

存在信道相关及估计误差时 V-BLAST 系统的功率分配算法

谭伟¹ 陈小敏^{1,2} 朱益民¹ 朱秋明^{1,2} 党小宇^{1,2}

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室, 南京航空航天大学, 南京, 210016)

摘要: 针对信道相关及存在信道估计误差的垂直分层空时 (Vertical bell lab layered space-time, V-BLAST) 系统, 提出以最小化误比特率 (Bit error rate, BER) 为优化目标的自适应功率分配算法。通过系统建模和性能分析, 由接收信号子流的瞬时信干噪比 (Signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR), 推导出系统子流的平均 BER 闭式表达式。发送端在总功率约束条件下, 以瞬时 BER 为优化目标, 利用拉格朗日极值法得到自适应功率分配矩阵。仿真结果表明, 信道相关及估计误差对 V-BLAST 系统的 BER 性能有极大影响, 采用所提算法可显著改善系统的 BER 性能并更具实用性。

关键词: 信道相关; 垂直分层空时; 估计误差; 误比特率; 自适应功率分配

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A

Power Allocation Algorithm for Correlated V-BLAST System with Channel Estimation Error

Tan Wei¹, Chen Xiaomin^{1,2}, Zhu Yimin¹, Zhu Qiuming^{1,2}, Dang Xiaoyu^{1,2}

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China; 2. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: An adaptive transmit power allocation (TPA) scheme to minimize bit error rate (BER) is investigated in a vertical bell labs layered space-time (V-BLAST) system with channel correlation and estimation error. The closed expression for average BER can be derived according to the instantaneous signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) of each sub-stream by system modeling and performance analysis. At the transmitter, with the total TPA constraint condition, TPA matrix is calculated through the Lagrange multiplier method. Numerical results demonstrate that the correlation structure and channel estimation error have a profound effect on the performance of V-BLAST system. The proposed TPA scheme can improve the BER performance effectively and be practical for the actual communication system.

Key words: channel correlation; V-BLAST; estimation error; bit error rate (BER); adaptive power allocation

引言

垂直分层空时(Vertical-bell lab layered space-time, V-BLAST)结构是一种性能突出的多输入多输出(Multiple-input multiple-output, MIMO)结构,由于其不需要复杂的编码且频谱利用率高等优点而备受关注^[1]。功率分配算法作为一种简单可行的链路自适应技术结合 V-BLAST 结构被大量研究^[1,2]。

功率分配算法的性能取决于信道状态信息(Channel state information, CSI),在实际应用中,由于信道相关性^[3-4]及信道估计误差^[5-7]的存在,很难获得完全的 CSI。文献[5,6]分析了存在信道估计误差时 V-BLAST 系统性能,并给出相应的功率分配方案。文献[4]虽然分析了相关信道对 V-BLAST 系统性能的影响,但却只适用于发射天线数为 2 的情况;文献[8]给出了在发送天线在相关时 V-BLAST 系统的功率分配算法,提出一种基于预编码方法以去除天线间的相关性。虽然文献[5,8]中所提功率分配算法较之文献[1]有所改进,但却只针对迫零(Zero forcing, ZF)检测算法,而未考虑最小均方误差(Minimum mean square error, MMSE)检测算法;同时也只是将估计误差及信道相关作为单一影响因子加以研究;此外,文献[8]中的系统模型仅考虑了收发天线数相同的情况,对于收发天线数不同的系统并未研究。

为提高功率分配算法的实用性,本文所提功率分配算法同时考虑信道相关及估计误差,通过系统建模及公式变换求解出各子流的信干噪比,证明了等效噪声方差与估计误差有关而独立于各子流的发送功率及信道相关系数,给出系统平均 BER 的闭式表达式。仿真结果表明,信道相关及估计误差同时影响系统的 BER 性能;与采用等功率分配算法相比,所提功率分配算法可显著改善系统 BER 性能。

