端的各路发射信号具有不同的衰减因子和时延,不同路径信号产生交叠,引起码间干扰,因此衰落信道呈现频率选择性特征<sup>[12]</sup>。图 1 和图 2 给出了 MIMO-OFDM 系统发射端和接收端的结构图<sup>[13]</sup>。

考虑  $N_t$  副发射天线、 $N_r$  副接收天线、 $N$  个子载波,设循环前缀(CP)的持续时间大于所有发射天线与接收天线之间信道的最大时延扩展,并且设信道在一个 OFDM 符号周期内保持不变。

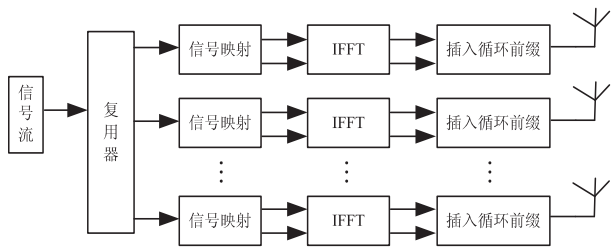


图 1 MIMO-OFDM 系统在发射端的系统框图

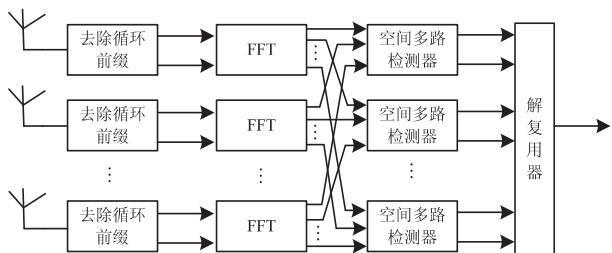


图 2 MIMO-OFDM 系统在接收端的系统框图

在发射端,信源数据经过处理后产生  $N_t$  路数据流,这些数据流分别经过 OFDM 调制后由不同的发射天线同时发射出去;在接收端  $N_r$  根接收天线分别接收到来自多个发射天线的信号与噪声的叠加,来自不同接收天线的信号分别经过 OFDM 解调,最后送入空时处理单元进行处理以恢复发送的数据。

令  $x_m[k]$  表示第  $m$  根天线的第  $k$  个子载波上的发射信号( $k=0,1,\dots,N-1$ ),经过 IFFT 变换后的时域信号为:

$$s_m[t] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x_m[k] \exp\left(\frac{j2\pi kt}{N}\right), t=0,1,\dots,N-1 \quad (1)$$

经过无线信道后,第  $n$  根接收天线接收到来自多个发射天线的信号与噪声的叠加,去掉循环前缀后的时域信号可表示为:

$$r_n[t] = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^{N_t} \sum_{k=0}^{N-1} H_{nm}[k] x_m[k] \exp\left(\frac{j2\pi kt}{N}\right) + \varepsilon_n[t], t=0,1,\dots,N-1$$

其中,  $\varepsilon_n[t]$  表示第  $n$  根接收天线的第  $t$  时刻接收到的噪声。

经过 FFT 变换后,第  $n$  根接收天线的第  $k$  个子载波上得到的信号  $y_n[k]$  可以由下式得到:

$$y_n[k] = \sum_{m=1}^{N_t} H_{nm}[k] x_m[k] + \xi_n[k], n=1,2,\dots,N_r \quad (2)$$

其中,  $\xi_n[k] = \sum_{l=0}^{N-1} \varepsilon_n(t) \exp\left(-\frac{j2\pi kt}{N}\right)$  为第  $n$  根接收天线的第  $k$  个子载波上的噪声。

将子载波索引去掉,接收信号写成矩阵表达形式为:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \boldsymbol{\xi} \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{X} = [x_1[k] \ x_2[k] \ \dots \ x_{N_t}[k]]^T$ ,  $\mathbf{Y} = [y_1[k]$

