

## 一种基于 MIMO 空时分集的 HARQ 方法及其性能分析

王德胜 林宏志 朱光喜

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

**摘要:** 通常, MIMO 利用降低空时编码效率的方法, 在复用增益与分集增益乘积一定的约束条件下, 实现二者折衷; 该文则从系统设计的角度, 通过分析 VBLAST, HARQ, STBC 内在的联系, 构造一种新型的混合重传方法, 实现编码与 HARQ 二者平滑对接, 在保持空时码满的复用增益前提条件下, 以 HARQ 时延换取信噪比的提升, 额外引入分集增益。同时, 该文对信道相关性、重传时间与空间分集之间的重要关系作了系统深入的理论分析。仿真结果表明, 所提方法对不同信道环境下的系统性能均有较大的提升。

**关键词:** 无线通信; 相关衰落; 分集增益; HARQ; VBLAST; STBC

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)04-0794-05

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2008.01691

## A Novel HARQ for Space-Time Diversity in MIMO System

Wang De-sheng Lin Hong-zi Zhu Guang-xi

(Department of Electronics & Information Engineering, Huazhong Univeristy of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Generally in MIMO system, the tradeoff between multiplexing gain and diversity gain, under their definite product, can be obtained by decreasing the efficiency of space-time code. In this paper, according to analyzing the relationship among the VBLAST, HARQ and STBC, a novel HARQ scheme that implement the combining between space-time code and HARQ smoothly, was proposed. On the premise of full multiplexing gain, the HARQ delay can be transform into SNR gain, introducing diversity gain superfluity. Furthermore, the relationship among the channel correlation, retransmitting time and spatial diversity is deeply and systemically analyzed in the paper. The simulation results show the effectiveness of the proposed scheme.

**Key words:** Wireless communication; Correlated fading; Diversity gain; HARQ; VBLAST; STBC

### 1 引言

为了实现更高的数据传输速率和更高的可靠性, 必须克服无线信道衰落特性对系统性能带来的影响。为解决这一问题, Tarokh 等人提出运用 MIMO(Multi-Input Multi-Output)获得分集增益的空时码, 有效地对抗信道衰落; Foschini 等人提出基于空间复用的 VBLAST(Vertical Bell-Labs Layered Space Time)结构, 能极大地提高系统的频谱效率。但是系统往往需要在满足误码率的要求下使传输率尽可能的高, 而不是仅仅偏重一个方面, 这就需要将多天线的分集增益和复用增益统一为空间增益进行调配<sup>[1]</sup>。虽然空间增益的统一能有效地对抗多径衰落, 但无线通信系统仍需要一种自动请

求重传(ARQ)协议来保障数据包的可靠传输。由于 type-I 型 HARQ(Hybrid ARQ)在保证数据的无差错传输的同时会大大降低系统的容量<sup>[2,3]</sup>, 因此, 考虑将 HARQ 与空间增益结合将具有十分重要的意义。

HARQ 是采用跨层设计思想的一项重要技术, 并已被纳入 LTE(Long Term Evolution)及其后续系统框架。文献[4]研究了在满足数据链路层的误包率和延时的前提条件下, 使之前所传输失败的数据包也能获得充分利用, 提出一种递增冗余的 type-II 型 HARQ 物理层和数据链路层的跨层设计方法, 从而使其较普通的 ARQ 具有更优的性能。文献[5]提出了一种基于两发两收的多天线 HARQ, 将 HARQ 初步应用到 MIMO 系统中, 展现出空时码与 HARQ 相结合的内在潜力。

HARQ 与 MIMO 是较为自然的一种结合: 多天线系统可以通过 BLAST 和 STBC(Space Time Block Coding)的结合在分集增益与复用增益之间作折衷, 而 HARQ 是以重传时延换取信噪比增益与

2008-12-15 收到, 2010-01-13 改回

国家自然科学基金(60802009), 国家 863 计划项目(2008AA01Z204), 博士后基金一等资助(200704110279)和湖北省自然科学基金(2007ABA008)资助课题

