

文章编号:1001-9081(2009)06-1487-03

## MIMO 无线系统多空时发射分集功率分配算法

才科扎西

(西北民族大学 计算机科学与信息工程学院, 兰州 730030)

(caikzx08@163.com)

**摘要:**针对多输入多输出(MIMO)无线系统多空时发射分集(STTD)技术的符号检测问题,提出了一种有效的功率分配算法。该算法基于 QR 连续符号检测,在只需要少量反馈信道状态信息(CSI)的前提下对信道矩阵进行 QR 分解。对 R 矩阵的属性进行了统计分析,推导了平均误码率(BER)的闭环表达式与上界;通过最小化平均 BER 上界,给出了最优化的功率分配机制。详细的仿真实验及与现有算法的比较表明,提出算法的性能不仅与理论值完全吻合,而且具有更好的 BER 性能。

**关键词:**功率分配;误码率;空时发射分集;多输入多输出

**中图分类号:** TP393.03 **文献标志码:** A

## Power allocation algorithm of multiple space-time transmit diversity in MIMO wireless systems

CAIKEZAXI

(College of Computer Science and Information Engineering, Northwest University for Nationalities, Lanzhou Gansu 730030, China)

**Abstract:** Concerning the symbol detection of multiple Space-Time Transmit Diversity (STTD) in Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) wireless systems, an efficient power allocation algorithm was presented. Based on the QR-based successive detection, the proposed algorithm required only a few feedbacks Channel Status Information (CSI) from the receiver to decompose QR matrix. The statistical property of the R matrix was approved and the closed-form upper bound for the Bit Error Rate (BER) metric was obtained. By minimizing the upper bound, an optimal power allocation scheme was proposed. Detailed simulation results and comparisons with the existing algorithms prove that, not only the experimental results of the proposed algorithm coincide with the theoretical results completely but also it is of better BER.

**Key words:** power allocation; Bit Error Rate (BER); Space-Time Transmit Diversity (STTD); Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)

### 0 引言

在第三代移动通信中,为了满足无线通信系统高速率业务的要求,均支持空时发射分集(Space-Time Transmit Diversity, STTD)技术<sup>[1]</sup>。STTD 是一种采用 Alamouti 空时分组编码(Space Time Block Code, STBC)<sup>[1]</sup>,使用两个发射天线和一个接收天线能够获得两阶分集增益的多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统,因其译码简单,有效地提高了无线衰落信道的传输性能。为了进一步提高数据传输速率,许多研究机构提出了发射天线多于两个的 MIMO 方式——多 STTD 技术,如 DSTTD(Double STTD)模式,以及 TSTTD(Triple STTD)模式<sup>[2]</sup>,可以获得更高阶的分集增益、传输速率和容量<sup>[3]</sup>。尽管多 STTD 技术具有良好的性能,但实际系统由于受到噪声干扰与多径衰落等因素的影响,使得设计有效的符号检测算法尤为重要。目前的系统多采用复杂度低的线性检测算法<sup>[6-7]</sup>,但其性能并不理想。为了提高符号检测的性能,目前的研究<sup>[4]</sup>大多采用符号功率分配与 QR 接收器的方式提高系统的误码率(Bit Error Rate, BER)性能。文献[5]以平均 BER 为性能指标,描述系统平均误码率的下界,该符号检测方法不仅简单而且具有与理论值非常接近的性能。当发送端已知部分的信道状态信息(Channel

Status Information, CSI)时,可以采用对角预编码器实现垂直贝尔实验室空时码(Vertical-Bell Labs Layered Space-Time Architecture, V-BLAST)的检测<sup>[6]</sup>,并通过调整天线的发送功率提高系统的 BER 性能。