$y_2[k] \cdots y_{N_r}[k]]^T, \boldsymbol{\xi} = [\xi_1[k] \ \xi_2[k] \cdots \xi_{N_r}[k]]^T, H$  是宽带信道频域响应。

3 矿井 MIMO-OFDM 技术抗多径性能分析

MIMO 技术通过多天线阵列单元,建立空间并行信道,使传输的信号具有空间相关性,接收端通过空时信号处理,提高了通信系统的质量和数据传输速率。将 MIMO 和 OFDM 技术相结合,形成集频率、时间和空间 3 种分集技术为一体的 MIMO-OFDM 技术,不仅可以有效地对抗噪声干扰和多径衰落,还能够降低接收机的复杂度。OFDM 技术是将频率选择性衰落信道转换成平坦的信道,从而减小多径衰落的影响<sup>[14]</sup>。

接收机接收的信号受到多径和高斯噪声的影响。接收端首先对信号进行解调,使信号恢复成与发射信号的维数相同,然后对信号进行检测,最后对信号进行判决,输出最终数据。

文中采用 MMSE 检测算法,MMSE 检测算法在噪声放大作用和干扰抑制作用之间取了两者的折衷。MMSE 检测算法指的就是将实际传输信号和线性检测出的信号之间的均方误差值保持最小。

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = \arg \min_{\mathbf{W}} E \{ \|\mathbf{X} - \mathbf{W}^H \mathbf{Y}\|^2 \}$$
 (4)

令式(4)对  $\mathbf{W}$  的导数为 0,可得 MMSE 检测器权重系数矩阵:

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = (\mathbf{H}\mathbf{A}\mathbf{H}^H + \sigma_v^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}\mathbf{A}$$
 (5)

式中,  $(\bullet)^H$  表示共轭转置;  $\mathbf{A}$  是一个对角矩阵。由此可得 MMSE 判决矢量为

$$\hat{X}_i = \text{sign} [ (\mathbf{W}_{\text{MMSE}}^H \mathbf{Y})_i ]$$
 (6)

根据前面的分析,采用 Matlab 对 MIMO-OFDM 系统的性能进行分析。表 1 给出了仿真参数。

表 1 参数设置

参数	值
带宽/MHz	1
子载波数	256
比特数/符号	2
最大时延	7
空时编码	STBC
循环前缀/ $\mu\text{s}$	40
调制方式	BPSK
信道多径数	2,4,6

首先,分析不同接收天线情况下 MIMO-OFDM 系统的性能。

图 3 给出了发射天线相同,不同接收天线情况下 MIMO-OFDM 系统的误码率性能比较。假设信道的多径数目为 4,发射天线数目为 1,接收天线数目为 2,3,4,收发天线互不相关。

从仿真图可以看出,在发射天线不变的情况下,接收天线少的系统 BER 性能劣于接收天线多的系统,如误码率为  $10^{-3}$  时,接收天线是 3 的系统比接收天线是 4 的系统所需的信噪比平均增加了约 3 dB。随着接收天线数目的增加,MIMO-OFDM 系统的误码率逐渐下降,主要是由于接收天线的增加提高了系统的分集增益。

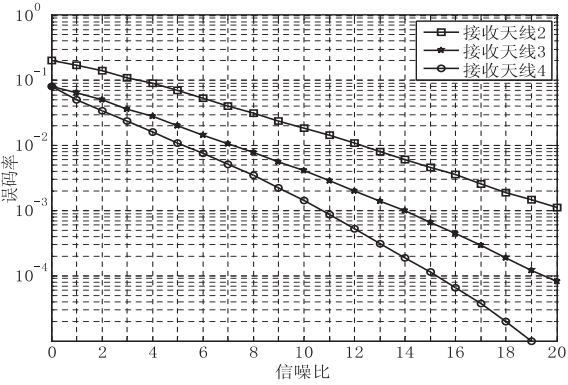


图 3 不同接收天线条件下 MIMO-OFDM 系统误码率

其次,分析 MIMO-OFDM 系统在多径衰落情况下的系统性能。

图 4 给出了不同多径数目下的 MIMO-OFDM 系统误码率性能比较。将发射天线和接收天线的数目固定,假设发射天线数目为 2,接收天线数目为 2,接收端采用 MMSE 检测,多径数目取 2,4,6。

