

限定空间中无线通信空时编码的研究*

王健康, 罗涛, 刘丹谱, 乐光新

(北京邮电大学 通信工程学院, 北京 100876)

摘要:目前对MIMO系统的研究,大都是基于信道是独立同分布的假设,而巷道通信由于受空间限制和传播环境影响,MIMO各信道之间具有很强的相关性。研究了城市地铁等限定空间中强相关MIMO信道下的空时编码性能,提出了在此独特环境下的空时编码的性能界和一种能够补偿信道相关性对系统性能影响的空时分组编码方案——循环空时分组编码(CSTBC)。理论分析和计算机仿真结果表明:该方案放宽了编码对正交性的要求,在巷道等强相关无线信道环境下,获得了比传统编码更好的系统性能。

关键词:MIMO系统;限定空间中无线通信;相关信道;空时分组编码

中图分类号:TN929.533 **文献标识码:**A

0 引言

地下铁路系统对通信性能的要求增长很快^[1]。为了保障系统安全运行而引入的新型实时多媒体控制系统,以及乘客本身对更好的信息服务的需求,都要求将来的地铁通信系统必须能够提供高速的图像和数据传输速率(以1 Mbit/s为数量级)和良好的通信性能保障^[2]。1993年为欧洲铁路传输通信网制定的GSM-R通信标准中,上行链路使用频带为876~880 MHz,下行链路为921~925 MHz。该标准主要的问题是每载波的频带效率太低,远不能达到将来上述应用业务的要求。实验数据已经显示,使用多天线发送和多天线接收的MIMO系统能够增加无线通信在巷道通信中的信道容量。信息论的研究也已经证实,只要发送和接收天线之间传播路径足够多(以保证传播信道之间较低的相关性),MIMO系统就会带来信道容量的大大增加^[3-6],并且通过空时编码,或者提高系统数据传输速率,或者提高系统传输的可靠性,使增加的信道容量得以合理利用。但是,与地面无线通信不同,矿井地下巷道和城市地下铁路通信系统,由于受空间限制,多个接收或发送天线之间的放置间距不可能同地面通信系统中那样远,另外,电波是在结构对称的巷道中传播,因而巷

道中的MIMO信道之间会产生很强的相关性。文献[1]测量了在巴黎地铁巷道中的情况,4副天线分别水平放置(间距为 7λ ,大约2.1 m)、垂直放置(间距为 3λ ,大约1 m)、对角放置(与巷道水平中心线成 30° 度夹角,间距为 7λ ,大约2.1 m)时,接收天线之间幅度相关系数分布分别为 $0.9\sim 1.0$ 、 $0.55\sim 0.82$ 、 $0.71\sim 1.0$ 。从测量结果可见,当天线与轨道平行放置时,接收天线之间的相关系数最小(为0.9)。虽然在铁轨垂直方向放置天线时,天线之间的相关性较小,但最小相关系数仍有0.55,平均相关系数高达0.71。可见,地铁巷道中MIMO信道之间的相关性比较大。

研究表明^[2],MIMO信道之间的相关性不仅降低了系统的信道容量,而且对空时编码的性能也产生不利的影响。作者研究了地铁等强相关MIMO信道下的空时编码,提出了在相关环境下的空时编码的性能界和一种能够补偿MIMO信道相关对系统性能影响的空时分组编码方案——循环空时分组编码(CSTBC),并对其性能进行了理论分析和计算机仿真。

1 系统模型

文献[1]中的实际测量表明,在地铁巷道中电磁

* 收稿日期:2003-07-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90104018);“863”高技术基金资助项目(2001AA123016)

作者简介:王健康(1974-),男,江苏徐州人,博士研究生,从事衰落环境下移动通信系统的信道编码及分集技术的研究;乐光新,教授,博士生导师。

波传播衰落一样遵循瑞利分布。考虑 M 个发送天线与 N 个接收天线的瑞利平坦衰落情况下的 MIMO 系统。任何一对发送和接收天线之间的信道衰落系数用一个复数来表示。噪声干扰在 N 个接收天线和不同的符号周期是统计独立的。假设在 t 时刻的第 m 根天线上发送复数符号 x_{tm} , 经过噪声干扰和传播路径的衰落, 并且忽略传播时延, 接收端的第 n 根接收天线, 在 t 时刻接收到的信号 y_{tn} 为

$$y_{tn} = \sqrt{E_s} \sum_{m=1}^M h_{mn} x_{tm} + w_n, \quad t = 1, \dots, L; n = 1, \dots, N \quad (1)$$