1 系统模型与信道模型

1.1 系统模型

考虑一个有 M 根发射天线, N 根接收天线($N \geq M$)的 V-BLAST 系统,来自信源的二进制比特流经过信道编码、 2^k -QAM 调制、空时变换及功率加载后发送出去,某一时刻接收信号可表示为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ 为发送信号; $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$ 为接收信号; \mathbf{H}_w 为信道矩阵,其元素 $h_{ji} \sim \text{CN}(0, 1)$ 表示从第 i 根发射天线到第 j 根接收天线的信道增益, $\text{CN}(\mu, \sigma^2)$ 表示均值为 μ , 方差为 σ^2 的复高斯分布; \mathbf{n} 为加性高斯白噪声,其元素 $n_i \sim \text{CN}(0, \sigma_n^2)$, $\mathbf{P} = \text{diag}(\sqrt{P_1}, \sqrt{P_2}, \dots, \sqrt{P_M})$ 为功率分配矩阵满足总功率约束条件。V-BLAST 系统模型如图 1 所示。

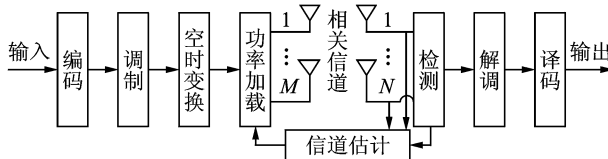


图 1 存在信道相关及估计误差时的系统模型

Fig. 1 System model based on channel correlation and estimation error

1.2 信道模型

本文采用指数相关模型^[9], \mathbf{R}_t 表示指数相关矩阵,并满足

$$\mathbf{R}_t = \mathbf{R}_t^{1/2} \cdot (\mathbf{R}_t^{1/2})^H \quad (2)$$

功率分配与信道状态信息紧密相关,然而在接收端,由于估计误差的影响而无法获得完全的 CSI。

实际信道矩阵 \mathbf{H}_w 与估计信道矩阵 $\hat{\mathbf{H}}_w$ 的关系可表示为^[5,7]

$$\mathbf{H}_w = \hat{\mathbf{H}}_w + \boldsymbol{\Xi} \quad (3)$$

式中: $\boldsymbol{\Xi} \in \mathbf{C}^{N \times M}$ 表示信道估计误差矩阵, 其元素 $e_{i,j} \sim \text{CN}(0, \sigma_e^2)$ 为独立同分布的高斯随机变量, $\hat{h}_{i,j} \sim \text{CN}(0, 1 - \sigma_e^2)$ 为估计信道 $\hat{\mathbf{H}}_w$ 的第 i 行第 j 列元素, 将式(3)代入式(1)得

$$\mathbf{y} = (\hat{\mathbf{H}}_w + \boldsymbol{\Xi}) \mathbf{R}_i^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{n} = \hat{\mathbf{H}}_w \mathbf{R}_i^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{x} + \boldsymbol{\Xi} \mathbf{R}_i^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (4)$$

定义 $\mathbf{H} = \hat{\mathbf{H}}_w \mathbf{R}_i^{1/2}$ 及 $\hat{\mathbf{n}} = \boldsymbol{\Xi} \mathbf{R}_i^{1/2} \mathbf{P} \mathbf{x} + \mathbf{n}$, 其中 $\hat{\mathbf{n}}$ 为等效噪声, 因此式(4)可写为

$$\mathbf{y} = \mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{x} + \hat{\mathbf{n}} \quad (5)$$

等效噪声方差为

$$\epsilon(\hat{\mathbf{n}}^H) = (\sigma_e^2 \|\mathbf{R}_i^{1/2} \mathbf{P}\|_F^2 + \sigma_n^2) \mathbf{I}_N \quad (6)$$

式中: $\|\cdot\|_F$ 表示 Frobenius 范数, $\epsilon(\cdot)$ 表示求均值。

由矩阵论中 Frobenius 范数的相关性质

$$\|\mathbf{A}\mathbf{B}\|_F^2 = \text{tr}(\mathbf{B}^H \mathbf{A}^H \mathbf{A} \mathbf{B}) \quad (7)$$

式中: $\text{tr}(\cdot)$ 表示主对角线上元素之和, 因此式(6)可表示为

$$\epsilon(\hat{\mathbf{n}}^H) = (\sigma_e^2 \text{tr}(\mathbf{P}^H (\mathbf{R}_i^{1/2})^H \mathbf{R}_i^{1/2} \mathbf{P}) + \sigma_n^2) \mathbf{I}_N = (\sigma_e^2 \text{tr}(\mathbf{P}^H \mathbf{R}_i^H \mathbf{P}) + \sigma_n^2) \mathbf{I}_N = (M\sigma_e^2 + \sigma_n^2) \mathbf{I}_N \quad (8)$$