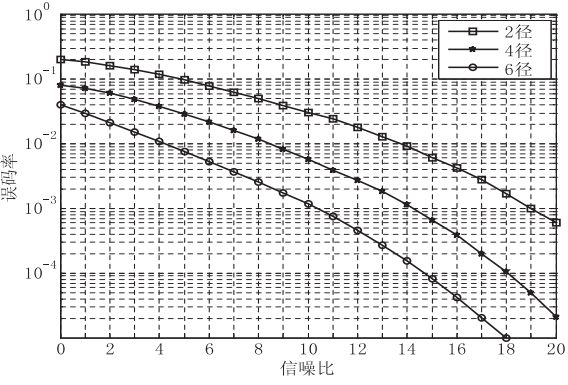


图 4 不同多径数目条件下 MIMO-OFDM 系统误码率

从仿真图可以看出,给定一定的信噪比值,误码率随着多径数目的递增而递减,对 MIMO-OFDM 技术有效抑制多径衰落进行了验证;MIMO 技术与 OFDM 技术的结合,能够有效对抗矿井巷道中的多径衰落,是一种更适合于矿井巷道通信的无线技术。

4 结束语

矿井巷道的多径传播特性导致矿井无线通信性能的下降。文中给出了矿井巷道宽带信道统计模型,建立矿井 MIMO-OFDM 系统,在宽带信道统计模型和矿井 MIMO-OFDM 系统的基础上,分析 MIMO-OFDM 技

### 3 结束语

“计算机网络”课程是一门理论性和实践性并重的课程<sup>[14]</sup>。按照培养应用型人才的教学目标,一定要把握好理论教学的深度,并考虑到实验教学的实用性,处理好理论教学和实验教学的关系。本课程小组立足于学生应用能力的培养,使教学内容、教学方法随着社会需要的变化而不断进步,切合实际探讨合理、先进的教学改革方案,为推动“计算机网络”课程的建设做了一些大胆改革,并付诸于实际教学过程中。

网络技术日新月异,“计算机网络”课程的教学改革是一个长期的、不断探索的过程,迫切需要投入更多的时间和精力,进一步深入地进行理论教学、实验教学等多方面的改革。将教学内容更加紧密地结合实际,不断地提高教学质量,不断更新实验教学内容和技术,促进实验教学水平的提高,培养出更多的高素质计算机网络应用型专业人才。

#### 参考文献:

- [1] 王绍强.应用型本科计算机网络教学改革的研究与实践[J].计算机教育,2009(18):16-18.
- [2] 李津蓉,蔡伟建.面向应用型人才培养的“计算机网络”教学研究[J].中国电力教育,2010(21):72-73.
- [3] Kurose J F, Ross K W. Computer networking: a top-down approach featuring the Internet[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Ed-

(上接第 193 页)

术在多径衰落下的传输性能,并对 MIMO-OFDM 系统的性能进行了仿真。结果表明,随着接收天线数目的增加,MIMO-OFDM 系统的误码率逐渐下降,同时,误码率随着多径数目的递增而递减,抗多径干扰的性能不断加强。从而表明集频率、空间和时间 3 种分集技术为一体的 MIMO-OFDM 技术可以有效地对抗多径衰落,适合于矿井无线通信。

#### 参考文献:

- [1] Ng B K, Sousa E S. On bandwidth-efficient multi-user-space-time signal design and detection[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(2): 320-329.
- [2] Gartner M E, Bolcskei H. Multi-user space-time/frequency code design[C]//Proc of ISIT. [s. l.]: IEEE, 2006: 2819-2823.
- [3] Zhang Wei, Letaief K B. A systematic design of multiuser space-frequency codes for MIMO-OFDM systems[C]//Proc of IEEE international conference on communications. Glasgow: IEEE, 2007: 1054-1058.
- [4] 黄 韬,袁超伟,杨睿哲,等. MIMO 相关技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [5] 郑红党.煤矿井巷电波传播理论和 MIMO 信道建模关键技

术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2010.