尽管也有不少的工作对提高符号检测的性能进行了研究,但这些方法都假设发送端已知信道状态信息 CSI,这与实际系统并不相符。本文针对 MIMO 无线系统多 STTD 符号检测问题,提出了一种有效的功率分配算法。该算法基于 QR 连续符号检测,在只需要接收端反馈少量 CSI 的前提下对信道矩阵进行 QR 分解,并对 R 矩阵的属性进行了统计分析,给出了平均 BER 的表达式与上界;通过最小化平均 BER 上界,给出了最优化的功率分配机制。

### 1 功率分配算法

#### 1.1 信道矩阵的 QR 分解

考虑采用 4 个发射天线和 2 个接收天线的 DSTTD 系统,调制后的数据流被分成两路,每一路分别进行 STTD 编码,然后产生的 4 路数据再根据所需技术进行调制。信道矩阵  $H$  的 QR 分解可以表示为:

$$H \xrightarrow{\text{QR}}$$

收稿日期:2008-12-15;修回日期:2009-02-26。

基金项目:国家 863 计划项目(AA2006010101);教育部科学技术研究重点项目(105172)。

作者简介:才科扎西(1964-),男(藏族),青海贵德人,副教授,硕士,主要研究方向:无线通信、计算机网络。

$$\begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & q_{14} \\ -q_{12}^* & q_{11}^* & -q_{14}^* & q_{13}^* \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ -q_{22}^* & q_{21}^* & -q_{24}^* & q_{23}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & R_{13} & R_{14} \\ 0 & R_{22} & -R_{14}^* & R_{13}^* \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于有  $R_{11} = R_{22}, R_{33} = R_{44}$ , 因此只需要确定  $R_{11}$  和  $R_{33}$  的概率密度函数。其中  $R_{11}$  为:

$$R_{11} = \sqrt{\det(\mathbf{H}_1) + \det(\mathbf{H}_3)} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{H}_1$  和  $\mathbf{H}_3$  为 Alamouti 块矩阵, 其矩阵行列式值为:

$$\det(\mathbf{H}_1) = |h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 \quad (3)$$

$$\det(\mathbf{H}_3) = |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2 \quad (4)$$

假设  $h_{ij}$  为均值为零的高斯随机变量, 实部和虚部的方差为  $0.5, 2|h_{ij}|^2$  满足自由度为 2 的均方分布, 因此有:

$$2R_{11}^2 = 2|h_{11}|^2 + 2|h_{12}|^2 + 2|h_{21}|^2 + 2|h_{22}|^2 \quad (5)$$

$2|R_{11}|^2$  的概率密度函数可以表示为:

$$p(2|R_{11}|^2) = \frac{(2|R_{11}|^2)^3 e^{-R_{11}^2}}{16\Gamma(4)} \quad (6)$$

定义  $r_1 = |R_{11}|$ , 则  $|R_{11}|$  的概率密度函数为:

$$p(r_1) = \frac{2r_1^7 e^{-r_1^2}}{6} \quad (7)$$

对于  $R_{33}$  有:

$$R_{33} = \sqrt{\frac{\det(\mathbf{H})}{\det(\mathbf{H}_1) + \det(\mathbf{H}_3)}} \quad (8)$$

为了计算  $\det(\mathbf{H})$ , 引入定理 1。

**定理 1** 对于方阵  $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}$ , 如果  $\mathbf{A}$  可逆, 则有:

$$\det(\mathbf{M}) = \det(\mathbf{A}) \det(\mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B}) \quad (9)$$

证明 当  $\mathbf{A}^{-1}$  存在时, 显然有:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_m & \mathbf{0}_{m,n} \\ -\mathbf{CA}^{-1} & \mathbf{I}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0}_{n,m} & \mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (10)$$

带入矩阵行列式有:

$$\det(\mathbf{M}) = \begin{vmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0}_{n,m} & \mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B} \end{vmatrix} = \det(\mathbf{A}) \det(\mathbf{D} - \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B}) \quad \text{证毕}$$