式(1)中, h_{mn} 是连接第 m 条发送天线与第 n 条接收天线之间的信道衰落系数; w_n 为在第 n 条接收天线上的加性噪声, 对所有接收天线而言 w_n 为独立同分布, 并且 $w_n \sim CN(0, 1)$; E_s 表示每一个接收符号的能量。

考虑一个空时编码码字的传送情况。假设 X 为 $L \times M$ 阶的发送码字矩阵, H 为 $M \times N$ 阶的衰落信道矩阵, 则

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{M1} & h_{M2} & \dots & h_{MN} \end{bmatrix}$$

同样, 定义 $L \times N$ 阶的接收码字矩阵 Y 和噪声矩阵 W 。式(1)用矩阵的形式来描述为

$$Y = \sqrt{E_s} XH + W \quad (2)$$

2 相关信道下系统性能界

利用文献[6]中的计算独立信道空时编码下成对差错概率(PEP)的方法, 求解在巷道等强相关 MIMO 信道下的 PEP。如上系统模型所述, 假设发送码字矩阵为 X , 接收码字矩阵为 Y , 信道 H 是准平坦的, 即在一个码字时间内, 信道特性保持不变, 而在不同的码字内信道特性可能改变, 传输方程如式(2)所示。

若发送码字为 X , 但在接收端被解码成 \tilde{X} , 由文献[1]知, 系统成对差错率(PEP), $P(X \rightarrow \tilde{X})$ 为

$$P(X \rightarrow \tilde{X}) = E \left[Q \left[\sqrt{\frac{E_s}{2}} \| (X - \tilde{X})H \|_F \right] \right] \quad (3)$$

其中, $Q(x) = \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$, $\| \cdot \|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 模, $\| A \|_F^2 = \text{tr}(AA^H)$, A^H 表示矩阵 A 的转置共轭。

定义 $R_\Delta = (X - \tilde{X})^H (X - \tilde{X})$, 信道相关矩阵 $R = E[\text{vec}(H)\text{vec}(H)^H]$, 其中 $\text{vec}(H)$ 表示由矩阵 H 的所有列组成的一个列向量, R 反映了信道的相关特性。

经推导可得相关信道下 PEP 上界为

$$P(X \rightarrow \tilde{X}) \leq \frac{1}{\det(I_{mn} + \frac{E_s}{4} R(I_m \otimes R_\Delta))} \quad (4)$$

其中, \otimes 表示矩阵的 Kronecker 积。

在理想独立同分布的信道情况下, 上式中信道的相关矩阵 $R = I_{mn}$ 为单位矩阵, 设矩阵 R_Δ 的非零特征值为: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$, 则可以得到文献[6]中的 PEP 为

$$P(X \rightarrow \tilde{X}) \leq \frac{1}{\left(\prod_{i=1}^r (1 + \lambda_i E_s / 4) \right)^m} \quad (5)$$

比较式(4)与式(5)可知, 信道之间的相关性影响系统的 PEP, 在矿井巷道和城市地下铁路等强相关 MIMO 信道下, 如何进行空时编码才能使系统性能较优, 是空时编码研究必须考虑的问题。

3 一种补偿相关性对性能影响的 STBC 编码方案

文献[2]中的仿真结果显示, 当信道之间的相关系数 ρ 小于 0.6 时, 在 10^{-4} 的符号错误性能下, 系统有小于 1dB 的信噪比损失, 空时编码的分集增益基本保持不变。但是, 当 MIMO 信道之间的相关系数 ρ 趋近于 1 时, 编码分集增益将完全消失, 因而系统的性能严重下降。以安全为首位的铁路运输中, 信息监控系统必须提供准确可靠的信息, 物理层的空时编码增益将直接影响网络层及其上层的性能^[7], 所以必须对因信道相关而引起的性能下降加以考虑。根据信息论观点, 信号传输中的空间与时间资源可以互为补充。基于此, 作者提出了一种能够补偿信道强相关影响的空时编码方案——循环空时分组编码(CSTBC)。