- [4] Forouzan B A, Mosharra F. Computer networks: a top down approach[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [5] 谢希仁. 计算机网络[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [6] MIT. MIT OpenCourseware[EB/OL]. 2013-10-12. <http://www.myoops.org/cocw/mit/Electrical-Engineering-and-Computer-Science/6-829Computer-NetworksFall2002/CourseHome/index.htm>.
- [7] 李向丽,李 磊,陈 静. 网络实验仿真与网络技术实践[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(3): 74-76.
- [8] 全国计算机软件专业技术资格(水平)考试中心办公室. 全国计算机软件专业技术资格(水平)考试网络工程师考试大纲[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [9] 李向丽. 高级计算机网络[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [10] 胡晓娅. 基于创新能力培养的计算机网络课程教改研究[J]. 理工高教研究, 2008, 27(4): 116-118.
- [11] 徐雷鸣,庞 博,赵 耀. NS 与网络模拟[M]. 北京:人民邮电出版社,2003.
- [12] 李向丽,李 磊,陈 静. 计算机网络技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [13] Donahoo M J, Calvert K L. TCP/IP sockets in C[M]. 陈宗斌,译. 第 2 版. 北京:清华大学出版社,2009.
- [14] 李成忠. 计算机网络教学研究[J]. 重庆邮电学院学报:社会科学版, 2004, 16(6): 131-133.
- [6] Kermaol J P, Schumacher L, Mogensen P E, et al. Experimental investigation of correlation properties of MIMO radio channels for indoor picocell scenarios[C]//Proc of IEEE vehicular technology conference. Boston, USA: IEEE, 2000: 14-21.
- [7] Al-Dhahir N, Fragouli C, Stamoulis A, et al. Space-time processing for broadband wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(9): 136-142.
- [8] 周琳凯,周井泉. 一种新的 OFDMA 系统上行同步的联合估算方法[J]. 计算机技术与发展, 2012, 22(7): 102-105.
- [9] 王业胜,季 薇,侯晓赞. 认知 OFDM 系统中一种改进的注水功率分配算法[J]. 计算机技术与发展, 2013, 23(1): 79-82.
- [10] 李 滢. 受限空间无线信道统计建模及 OFDM 调制技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2007.
- [11] 杨 维,李 滢,孙继平. 类矩形矿井巷道中 UHF 宽带电磁波统计信道建模[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 467-472.
- [12] 姚善化,吴先良. 空间相关性对矿井 MIMO 系统性能的影响[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版, 2010, 33(4): 506-509.
- [13] 王文博. 宽带无线通信 OFDM 技术[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [14] 蔡翠翠. 矿井无线通信的抗多径关键技术研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2012.



MIMO-OFDM技术在煤矿井下的应用研究

作者:

王艳丽, 张鹏, 张佳, [WANG Yan-li](#), [ZHANG Peng](#), [ZHANG Jia](#)

作者单位:

[王艳丽, WANG Yan-li \(渭南师范学院 数学与信息科学学院, 陕西 渭南, 714000\)](#), [张鹏, 张佳, ZHANG Peng, ZHANG Jia \(中煤科工集团西安研究院, 陕西 西安, 710077\)](#)

刊名:

[计算机技术与发展](#) 

英文刊名:

[Computer Technology and Development](#)

年, 卷(期):

2014(8)

本文链接: [http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjtz201408045.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjtz201408045.aspx)