由此证明等效噪声方差 $\hat{\sigma}_n^2 = M\sigma_e^2 + \sigma_n^2$ 与各天线间的发送功率无关, 只与总发射功率、估计误差矩阵的方差以及加性噪声方差有关。此外, 在高信噪比条件下, 当估计误差较大时, 等效噪声方差几乎完全由 σ_e^2 决定, 此时 σ_e^2 严重影响系统性能。

2 V-BLAST 系统的 BER

2.1 各子流瞬时 BER

接收端分别采用 ZF 及 MMSE 准则对接收信号进行排序干扰抵消检测, 第 k_i 个输出各子流的信干噪比^[10]

$$\begin{cases} \gamma_{\text{ZF}, k_i} = \frac{\bar{\gamma}}{[(\mathbf{H}\mathbf{P})_{\bar{k}_{i-1}}^H (\mathbf{H}\mathbf{P})_{\bar{k}_{i-1}}]^{-1}]_{k_i, k_i}} = \frac{\bar{\gamma} P_{k_i}}{\|((\mathbf{H})_{\bar{k}_{i-1}})^{-1}\|_{k_i, k_i}^2} \\ \gamma_{\text{MMSE}, k_i} = \frac{1}{[(\mathbf{I}_M + \bar{\gamma} [(\mathbf{H}\mathbf{P})_{\bar{k}_{i-1}}^H (\mathbf{H}\mathbf{P})_{\bar{k}_{i-1}}]^{-1})]_{k_i, k_i}} - 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $[\cdot]_{k_i, k_i}$ 表示矩阵第 k_i 行第 k_i 列元素, $\bar{\gamma} = \frac{1}{\hat{\sigma}_n}$ 。

利用公式变换关系^[11], $\gamma_{\text{MMSE}, i}$ 可写为

$$\gamma_{\text{MMSE}, k_i} = \bar{\gamma} P_{k_i} \mathbf{h}_{k_i}^H \mathbf{h}_{k_i} - \bar{\gamma}^2 P_{k_i} \mathbf{h}_{k_i}^H [(\mathbf{H}\mathbf{P})_{\bar{k}_{i-1}}]_{-k_i} \cdot (\mathbf{I}_{M-1} + \bar{\gamma} [(\mathbf{H}\mathbf{P})_{\bar{k}_{i-1}}]_{-k_i}^H [(\mathbf{H}\mathbf{P})_{\bar{k}_{i-1}}]_{-k_i})^{-1} [(\mathbf{H}\mathbf{P})_{\bar{k}_{i-1}}]_{-k_i}^H \mathbf{h}_{k_i} \quad (10)$$

式中: \mathbf{h}_{k_i} 为 \mathbf{H} 的第 k_i 列, $[\cdot]_{-k_i}$ 表示去掉矩阵的第 k_i 列。信干噪比 $\gamma_{\text{MMSE}, k_i}$ 不仅与 CSI 有关, 还与发射功率有关, 正如式(9)中采用 ZF 检测时的信干噪比一样, 发送功率对 $\gamma_{\text{MMSE}, k_i}$ 的影响可以看作比例因子, 据此式(10)可近似为

$$\gamma_{\text{MMSE}, k_i} \cong P_{k_i} \cdot \Delta_{k_i} \quad (11)$$

$$\Delta_{k_i} \cong \bar{\gamma} \mathbf{h}_{k_i}^H \mathbf{h}_{k_i} - \bar{\gamma}^2 \mathbf{h}_{k_i}^H [(\mathbf{H})_{\bar{k}_{i-1}}]_{-k_i} \cdot (\mathbf{I}_{M-1} + \bar{\gamma} [(\mathbf{H})_{\bar{k}_{i-1}}]_{-k_i}^H [(\mathbf{H})_{\bar{k}_{i-1}}]_{-k_i})^{-1} [(\mathbf{H})_{\bar{k}_{i-1}}]_{-k_i}^H \mathbf{h}_{k_i} \quad (12)$$

式(12)表示等功率分配时子流的 SINR。

当采用 2^R -QAM 调制时, 系统的瞬时 BER 近似为

$$\text{BER}(\gamma_{k_i}) \approx 0.2 \exp\left(-\frac{1.6\gamma_{k_i}}{2^R - 1}\right) = c_1 \exp(-c_2 P_{k_i} \Delta_{k_i}) \quad (13)$$