通信作者: 王德胜 dswang@hust.edu.cn

分集增益。通过调整 BLAST 重传码字次序，能够实现这种编码与重传二者之间的平滑对接，适用于未来无线通信系统，为系统性能的提升提供一种很好的备选方案。另外由于 MIMO 所提供的空间多自由度，有理由相信 HARQ 用于 MIMO 中将会提供比单天线情形下的 HARQ 更优异的性能。

本文拟对现有两发两收的 HARQ 进行延伸，使其适用于任意多天线系统，利用空时编码与 HARQ 结合的新策略，提出一种星座重排的 HARQ 策略，一方面能保证 BLAST 高容量的优点，另一方面又能充分发掘 STBC 的空时分集，在不增加系统开销的条件下，为系统传输提供一种性能更优的传输手段。

文章将重点探讨以下几个方面：其一，设计较低复杂度的 MIMO-HARQ 结合方案，如正交(或准正交)空时分组码与 HARQ 的结合问题，以达到用较低的复杂度实现分集增益与复用增益灵活折衷的目的；其二，分析在有限信噪比条件下系统复用增益、分集增益与吞吐率(时延)三者之间的折衷关系。论文第 2 节引入一种结合空时码的新型 HARQ 策略；第 3 节展开对 VBLAST 以及新型 HARQ 性能分析；第 4 节是详细的仿真与结论。

标识说明：在以下叙述中， $E[\cdot]$ 表示求随机量的数学期望； $\mathbf{U}$  指酉方阵， $\mathbf{I}$  指单位方阵； $\|\cdot\|_F$  表示矩阵的 Frobenius 范数， $\text{tr}$  表示矩阵的迹操作， $r(\cdot)$  表示矩阵秩，粗体字母表示矩阵或者向量； $(\cdot)^*$ ， $(\cdot)^T$ ， $(\cdot)^H$ ， $(\cdot)^{-1}$  分别表示共轭、转置、Hermitian 转置、求逆； $\text{vec}(\cdot)$  表示将矩阵变换为列矢量算子。

## 2 空时码与 HARQ 结合的新策略

VBLAST 编码系统具有较高的频谱效率，但却具有较低的抗干扰能力，不可避免地存在数据的重传。当采用 Chase 合并 HARQ 时，各天线上信息未经任何变换就进行重传，重传数据为原始数据的完整复制，仅能获取时间上的分集增益；但如果设想将重发的数据经过星座空间重排后，则预期有望获取在时间与空间维度上的二重增益。以下以 4 发射天线为例，传输码阵如式(1)，分析 VBLAST 重传方法。

$$\begin{array}{c} \text{时间方向} \\ \downarrow \end{array} \begin{array}{c} \xrightarrow{\text{天线方向}} \\ \left[ \begin{array}{cccc} \mathbf{s}_1 & \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{pmatrix} \\ \mathbf{s}_i & \begin{pmatrix} -x_2^* & x_1^* & -x_4^* & x_3^* \end{pmatrix} \\ \vdots & \begin{pmatrix} x_3 & x_4 & x_1 & -x_2 \end{pmatrix} \\ \mathbf{s}_4 & \begin{pmatrix} -x_1^* & x_3^* & -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \end{array} \right] \end{array} \quad (1)$$

首次传输码阵的第 1 行，若不能正确译码，则将码字星座重排变换后，重传码阵的第 2 行，接收端将两次的接收矢量转变成一个包含 8 个元素的矢量  $\tilde{\mathbf{y}}$ ，对原始符号矢量  $\mathbf{s}$  作 ML 检测：

$$\hat{\mathbf{s}} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = \arg \min_{\mathbf{s} \in C} \|\tilde{\mathbf{y}} - \tilde{\mathbf{H}}\mathbf{s}\|^2$$

其中  $\tilde{\mathbf{y}} = [\mathbf{y}_1^T, \mathbf{y}_2^T]^T$ ， $\tilde{\mathbf{H}} = \text{diag}\{\mathbf{H}, \mathbf{H}\}$ ， $\tilde{\mathbf{s}} = [\mathbf{s}_1^T, \mathbf{s}_2^T]^T$ ，此处  $\mathbf{y}_1$ ， $\mathbf{y}_2$  分别为首次和第 2 次的接收信号矢量；若译码仍失败，则继续传码阵第 3 行；依次类推，直至传输完整的码阵；如果解码仍出错，则此后第  $m$  次重传与接收矩阵的第  $(m-1)\text{mod } 4+1$  行进行 chase 合并，充分利用干扰的独立性<sup>[6]</sup>，提升直至达到期望的性能。