根据定理 1 有:

$$R_{33} = \sqrt{\frac{\det(\mathbf{H}_1) \det(\mathbf{H}_4) - \det(\mathbf{H}_3) \det(\mathbf{H}_2) - 2U}{\det(\mathbf{H}_1) + \det(\mathbf{H}_3)}} \quad (11)$$

其中:

$$U = \operatorname{Re}\{h_{24}(h_{21}^* h_{14} h_{11} + h_{22}^* h_{11} h_{13} + h_{22}^* h_{14} h_{12} - h_{21}^* h_{12} h_{13}) + h_{23}(h_{21}^* h_{11} h_{13} + h_{21}^* h_{14} h_{12} + h_{22}^* h_{12} h_{13} - h_{22}^* h_{14} h_{11})\} \quad (12)$$

可得  $2|R_{33}|^2$  的概率分布为:

$$p(2|R_{33}|^2) = \frac{2|R_{33}|^2 e^{-R_{33}^2}}{4\Gamma(2)} \quad (13)$$

用  $r_3$  表示  $|R_{33}|$ , 则  $|R_{33}|$  的估计概率密度函数为:

$$p(r_3) = 2r_3^3 e^{-r_3^2} \quad (14)$$

## 1.2 功率分配

考虑瑞利平坦衰落信道情况下的  $4 \times 2$  DSTTD 接收系统, 噪声信号均值为 0 单位方差的复高斯随机变量。在发送

端, 发送功率由信道状态信息 CSI 决定, 并在进行 Alamouti 空时编码前分配给每个发送符号。接收信号采用 QR 连续检测接收, 则接收矢量为:

$$\tilde{\mathbf{y}} = \mathbf{R}\mathbf{P}\mathbf{x} + \tilde{\mathbf{n}} \quad (15)$$

表达式(15) 进一步可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \\ \tilde{y}_3 \\ \tilde{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & R_{13} & R_{14} \\ 0 & R_{11} & -R_{14}^* & R_{13}^* \\ 0 & 0 & R_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{n}_1 \\ \tilde{n}_2 \\ \tilde{n}_3 \\ \tilde{n}_4 \end{bmatrix} \quad (16)$$

考虑正交相移键控 (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) 调制, 当  $R_{11}$  和  $R_{33}$  的概率密度函数已知时, 对于 DSTTD 系统平均 BER 的功率为:

$$P_{el} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 Q(\sqrt{\rho} |p_i R_{ii}|) \quad (17)$$

其中  $Q(x)$  为:

$$Q(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{\infty} e^{-x^2/2} dy \quad (18)$$

对于 DSTTD 系统有  $R_{11} = R_{22}, R_{33} = R_{44}$ , 将  $R_{11}$  和  $R_{33}$  的概率密度函数表达式(8) 和(13) 带入(17) 有:

$$P_{el} = \frac{1}{4} \left( \sum_{i=1}^2 \int_0^{\infty} Q(\sqrt{\rho} |p_i| r_1) \times \frac{2r_1^7 e^{-r_1^2}}{6} dr_1 + \sum_{i=3}^4 \int_0^{\infty} Q(\sqrt{\rho} |p_i| r_3) \times \frac{2r_3^3 e^{-r_3^2}}{6} dr_3 \right) \quad (19)$$

根据  $Q(x)$  的 Chernoff 边界可得其上界:

$$P_{el} \leq \frac{1}{4} \left( \sum_{i=1}^2 \int_0^{\infty} \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}\rho |p_i|^2 r_1^2} \times \frac{2r_1^7 e^{-r_1^2}}{6} dr_1 + \sum_{i=3}^4 \int_0^{\infty} \frac{1}{2} e^{-\frac{1}{2}\rho |p_i|^2 r_3^2} \times \frac{2r_3^3 e^{-r_3^2}}{6} dr_3 \right) \leq \frac{1}{8} \left[ \sum_{i=1}^2 \left( 1 + \frac{1}{2}\rho |p_i|^2 \right)^{-4} + \sum_{i=3}^4 \left( 1 + \frac{1}{2}\rho |p_i|^2 \right)^{-2} \right] \quad (20)$$