由式(9)及式(12), Δ_{k_i} 为

$$\Delta_{k_i} = \begin{cases} \frac{\bar{\gamma}}{\|(([\mathbf{H}]_{k_{i-1}})^{-1})_{k_i}\|^2} & \text{ZF} \\ \bar{\gamma} \mathbf{h}_{k_i}^H \mathbf{h}_{k_i} - \bar{\gamma}^2 \mathbf{h}_{k_i}^H [[\mathbf{H}]_{k_{i-1}}]_{-k_i} \cdot (\mathbf{I}_{M-1} + \bar{\gamma} [[\mathbf{H}]_{k_{i-1}}]_{-k_i}^H [[\mathbf{H}]_{k_{i-1}}]_{-k_i})^{-1} [[\mathbf{H}]_{k_{i-1}}]_{-k_i}^H \mathbf{h}_{k_i} & \text{MMSE} \end{cases} \quad (14)$$

2.2 各子流 BER 的平均表达式

不考虑传播误差的影响,采用 ZF 检测时,各子流 SINR 服从如下分布^[12]

$$f(\gamma_k) = \frac{\gamma_k^{\alpha_k - 1}}{\Gamma(\alpha_k)} \left(\frac{1}{\gamma P_{k_i}}\right)^{\alpha_k} \exp\left(-\frac{\gamma_k}{\gamma_0 P_{k_i}}\right) \quad (15)$$

式中 Gamma 函数 $\Gamma(k) = \int_0^\infty t^{k-1} e^{-t} dt$, $\alpha_k = N - M + i$, $\beta_k = \frac{1}{[[\mathbf{PRP}]^{-1}]_{k_i, k_i}}$

当采用 MMSE 检测时,由文献[11],各子流 SINR 近似服从 Gamma 分布

$$\gamma_{k_i} \sim G(W_{k_i}, \zeta_{k_i}) \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} W_{k_i} = \frac{(N - M + 1 + (M - 1)\mu_{k_i})^2}{N - M + 1 + (M - 1)\sigma_{k_i}^2} \\ \zeta_{k_i} = \bar{\gamma} \sum_{k_i} \frac{N - M + 1 + (M - 1)\sigma_{k_i}^2}{N - M + 1 + (M - 1)\mu_{k_i}} \end{cases} \quad (17)$$

则 $\sum_{k_i} = \frac{1}{[[\mathbf{PRP}]^{-1}]_{k_i, k_i}}$, μ_{k_i}, σ_{k_i} 满足如下等式

$$\begin{aligned} \mu_{k_i} &= \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^{M-1} \frac{1}{1 + \bar{\gamma} d_j^2} \\ \sigma_{k_i}^2 &= \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^{M-1} \frac{1}{(1 + \bar{\gamma} d_j^2)^2} \end{aligned} \quad (18)$$

对 $[[\hat{\mathbf{H}}\mathbf{P}]_{k_{i-1}}]_{-k_i}$ 进行奇异值分解,即 $[[\hat{\mathbf{H}}\mathbf{P}]_{k_{i-1}}]_{-k_i} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H$, $\mathbf{U} \in \mathbf{C}^{M \times M}$, $\mathbf{D} \in \mathbf{R}^{M \times (N-1)}$, $\mathbf{V} \in \mathbf{C}^{(N-1) \times (N-1)}$, d_j 为矩阵 \mathbf{D} 的第 j 行, j 列的元素。

因此系统各子流的平均 BER 可表示为

$$P_e = \int_0^\infty \text{BER}(\gamma_{k_i}) f(\gamma_{k_i}) d\gamma_{k_i} \quad (19)$$

将式(13,15,16)分别代入式(19)并利用 Gamma 函数进行化简,各子流 BER 的闭式平均表达式为

$$P_e = \begin{cases} 0.2 \left(1 + \frac{1.6 \gamma_0 \beta_k}{2^R - 1}\right)^{-\alpha_k} & \text{ZF} \\ 0.2 \left(1 + \frac{1.6 \zeta_k}{2^R - 1}\right)^{-W_k} & \text{MMSE} \end{cases} \quad (20)$$