从式(1)分析可知，VBLAST 通过星座变换重传，构成的码阵形式实质上可类似为 STBC 码字。而 STBC 由于具有(准)正交性特点，能获得满分集增益和较低的线性译码复杂度，STBC 也可以保证不完全码矩阵也具备一定的分集增益。通过 STBC 与 HARQ 的结合，有望实现空间复用增益与分集增益之间的灵活折衷，而且实现复杂度低，性能方面也有着很大的吸引力。

## 3 性能分析

本节将系统地分析无线信道状态矩阵、信道相关性、空间复用、分集增益等多个因素的内在关联，结合所提 HARQ 策略，深入详细地分析 BLAST 以及混合重传所形成的 STBC 的性能。

### 3.1 单纯性 V-BLAST 系统容量与性能分析

**3.1.1 基于 DFE 的 V-BLAST 检测算法简介** 为了分析方便，我们选择的是无排序处理的 DFE (Decision Feedback Equalizer)检测算法，其基本思想是从接收的混叠信号中先检测出某一发送符号，然后从接收信号中将此符号的影响减掉，接着重复以上的步骤直至全部  $N$  个( $N$  为发射天线数)发送信号全部检测完成。上述检测过程可用数学公式表述如下：对于 V-BLAST 系统，接收信号可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n} = \sum_{i=1}^N \mathbf{h}_i s_i + \mathbf{n} \quad (2)$$

式中  $\mathbf{h}_i$  为信道  $\mathbf{H}$  的第  $i$  列矢量， $\mathbf{n}$  为接收机引入的噪声矢量，另外把由  $\mathbf{H}$  的前  $k$  列  $\mathbf{h}_1, \dots, \mathbf{h}_k$  构成的矩阵记为  $\mathbf{H}_k$ 。

不失一般性，假设从第  $N$  个符号开始检测，这里采用 ZF (Zero Force)检测，具体步骤简述如下：

(1)  $k = N$ ；

(2) 求  $\mathbf{H}_k$  的 M-P 逆： $\mathbf{G}_k = \mathbf{H}_k^+ = (\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \cdot \mathbf{H}_k^H$ ，用  $\mathbf{G}_k$  的第  $k$  行  $\mathbf{g}_k^H$  乘以式(2)，得到  $s_k$  的检测  $\hat{s}_k$ 。由发射天线必须大于接收天线数的 VBLAST 译码的前提条件，即由列满秩可论证  $(\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)$  求逆的存在性。

(3) 将  $s_k$  的影响从接受信号  $\mathbf{y}$  中减掉，若不考虑误判的影响，则“新的”等效接收信号可表示为

$\mathbf{y} = \sum_{i=1}^{k-1} \mathbf{h}_i \mathbf{s}_i + \mathbf{n}$ , 即等效为  $k-1$  个发送符号的系统。

$k$  递减 1, 重复步骤(2)直至  $k$  等于 0。

综上, V-BLAST 的 DFE 解码过程可分解成如下  $N$  个标量符号的检测:

$$\mathbf{y}_k = s_k + \mathbf{g}_k^H \mathbf{n}, \quad \mathbf{g}_k^H = \mathbf{e}_k^H \mathbf{H}_k^+, \quad k = N, \dots, 1 \quad (3)$$

式中  $\mathbf{e}_k^H$  代表  $\mathbf{I}$  阵中的第  $k$  行。

**3.1.2 性能分析** 从式(3)可知, 若不考虑误判的影响, V-BLAST 系统可等效地看作是  $N$  个标量系统(即单输入单输出 SISO 系统)的并行级联, 因此对 V-BLAST 系统的容量与性能分析可分解成对  $N$  个标量系统的分析。由于对标量系统而言, 信道对其容量与误码率性能的影响都是仅由接收信噪比决定, 所以下文将把重点集中在对接收信噪比的分析上。