为了降低 BER, 减小符号间干扰, 上述问题可以表示为选择合适的功率使得 DSSTD 系统平均 BER 的功率下边界最小:

$$\min_{p_u} \frac{1}{8} \left[ \sum_{i=1}^2 \left( 1 + \frac{1}{2}\rho |p_i|^2 \right)^{-4} + \sum_{i=3}^4 \left( 1 + \frac{1}{2}\rho |p_i|^2 \right)^{-2} \right] \quad (21)$$

并满足约束条件:

$$\sum_{i=1}^4 |p_i|^2 = 4 \quad (22)$$

根据拉格朗日乘法引入参数  $\lambda$ , 定义  $F$ :

$$F = \frac{1}{8} \left( \sum_{i=1}^2 \left( 1 + \frac{1}{2}\rho |p_i|^2 \right)^{-4} + \sum_{i=3}^4 \left( 1 + \frac{1}{2}\rho |p_i|^2 \right)^{-2} \right) - \lambda \sum_{i=1}^4 |p_i|^2 \quad (23)$$

由  $\Delta F = 0$  可得:

$$|p_i|^2 = \begin{cases} \frac{2}{\rho} \left[ \left( \frac{\rho}{4\lambda} \right)^{1/5} - 1 \right], & i = 1, 2 \\ \frac{2}{\rho} \left[ \left( \frac{\rho}{8\lambda} \right)^{1/3} - 1 \right], & i = 3, 4 \end{cases} \quad (24)$$

将式(24) 带入约束条件(22) 有:

$$\sum_{i=1}^2 \left( \frac{\rho}{4\lambda} \right)^{1/5} + \sum_{i=3}^4 \left( \frac{\rho}{8\lambda} \right)^{1/3} = 2(\rho + 2) \quad (25)$$

根据式(25) 可计算出  $\lambda$ , 可得优化的功率分配值  $|p_i|^2$  ( $i \in [1, 4]$ )。

上述功率分配算法可以进一步应用到多 STTD 系统中实现功率分配。

考虑  $6 \times 3$  STTD 系统, 当采用 QR 连续检测时, 系统的等效信道矩阵  $H$  为:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} & h_{15} & h_{16} \\ -h_{12}^* & h_{11}^* & -h_{14}^* & h_{13}^* & -h_{16}^* & h_{15}^* \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} & h_{25} & h_{26} \\ -h_{22}^* & h_{21}^* & -h_{24}^* & h_{23}^* & -h_{26}^* & h_{25}^* \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} & h_{35} & h_{36} \\ -h_{32}^* & h_{31}^* & -h_{34}^* & h_{33}^* & -h_{36}^* & h_{35}^* \end{bmatrix} \quad (26)$$

经过 QR 分解后, 得  $R$  矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & 0 & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ & R_{11} & -R_{14}^* & R_{13}^* & -R_{16}^* & R_{15}^* \\ & & R_{33} & 0 & R_{35} & R_{36} \\ & & & R_{33} & -R_{36}^* & R_{35}^* \\ & & & & R_{55} & 0 \\ & & & & & R_{55} \end{bmatrix} \quad (27)$$

同理可得  $|R_{11}|$ 、 $|R_{33}|$  与  $|R_{55}|$  的概率密度函数为及其功率的上边界, 采用相同的优化算法可得优化的功率分配值  $|p_i|^2$  ( $i \in [1, 6]$ ), 这里从略。

## 2 仿真结果

采用仿真软件 Matlab 进行实验, 并用 fmincon 函数实现参数的计算与功率优化。考虑瑞利平坦衰落信道情况下的接收系统, 噪声信号均值为零单位方差的复高斯随机变量。为了说明本文算法的有效性, 将提出的算法与 ZF-VBLAST<sup>[6]</sup>、线性迫零 (Zero Forcing, ZF)<sup>[7]</sup> 检测算法进行比较。实验包括两部分:  $4 \times 2$  DSTTD 系统性能实验;  $6 \times 3$  TSTD 系统性能实验。