常规的空时编码码字是由 Q 个发送符号及其共轭的线性组合构成的 $L \times N$ 阶矩阵^[8], 相应的发送

速率为 Q/L 。常规的 STBC 设计遵守正交设计理论,正交设计使得系统在全分集的情况下获得尽可能高的发送速率,而没有带宽上损失,并且可以使用基于线性处理的最大似然译码,使译码简单、易实现。但是,对相关信道而言,信道矩阵等价于 K 阶对角阵^[9]。因此,为了获得最优的系统性能,我们可以放宽对空时编码的正交性要求。

CSTBC 编码方案:输入到空时编码器的信息符号首先通过常规的 STBC 编码,形成一个 $L \times M$ 阶的常规 STBC 码字 O^n ,然后,相应的 $\hat{L} \times M$ 阶($\hat{L} \geq L$)的 CSTBC 码字由前者循环重复构成。如图 1 所示,一个 CSTBC 码字 Θ^n 由两个常规 STBC 码字 O^n 叠加构成。当然,可以根据实际性能改善的要求,重复常规 STBC 码字 O^n 的部分行。

CSTBC 码字 O^n 中重复常规码字 O^n 的行数越多,性能的改善越好,但相应的信息延迟的时间也越长。实际系统中编码循环行的次数应

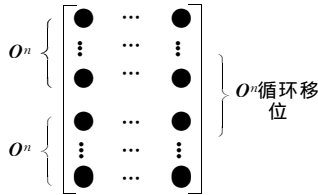


图1 循环空时编码的构成
Fig.1 CSTBC constituent

该结合系统对差错性能的要求,以及实际业务对延迟的容忍程度来确定。通过下述仿真得到,在地铁隧道通信系统中,为了补偿由于信道之间的相关性带来的性能的下降,只需一至两行的编码重复即可。下面给出了几个 CSTBC 码字实例,构成其常规的 STBC 码字来自文献[8]。 O^n 表示 n 阶的常规 STBC 码字, Θ^n 表示对应的循环 STBC 码字。

$$O^2 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \end{bmatrix}; \Theta^2 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}$$

$$O^3 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \frac{c_3}{\sqrt{2}} \\ -c_2^* & c_1^* & \frac{c_3}{\sqrt{2}} \\ \frac{c_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{c_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{-c_1 - c_1^* + c_2 - c_2^*}{2} \\ \frac{c_3^*}{\sqrt{2}} & -\frac{c_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{c_2 + c_2^* + c_1 - c_1^*}{2} \end{bmatrix}$$

$$\Theta^3 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \frac{c_3}{\sqrt{2}} \\ -c_2^* & c_1^* & \frac{c_3}{\sqrt{2}} \\ \frac{c_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{c_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{-c_1 - c_1^* + c_2 - c_2^*}{2} \\ \frac{c_3^*}{\sqrt{2}} & -\frac{c_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{c_2 + c_2^* + c_1 - c_1^*}{2} \\ c_1 & c_2 & \frac{c_3}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

CSTBC 解码方案:从编码方案可以看出,CSTBC 码字是以常规 STBC 码字为基础的。尽管从整体上而言,CSTBC 码字不满足正交性要求,但 CSTBC 码字的任何连续的 L 行仍然保持传统 STBC 码字的正交性。实际上,从图 2 可以看出, Θ^n 中的任何连续的 L 行是 O^n 或者是其循环移位。因此,在接收端完全可以利用常规 STBC 的解码算法,例如配方简化译码算法^[10],对接收到的连续 L 行数据分别进行解码,最后再用最大比合并或等增益合并的方法

得到优化的解码结果。以 $\Theta^2 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}$ 为例,

接收端首先对前两行 $\begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \end{bmatrix}$ 进行解码,然后再对后两行 $\begin{bmatrix} -c_2^* & c_1^* \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}$ 进行解码,最后把两次解码结果进行等增益合并。

4 性能分析和仿真

在文献[1]中,提出了一种地下铁路 MIMO 相关信道模型,并通过实验分析验证了模型的正确性,本文仿真利用此信道模型。不失一般性,在仿真中我们选择了两副发送天线、一副接收天线的系统,采用 BPSK 方式调制,并假设系统接收端已准确知道信道信息。信道为准静态平坦衰落特性,显而易见,只要接收端能够快速估计信道的状态信息,CSTBC 完全适合快衰落信道。若重复一行时信道已经发生了变化,CSTBC 比传统 STBC 的性能有更大的改善。在上述仿真条件下进行性能分析。选择的码字为

$$O^2 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \end{bmatrix}; \Theta^2 = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \\ c_1 & c_2 \end{bmatrix}$$