由式(3)可得, 第  $k$  个符号的检测信噪比(即等效接收信噪比)为

$$\begin{aligned} \text{SNR}_k &= \frac{E_s}{N_0 \mathbf{g}_k^H \mathbf{g}_k} = \frac{E_s}{N_0 \mathbf{e}_k^H (\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{e}_k} \\ &= A_k \frac{E_s}{N_0}, \quad k = N, \dots, 1 \end{aligned} \quad (4)$$

因此第  $k$  路检测信噪比的统计特性取决于  $A_k = (\mathbf{e}_k^H (\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{e}_k)^{-1}$  的统计特性, 为了分析  $A_k$  的分布特性, 需要以下两个引理<sup>[7]</sup>:

**引理 1** 若矩阵  $\mathbf{A}$  服从 Wishart 分布:  $\mathbf{A} \sim W_m(n, \mathbf{\Sigma})$ ,  $\mathbf{M}$  是  $k \times m$  矩阵且行满秩, 则  $\mathbf{MAM}^H$  也服从 Wishart 分布:  $\mathbf{MAM}^H \sim W_k(n, \mathbf{M}\mathbf{\Sigma}\mathbf{M}^H)$ 。

记号说明<sup>[4]</sup>:  $W_m(n, \mathbf{\Sigma})$  表示形如  $\sum_{i=1}^n \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H$  的随机矩阵分布, 其中  $\mathbf{h}_i$  互相独立且都服从均值为零、协方差矩阵为  $\mathbf{\Sigma}$  的  $m$  维矢量高斯分布。

**引理 2** 条件同引理 1, 则  $(\mathbf{MA}^{-1}\mathbf{M}^H)^{-1} \sim W_k(n - m + k, (\mathbf{M}\mathbf{\Sigma}^{-1}\mathbf{M}^H)^{-1})$ 。

为了能够获得一些实质性的结论, 本文仅考虑发射端空间相关的情况(事实上, 接收端相关情形下的统计特性分析是困难的), 即  $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$  满足 Wishart 分布:  $\mathbf{H}^H \mathbf{H} \sim W_N(M, \mathbf{\Sigma})$ , 这里  $\mathbf{\Sigma} = \mathbf{R}_T$ , 表示为发射端的相关矩阵。

对于  $A_k$ , 依引理 1 有:  $\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k = (\mathbf{H} \times \mathbf{I}_{N \times k})^H \cdot (\mathbf{H} \times \mathbf{I}_{N \times k}) = \mathbf{I}_{k \times N} \mathbf{H}^H \mathbf{H} \mathbf{I}_{N \times k} \sim W_k(M, \mathbf{\Sigma}_k)$  其中  $\mathbf{\Sigma}_k$  是  $\mathbf{\Sigma}$  的由其第 1 到  $k$  行与第 1 到  $k$  列所组成的主子矩阵。

由于  $\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k$  服从 Wishart 分布, 因此根据引理 2 可得:  $A_k = (\mathbf{e}_k^H (\mathbf{H}_k^H \mathbf{H}_k)^{-1} \mathbf{e}_k)^{-1} \sim W_1(M - k + 1, (\mathbf{e}_k^H \mathbf{\Sigma}_k^{-1} \mathbf{e}_k)^{-1})$ , 即  $A_k$  服从自由度为  $M - k + 1$ , 方差为  $(\mathbf{\Sigma}_k^{-1})_{kk}^{-1}$  的  $\chi^2$  分布。因此, 根据分集增益的定义,

可以看出检测第  $k$  个符号所对应的分集增益为  $M - k + 1$ ; 另外容易证明:  $(\mathbf{\Sigma}_k^{-1})_{kk}^{-1} \leq 1$ , 其中等号当且仅当  $\mathbf{\Sigma}_k$  为单位阵时成立, 亦即相关信道所对应的上述方差小于 i.i.d. 信道所对应的方差。从式(3)可见, 有效信噪比是与该方差成正比的, 因此信道的空间相关引起了有效信噪比的降低, 而另一方面,  $A_k$  的自由度是不受信道是否相关影响, 即固定为  $M - k + 1$ 。

综上, 我们得到以下推理:

**推理** 对于发射端空间相关且采用 ZF-DFE 检测方式的 V-BLAST 传输, 按照检测顺序,  $N$  个发送符号所对应的分集增益依次为  $M - N + 1, M - N + 2, \dots, M$ , 所对应的有效检测信噪比增益分别为  $(\mathbf{\Sigma}_{N-1}^{-1})_{NN}^{-1}, (\mathbf{\Sigma}_{N-1}^{-1})_{(N-1)(N-1)}^{-1}, \dots, \mathbf{\Sigma}_{11} (= 1)$ , 其中  $\mathbf{\Sigma}_k$  是由发射端相关矩阵  $\mathbf{\Sigma}$  的第 1 到  $k$  行与第 1 到  $k$  列所组成的主子矩阵。

### 3.2 HARQ 所形成的 STBC 编码性能分析

假定相关衰落环境下, MIMO 空间信道矩阵为  $\mathbf{H}_{M \times N}$ , 不失一般性, 采用的性能指标是成对差错概率(Pairwise Error Probability, PEP), 进行 PEP 分析可得到如式(5)PEP 上界。

$$\Pr(\mathbf{X} \rightarrow \widehat{\mathbf{X}}) \leq \frac{1}{\det\left(\mathbf{I}_{MN} + \frac{\rho}{4N} \mathbf{R}_H (\mathbf{R}_\Delta^T \otimes \mathbf{I}_M)\right)} \quad (5)$$

其中  $\mathbf{X}$  和  $\widehat{\mathbf{X}}$  为编码发射矩阵,  $\rho$  为信噪比,  $\mathbf{R}_\Delta = (\mathbf{X} - \widehat{\mathbf{X}})(\mathbf{X} - \widehat{\mathbf{X}})^H$ ,  $\mathbf{R}_H = \text{cov}(\text{vec}(\mathbf{H})) = \mathbf{R}_R \otimes \mathbf{R}_T$ ,  $\mathbf{R}_R$ ,  $\mathbf{R}_T$  分别为解耦的收发相关矩阵。

分析式(5)的分母进一步得

$$\begin{aligned} &\det\left(\mathbf{I}_{MN} + \frac{\rho}{4N} \mathbf{R}_H (\mathbf{R}_\Delta^T \otimes \mathbf{I}_M)\right) \\ &= \det\left(\mathbf{I}_{MN} + \frac{\rho}{4N} \mathbf{R}_H \mathbf{I}_{MN}\right) \\ &= \det\left(\mathbf{I}_{MN} + \frac{\rho}{4N} c \mathbf{R}_R \otimes \mathbf{R}_T\right) \\ &= \prod_{i=1}^{r(\mathbf{R}_R)} \prod_{j=1}^{r(\mathbf{R}_T)} \left(1 + \frac{\rho}{4N} c \lambda_i(\mathbf{R}_R) \lambda_j(\mathbf{R}_T)\right) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)中,  $c$  为矩阵归一化过程中提取的常数,  $r(\cdot)$ 、 $\lambda_i(\cdot)$  分别为矩阵的秩与第  $i$  个特征值。因此当信噪比即  $\rho$  很高时, 可忽略式(6)中的“1”, 式(5)可近似为

$$\begin{aligned} \Pr(\mathbf{X} \rightarrow \widehat{\mathbf{X}}) &\leq \left(\frac{\rho}{4N} c\right)^{-r(\mathbf{R}_R)r(\mathbf{R}_T)} \\ &\cdot \left(\prod_{i=1}^{r(\mathbf{R}_R)} \lambda_i(\mathbf{R}_R) \prod_{j=1}^{r(\mathbf{R}_T)} \lambda_j(\mathbf{R}_T)\right)^{-1} \end{aligned} \quad (7)$$

从式(7)可知, 相关衰落情形下 STBC 传输的分集增益为  $r(\mathbf{R}_R) \times r(\mathbf{R}_T)$  (显然若信道弥散足以丰富,