式(20)给出了采用 ZF 及 MMSE 检测时,不考虑传播误差时系统各子流 BER 的闭式平均表达式,在后面仿真中将验证式(20)的正确性。

3 功率分配算法

不考虑传播误差,在总发送功率约束下,以 BER 为优化目标的约束优化问题描述为

$$\begin{cases} \min_{P_i} \overline{\text{BER}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{BER}_{k_i} \\ \text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^M P_i = M \end{cases} \quad (21)$$

采用拉格朗日极值法求解,代价函数表示为

$$J(P_1, P_2, \dots, P_M) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \text{BER}_k + \lambda \left(\sum_{i=1}^M P_i - M \right) \quad (22)$$

其中 λ 是拉格朗日乘子。令 $\partial J / \partial P_i = 0$, 得到功率分配表达式及拉格朗日乘子

$$P_k = -\frac{1}{c_2 \Delta_k} \ln \frac{M\lambda}{c_1 c_2 \Delta_k} \quad (23)$$

$$\lambda = \exp \left[-\frac{M + \sum_{i=1}^M \frac{1}{c_2 \Delta_k} \ln \frac{M}{c_1 c_2 \Delta_k}}{\sum_{i=1}^M \frac{1}{c_2 \Delta_k}} \right] \quad (24)$$

式(23)中信噪比低于 7 dB 左右时易出现负功率分配。此时可将负值的子流功率取 0 或者采用等功率分配。若负功率项取 0, 为满足总功率限制条件, 剩下的天线重新分配功率, 此时仍会出现负功率项, 系统性能得不到改善, 并且由于逐次重新分配功率使得系统更复杂, 因此采用等功率分配。

4 仿真结果

本节将利用仿真及第 2 节中推导的理论式(20)、第 3 节的功率分配表达式来验证本文所提方案的正确性。信息比特经过(2, 1, 2)卷积编码、 2^R -QAM 调制、空时变换以及功率加载后发送出去。接收端分别采用基于 ZF 及 MMSE 准则的排序干扰抵消检测。图中, ρ 表示信道相关系数, σ_e^2 表示估计误差的方差, EPA 表示等功率分配, TPA 表示本文提出的功率分配算法。

图 2 采用 MMSE 检测, 估计误差的方差 $\sigma_e^2 = 0$, 信道相关系数 $\rho = 0.5$, 调制方式采用 16 QAM, 不考虑传播误差及功率分配的影响, 未编码时各子流 BER 理论与仿真如图 2 所示。由图可见, 在低信噪比时, 各子流 BER 的仿真值与理论值误差较大; 但随着信噪比的增加, 各子流 BER 的理论值及仿真值基本吻合, 验证本文式(20)的正确性。

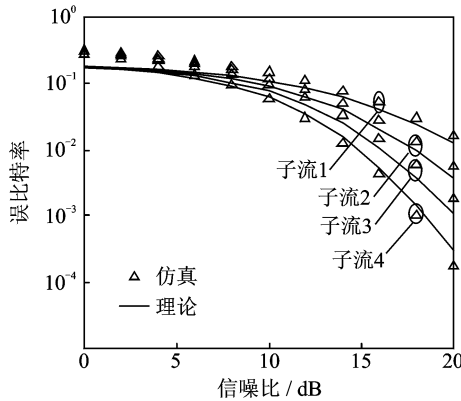


图 2 MMSE 检测, 4 发 5 收时各子流仿真与理论值

Fig. 2 Simulation and theory values for MMSE detection with 4 transmit 5 receive antennas

图 3 中天线配置为 4 发 4 收, 调制方式为 4QAM, 在不同信道相关系数及估计误差条件下, 由图可见, 随着估计误差的增加, 系统性能逐渐变差。此外采用本文式推导的功率分配算法较之等功率对系统的 BER 有显著改善。当估计误差的方差 $\sigma_e^2 = 0.01$ 及信道相关系数 $\rho = 0.5$, 采用 MMSE 检测时, 固定 $\text{BER} = 10^{-3}$, 与等功率相比, 采用所提算法性能提高约 4 dB。随着信噪比的增加, 所提功率分配算法对系统性能改善将越好, 验证了本文算法的有效性。