图 1 所示为  $4 \times 2$  DSTTD 系统, 采用 QPSK 调制方式时平均 BER 的理论分析与仿真结果。从图 1 中可以看出, 采用优化的功率分配机制的实验结果与理论分析结果基本上吻合, 验证了提出的功率分配算法在各种信噪比 (Signal Noise Ratio, SNR) 的情况下, 都具有良好的性能。另外, 在相同的 BER 情况下, 采用功率分配算法后的 SNR 明显低于无功率分配的情况, 其原因在于通过合理的功率分配, 使得发送端的各个天线之间的抗噪性能与克服多径衰落性能得到优化, 降低了符号间的串扰, 有效地降低了信号的发射功率, 进而提高了系统的 SNR。

图 2 所示为  $4 \times 2$  DSTTD 系统, 采用 QPSK、8PSK 与 16QAM 调制方式时的性能比较。如图所示, 随着调制级数的增加, 系统的 BER 性能有所降低。另一个现象是, 对于同一调制方式, 当采用功率分配算法时, 系统的性能优于无功率分

配的情况, 而且功率分配算法所带来的性能增益随调制级数的增加而逐渐减少。其原因是随着调制星座大小的增加, 相邻的星座越近, 这将使得符号间的影响更大, 因此性能增益更小。

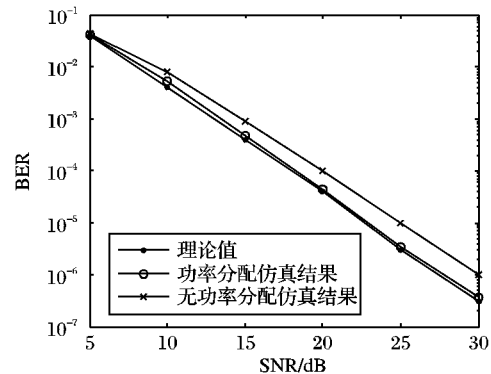


图 1  $4 \times 2$  DSTTD 系统平均 BER 的理论分析与仿真结果比较

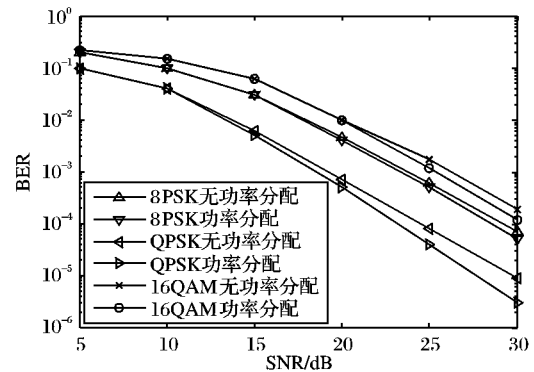


图 2  $4 \times 2$  DSTTD 系统不同调制方式时功率分配比较

图 3 所示为  $4 \times 2$  DSTTD 系统, 采用 QPSK 调制方式时三种不同的检测算法的性能比较结果。从图中可以看出, 线性 ZF 检测算法的性能最差。本文的功率分配算法的检测性能与 ZF-VBLAST 相当。在相同的 BER 情况下, 本文的功率分配算法的增益与线性 ZR 检测算法相比, 随 BER 的增加而增加, 其差值从 BER 为  $10^{-1}$  的 0.3 dB 增加到 BER 为  $10^{-4}$  的 2 dB。另外, 采用平均 BER 的方式使得系统的性能与瞬时信道状态无关, 因此只需要接收端反馈少量的 CSI 信息即可实现信道矩阵的有效估计, 提高了功率分配的准确性。