则  $\mathbf{R}_R$  和  $\mathbf{R}_T$  可能皆满秩, 则该增益为满分集增益  $M \times N$ ), 而编码增益则为  $\left( \prod_{i=1}^{r(\mathbf{R}_R)} \lambda_i(\mathbf{R}_R) \cdot \prod_{j=1}^{r(\mathbf{R}_T)} \lambda_j(\mathbf{R}_T) \right)^{-\frac{1}{r(\mathbf{R}_R)r(\mathbf{R}_T)}}$ 。由于相关矩阵  $\mathbf{R}_R$  和  $\mathbf{R}_T$  的迹皆恒定, 因此若信道弥散越弱, 则信道衰落相关性越强, 相应的相关矩阵的特征值扩展(即矩阵的最大特征值与最小非零特征值之比, 特征值非零个数即为空间自由度)越大, 从而  $\prod_{i=1}^{r(\mathbf{R}_R)} \lambda_i(\mathbf{R}_R)$  (或  $\prod_{j=1}^{r(\mathbf{R}_T)} \lambda_j(\mathbf{R}_T)$ ) 越小, 即编码增益越小。

因此, 从 3.1 节与 3.2 节分析可以看出, VBLAST 的译码方法每一层所能带来的分集增益为  $M-k+1$ , 每一层所包含的分集增益是不一样的, 那么在某些情况下, 若译码的第 1 个符号译码不准确, 必然出现错误率扩散的现象; 而通过星座重排 HARQ 后, 重传星座符号经过重新扰动, 能有效克服错误率扩散现象, 空间分集增益为  $r(\mathbf{R}_R) \times r(\mathbf{R}_T)$ , 是一个稳态值; 而且还能获取编码上的增益。

### 4 仿真分析

仿真中, 信道矩阵采用指数相关的形式<sup>[8]</sup>, 接收端相关矩阵元素:  $(\mathbf{R}_R)_{ij} = r_R^{|i-j|}$  ( $i, j = 1, \dots, M_R$ ); 发射端相关矩阵元素:  $(\mathbf{R}_T)_{ij} = r_T^{|i-j|}$  ( $i, j = 1, \dots, M_T$ );  $\mathbf{H}_w$  为独立同分布的矩阵, 其各元素间独立同分布, 则相关信道模型为:  $\mathbf{H} = \mathbf{R}_R^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_T^{1/2}$ 。不失一般性, 采用无信道编码的仿真系统; 为比较相关条件下的系统性能, 本文分别仿真了收发天线数为 4, 相关系数  $r_R = r_T$  分别为完全独立、弱相关 0.2、以及强相关 0.7 三种信道条件下的系统性能。具体从 BER、吞吐量(与传输次数/时延相关联)几个方面分析比较 HARQ chase 合并方法、以及本文提出的 HARQ 码字重排方法的性能。采用

MATLAB 仿真工具进行蒙特卡罗仿真, 具体比较以下两种典型 HARQ 的性能: (1)对于现有的传输方式, 采用 VBLAST 结构传输, 每次重传相同的符号矢量, 在接收端进行 Chase 合并, 检测算法采用 OSIC(Ordered Successive Interference Cancellation); (2)采用本论文推荐的 VBLAST\_HARQ\_STBC 方案, 即将 VBLAST 与经典 STBC 结合, 实现空时传输分集最大化。

图 1 为不同信道相关系数(0, 0.2, 0.7)条件下, 推荐方法与 Chase 合并方法的 BER 性能曲线; 图 2 为相应的吞吐量性能上的曲线, 吞吐量直接与衡量系统性能的另一项重要指标, 即重传时延成倒数关系。从图示分析可知, 从信道相关性角度而言, 信道的相关程度对系统性能有相当重要的影响, 信道空间相关性越小, 则系统性能越好。考察无信道编解码纠错时 BER 为 10%的性能, 信道独立时, 所提出方法对系统性能改善约 3-5 dB, 并随着相关性的增强, 性能都有所下降; 信道相关性较强时, 如相关系数为 0.7 时, 误码率与吞吐量均较差; 与前文中式(7)得出的相关性增强, 秩趋于秩亏, 分集增益  $r(\mathbf{R}_R)r(\mathbf{R}_T)$  降低, 误码率升高的结论一致。另一方面, 无论是在独立衰落或相关信道条件下, 在各项性能衡量指标中, 本文方法均明显优于现有 HARQ chase 合并方法。而且随着信道相关性的增强, 性能改善愈加明显。其原因在于本文方法在具备 Chase 合并单一的时间分集增益的基础上, 获取了额外的空间分集增益。理论分析与仿真结果均表明, 所提出方法能同时获取时间与空间上分集增益, 其性能改善相当明显。