并分别用 h_1, h_2 表示两发送信道。接收信号为

$$\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{pmatrix} = \Theta^2 \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{pmatrix}$$

式中 $\eta_i (i = 1, 2, 3)$ 是每维方差 $N_0/2$ 的复白高斯噪声。

利用配方法^[8], 对 $\begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}$ 进行解码可得

$$\hat{c}_1' = \left(\sum_{i=1}^2 |h_i|^2 \right) c_1 + [h_1^* \eta_1 + h_2 \eta_2^*]$$

对 $\begin{pmatrix} r_2 \\ r_3 \end{pmatrix}$ 进行解码可得

$$\hat{c}_1'' = \left(\sum_{i=1}^2 |h_i|^2 \right) c_1 + [h_1^* \eta_3 + h_2 \eta_2^*]$$

对两次解码的结果进行等增益合并可得

$$\hat{c}_1 = \left(\sum_{i=1}^2 |h_i|^2 \right) c_1 + \left[\frac{1}{2} h_1^* (\eta_1 + \eta_3) + h_2 \eta_2^* \right]$$

此时, 接收信号功率为 $E_R = \left(\sum_{i=1}^2 |h_i|^2 \right)^2 E_s$, 接收噪声功率 $P_N = (|h_1|^2/2 + |h_2|^2) N_0$

由文献^[10]可知, 传统 STBC 编码下接收信号

功率为 $E_R^O = \left(\sum_{i=1}^2 |h_i|^2 \right)^2 E_s$, 接收噪声功率 $P_N^O =$

$\left(\sum_{i=1}^2 |h_i|^2 \right) N_0$ 。因为 $E_R = E_R^O, P_N < P_N^O$, 所以 CSTBC

编码比 STBC 编码的 BER 性能好。仿真曲线如图 2~4 所示, 仿真中选择的码字为

$$O^2 = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \end{pmatrix} \quad \Theta^2 = \begin{pmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_2^* & c_1^* \\ c_1 & c_2 \end{pmatrix}$$