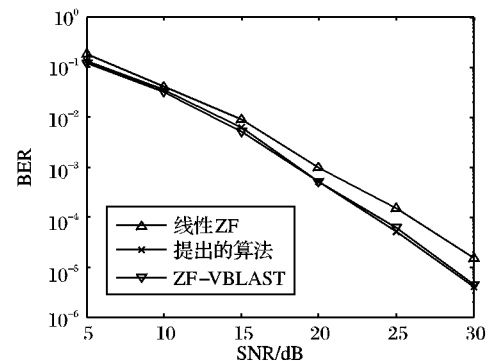


图 3  $4 \times 2$  DSTTD 系统不同检测算法的平均误码率

图 4 所示为  $6 \times 3$  TSTD 系统, 采用 QPSK 调制方式时三种不同的检测算法的性能比较结果。从图中可以看到与图 3 相似的结论: 线性 ZF 检测算法的性能最差; ZF-VBLAST 的性能居中, 而本文算法的性能最优。与图 3 中的结果相比不同的是, 采用功率分配算法时  $6 \times 3$  TSTD 系统的性能与  $4 \times 2$  TSTD 系统相比, 提高了 1.5 dB, 这表明通过增加发送与接收天线的数量, 可以提高系统的增益。 (下转第 1493 页)

个半径为  $R = 75$  的节点就可以覆盖整个  $100 \times 100$  区域),所以新算法基本上在各种情况下都可以找到最好的结果。而[7]的算法得到的 CDS 大小始终徘徊在 2~3 之间。

图4展示了第二组实验的结果。横坐标都不是从0开始,是因为传输半径  $R$  太小时( $<16$ ),在  $100 \times 100$  的平面随机产生的节点很难构成连通图,因此为了保证实验的随机性,传输半径从16开始。

从图4中可以看出,新算法在各种情况下都好于文献[7]的算法,

综上所述,实验结果显示新算法较之文献[7]的算法具有更好的性能。

## 4 结语

连通支配集在网络通信领域有着广泛的用途,深入分析了现有一些 CDS 求解算法,在此基础上,得到了关于 CDS 的一个新特性,即最小 CDS 是图的一棵包含最多叶子节点的生成树中的非叶子节点的集合。根据这个结论,设计了一种全新的寻找 CDS 的策略,即通过建立一棵含叶子节点较多的生成树来寻找一个较小的 CDS。随后给出了一种基于最小生成树的方法来建立一棵含叶子节点多的生成树。理论分析和对比实验表明,新算法较前人的算法有明显的改进。

### 参考文献:

- [1] NI S Y, TSENG Y C, CHEN Y S. The broadcast storm problem in a mobile Ad Hoc network [C]// *MobiCom'99: Proceedings of the 5th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking*. [S. l.]: ACM Press, 1999: 152–162.
- [2] DAI F, WU J. Performance analysis of broadcast protocols in Ad Hoc networks based on self-pruning [J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2004, 15 (11): 1–13.
- [3] 彭伟,卢锡城. 一个新的分布式最小连通支配集近似算法[J]. *计算机学报*, 2001, 24 (3): 254–258.
- [4] DAS B, HARGHAVAN V B. Routing in Ad Hoc networks using minimum connected dominating sets [C]// *ICC'97: IEEE International Conference on Communications*. Monreal, Quebec: IEEE Press, 1997: 1–20.
- [5] LEE J, MANS B. Energy efficient virtual backbones for reception aware MANET [C]// *VTC 2006-Spring: Proceedings of the 63rd IEEE Vehicular Technology Conference*. Montreal: IEEE, 2006, 3: 1097–1101.
- [6] 许力,林志伟. 基于图着色的无线自组网极小连通支配集算法[J]. *通信学报*, 2007, 28(3): 108–114.
- [7] GUHA S, KHULLER S. Approximation algorithms for connected dominating sets [J]. *Algorithmica*, 1998, 20 (4): 374–387.
- [8] WU J, LI H. On calculating connected dominating set for efficient routing in Ad Hoc wireless networks [C]// *Proceedings of the 3rd International Workshop on Discrete Algorithms and Methods for Mobile Computing and Communications*. Seattle: ACM, 1999: 7–14.
- [9] WAN P, ALZOUBI K, FRIEDER O. Distributed construction of connected dominating set in wireless Ad Hoc networks [C]// *IEEE INFOCOM'02*. Washington, DC: IEEE press, 2002: 141–149.
- [10] CORMEN T H, LEISERSON C E, RIVEST R L, *et al.* Introduction to Algorithms[M]. 2nd. Cambridge, MA: The MIT press, 2001.
- [11] KARPINSKY M, ZELIKOVSKY A. New approximation algorithms for the Steiner tree problem [J]. *Journal of Combinatorial Optimization*, 1997, 1(1): 47–65.
- [12] GALLAGER R G, HUMBLET P A, SPIRA P M. A distributed algorithm for minimum-weight spanning trees [J]. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, 1983, 5(1): 66–77.