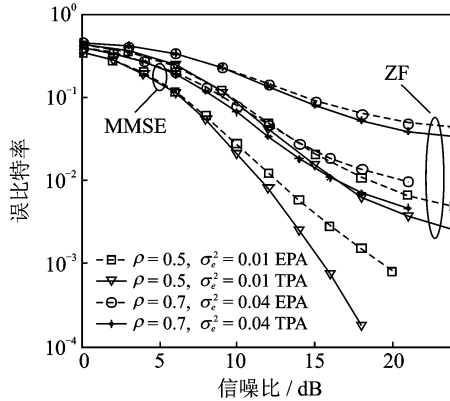


图3 功率分配算法对系统性能改善

Fig. 3 Improved system performance with TPA scheme

5 结束语

针对采用排序干扰抵消检测算法的 V-BLAST 系统,本文提出了同时考虑信道相关及估计误差时的自适应功率分配算法并得到各子流的理论闭式表达式,证明了等效噪声方差与估计误差有关而独立于信道相关及各子流的发射功率,信道相关及估计误差同时制约着系统性能。在高信噪比时,加性噪声较弱,此时系统等效噪声由估计误差决定,随着估计误差增大,BER 曲线变化趋缓。仿真结果表明与等功率分配算法相比采用所提算法能明显改善系统 BER 性能,验证了本算法的有效性。

参考文献:

- [1] Seung H N, Oh-Soon S, Kwang B L. Transmit power allocation for a modified V-BLAST system[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2004, 52(7): 1074-1080.
- [2] 王大鸣, 吕璐, 窦冬冬, 等. 一种虚拟 MIMO 中的低复杂度功率分配算法[J]. *数据采集与处理*, 2013, 28(3): 280-283.
Wang Daming, Lü Lu, Dou Dongdong, et al. Fast power allocation in virtual-MIMO systems[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2013, 28(3): 280-283.
- [3] Pillai V A, Sudhakar R. V-BLAST detectors: Performance investigation in correlated condition and time analysis[C]// 2013 International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s). Kottayam: IEEE, 2013: 98-103.
- [4] Xu Rongtao, Zhong Zhangdui, Chen Jiannmou. Analytical results of V-BLAST MIMO systems with two transmit antennas over correlated Rayleigh channels[C]// 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Beijing: IEEE, 2009: 1-5.
- [5] Shi Zhengyan, Leib H. Transmit antenna selected V-BLAST systems with power allocation[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(4): 2293-2304.
- [6] Chen Xiaomin, Xu Dazhuan, Yu Xiangbin. Adaptive transmit power allocation scheme for V-BLAST system under imperfect channel state information[C]// 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory. Kunming: IEEE, 2008: 1474-1477.
- [7] Kuang Quan, Leung Shuhung, Yu Xiangbin. Optimal joint spatial and temporal power adaptation for space-time-coded systems with imperfect CSI[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(6): 3335-3339.
- [8] Shi Feng, Chen Ming, Cheng Shixin, et al. Decorrelation and power allocation based precoding for transmit correlated V-

BLAST systems[C]//IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Berlin: IEEE, 2005: 2456-2460.

- [9] Pillai V A, Sudhakar R. V-BLAST detectors: Performance investigation in correlated condition and time analysis[C]//International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s). Kottayam: IEEE, 2013: 98-103.
- [10] Yi Jiang, Varanasi M K, Li Jian. Performance analysis of ZF and MMSE equalizers for MIMO systems: An in-depth study of the high SNR regime[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(4): 2008-2026.
- [11] Li P, Paul D, Narasimhan R, et al. On the distribution of SINR for the MMSE MIMO receiver and performance analysis[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2006, 52(1): 271-282.
- [12] Gore D A, Heath R W, Paulraj A J. Transmit selection in spatial multiplexing systems[J]. IEEE Communications Letters, 2002, 6(11): 491-493.

作者简介:



谭伟(1988-),男,硕士研究生,研究方向:MIMO系统的自适应功率分配技术, E-mail:tan_wei@126.com。



陈小敏(1975-),女,副教授,博士,研究方向:无线通信、空时编码的信号检测和链路自适应技术。



朱益民(1990-),男,硕士研究生,研究方向:MIMO中继预编码及功率分配。



朱秋明(1979-),男,副教授,研究方向:无线信道勘测、建模和模拟、航空数据链技术等。



党小宇(1973-),男,副教授,博士,研究方向:卫星导航、信道编码理论、深空通信、航空航天测控。