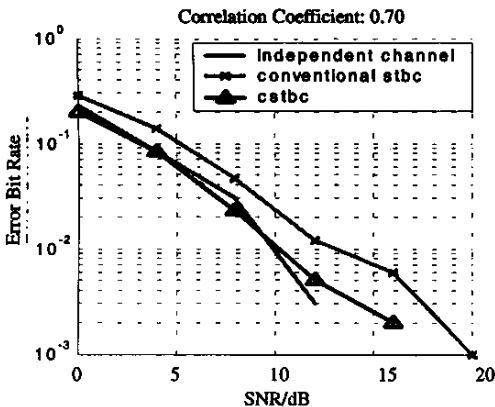


图 2 相关系数为 0.7 时性能

Fig. 2 Performance when correlation factor=0.7

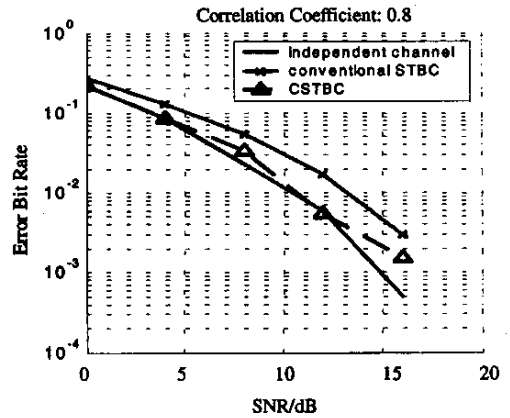


图 3 相关系数为 0.8 时性能

Fig. 3 Performance when correlation factor=0.8

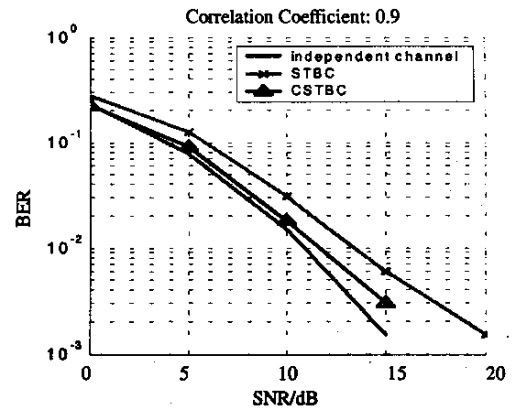


图 4 相关系数为 0.9 时性能曲线

Fig. 4 Performance when correlation factor=0.9

从图 2~4 仿真曲线可以看出, 取误比特率为 10^{-2} , 当相关系数为 0.7 或 0.8 时, CSTBC 在相关信道下的编码性能与 STBC 在独立信道下的编码性能相近, 但与相关信道下的 STBC 编码性能相比有大约 2.5 dB 的增益; 当相关系数为 0.9 时, 相关信道下 CSTBC 性能与独立信道下 STBC 相比有 1 dB 的损失, 但其与同样相关性信道下的 STBC 性能相比仍然有近 2 dB 的好处。从而可得, 重复一行的 CSTBC 能够补偿巷道中 MIMO 信道相关性对系统性能带来的损失, 因而验证了 CSTBC 编码方案的有效性。

5 结论

因为在巷道等受限空间通信中, 信道的空间相关性会导致空时编码系统的性能下降, 在极端情况下空时编码增益将丧失殆尽, 这将严重影响建立在 MIMO 基础之上的网络层及其上层的性能, 所以我们在实际设计这类环境下系统的空时编码时, 必须对性能下降进行考虑。作者提出的循环空时编

码方案,在继承传统的译码方法、不增加译码复杂度的前提下,能够补偿信道强相关对系统带来的影响。在实际的系统中结合自适应编码技术,考虑到实际业务所能容忍的延迟容限,循环空时编码能使强相关信道下系统性能达到较优。

参考文献:

- [1] LIÉNARD M,DEGAUQUE P. Investigation on MIMO channels in subway tunnels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003,21(3):332-339.
- [2] 王健康,罗涛,乐光新,等. 相关瑞利衰落信道下空时分组编码的性能分析[J]. 电讯技术, 2003,(5):57-60.
- [3] ALAMOUTI S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications[J]. IEEE Journal on Select Areas in Communications, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [4] TELATAR I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels [R]. Technical report, AT&T Bell Laboratories Internal Technical Memorandum, June 1995.
- [5] FOSCHINI G J,GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. Wireless Personal Communications, 1998, (6):311-335.
- [6] TAROKH V, SESHADRI N, CALDERBANK A R. Space-time codes for high data rate wireless communication; performance criterion and code construction [J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1998,44(2):744-765.
- [7] Al-DHAHIR N,FRAGOULI C. Space-time processing for broadband wireless access[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(9):136-142.
- [8] TAROKH V, JAFARKHANI H, CALDERBANK A R. Space-time block codes from orthogonal design[J]. IEEE Trans. on Information Theory,1999,45(5):1456-1467.
- [9] SAYEED A M. Deconstructing multi-antenna fading channels [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(10):2563-2579.
- [10] LI Xiang-ming, LUO Tao, YUE Guang-xin, et al. A squaring method to simplify the decoding of orthogonal space-time block codes [J]. IEEE Transaction on Communications. 2001,49(10):1700-1703.

(编辑:郭继笃)

Investigation on space-time coding in confined areas

WANG Jian-kang, LUO Tao, LIU Dan-pu, YUE Guang-xin

(Telecomm Engineering School, Beijing University of Posts and

Telecommunications, Beijing 100876, P. R. China)

Abstract: The purpose of this paper is to investigate the performance and design of Space-Time code in strong correlated MIMO channels environments, such as tunnels, particularly in railway tunnels. In the conventional space-time code designs, it was commonly assumed that the channels associated with different antennas are statistically independent. Experimental results have shown MIMO channels in tunnels have strong correlation. In this paper, a design criterion of space-time coding for correlated MIMO channels is firstly acquired based on pairwise error probability (PEP) analysis. Following this, this paper proposes a new construction space-time block code which can compensate the impact of spatial strong correlation MIMO channels in tunnels on the system. At last, the theoretical analysis and simulation results are also presented to illustrate the performance of the new encoding scheme.

Key words: MIMO systems; wireless communication in confined areas; correlation channels, STBC