(上接第1489页)

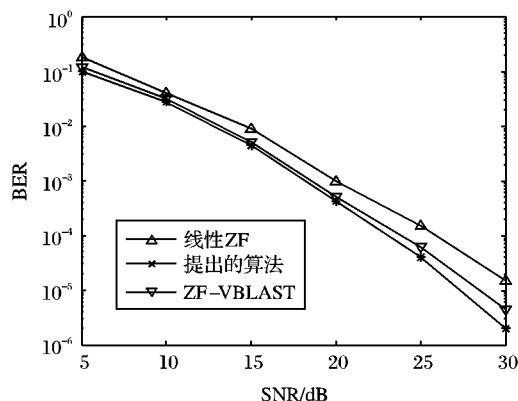


图4  $6 \times 3$  TSSTD 系统不同检测算法的平均误码率

## 3 结语

针对实际 MIMO 无线系统多 STTD 系统受噪声干扰与多径衰落影响的符号检测问题,提出了一种有效的基于 QR 分解的线性检测与功率分配算法。该算法基于 QR 连续符号检测,采用平均 BER 的方式使得系统的性能与瞬时信道状态无关,因此只需要接收端反馈少量的 CSI 信息即可实现信道矩阵的有效估计,提高功率分配的准确性。通过最小化平均 BER 上界,得到了最优化的功率分配机制。该方法同时适用于其他多 STTD 系统。详细的仿真实验结果表明,提出算法的性能与理论值一致;与不采用功率分配算法时相比,平均 SNR 提高约 2 dB;增加发送与接收天线的数量,可以进一步提

高系统的增益。

### 参考文献:

- [1] ALAMOUTI S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. *IEEE JSAC*, 1998, 16(8): 1451–1458.
- [2] ONGGOSANUSI E N, DABAK A G, SCHMIDL T M. High rate space-time block coded scheme: Performance and improvement in correlated fading channels [C]// *Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking*. New Jersey: IEEE press, 2002: 194–199.
- [3] SHIM S, KIM K, LEE C. An efficient antenna shuffling scheme for a DSTTD system [J]. *IEEE Communication Letters*, 2005, 9(2): 124–126.
- [4] KALBASI R, FALCONER D D, BANIHASHEMI A H. Optimum power allocation for a V-BLAST system with two antennas at the transmitter [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 9 (9): 826–828.
- [5] YAN Z, WONG K M, LUO Z Q. Optimal diagonal precoder for multiantenna communication systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(6): 2089–2100.
- [6] GOLDEN G, FOSCHINI G J, VALENZUELA R A, *et al.* Detection algorithm and initial laboratory results using V-BLAST space-time communication architecture [J]. *IEE Electronics Letters*, 1999, 35 (1): 14–16.
- [7] MCKAY M R, COLLINGS I B. Capacity and performance of MIMO-BICM with zero-forcing receivers [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2005, 53(1): 74–83.