### 5 结论

本文结合 MIMO 空时分集传输, 借鉴与发掘 BLAST 复用与 STBC 分集码字之间内在的联系, 提出一种新颖的 HARQ 传输策略, 将分集与复用统一为空间分集进行分析, 对现有的 HARQ 传输策略

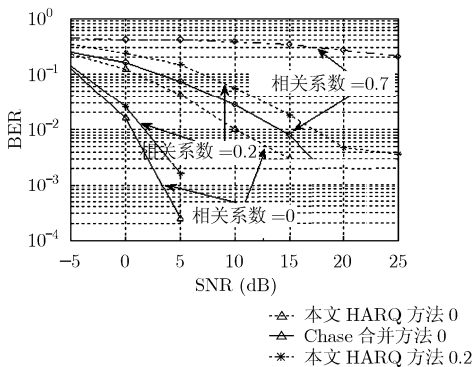


图 1 相关系数为 0, 0.2, 0.7 时 BER 性能比较

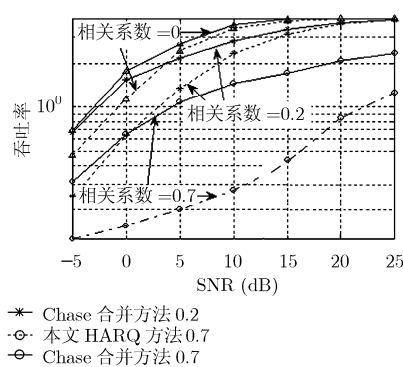


图 2 相关系数为 0, 0.2, 0.7 时吞吐量性能比较

无疑是一种新的尝试与补充; 论文对系统性能进行严谨的数学理论分析, 并给出了翔实的仿真结果。仿真与分析表明, 所提出的星座重排的 HARQ 策略, 一方面能保证 BLAST 高容量的优点, 另一方面又能充分发掘 STBC 的空时分集, 在不增加系统开销的条件下, 为系统传输提供一种性能更优的传输手段, 并为未来网络协同通信提供一种备选的传输方案。

### 参 考 文 献

- [1] Tse D N C, Viswanath P, and Zheng L Z. Diversity-multiplexing tradeoff in multiple access channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2004, 50(9): 1859-1874.
- [2] Wang Fang-gang, Peng Tao, and Wang Wen-bo. Multiple-input multiple-output system antenna subset selection with HARQ, IEEE PIMRC, Athens, Greece, September, 2007: 1-5.
- [3] Moh M, Moh T S, and Shih Y. On enhancing WiMAX hybrid ARQ: a multiple-copy approach. IEEE CCNC, Las Vegas, USA, Jan. 2008: 902-906.
- [4] 许玲玲, 袁东风. II型混合自动请求重传技术在跨层设计中的性能研究. 电子与信息学报, 2008, 30(4): 780-783.  
Xu Ling-ling and Yuan Dong-feng. Performance analysis of type-II HARQ in the cross layer design. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(4): 780-783.
- [5] Acolatse K and BarNess Y. Space time block coding HARQ scheme for highly frequency selective channels. IEEE ICC, English, May. 2007: 4416-4420.
- [6] Wang R and Lau V K N. Combined cross-layer design and HARQ for multiuser systems with outdated channel state information at transmitter (CSIT) in slow fading channels. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2008, 7(6): 2771-2777.
- [7] Murihead R J. Aspects of multivariate statistical theory[B]. 1982. New York: Wiley.
- [8] Asztély D. On antenna arrays in mobile communication systems: fast fading and gsm base station receiver algorithms. Royal Inst. Technol., Stockholm, Sweden, Tech. Rep. IR-S3-SB-9611, 1996, 5.
- 王德胜: 男, 1975年生, 副教授, 博士后, 研究方向为 MIMO 信息论、MIMO-OFDM 系统建模、空时信道建模、公平性资源调度等。
- 林宏志: 男, 1978年生, 讲师, 博士, 研究方向为新一代移动通信系统、多媒体及应用、信号处理等。
- 朱光喜: 男, 1945年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带多媒体通信等。