

## 脉冲噪声对空时分组码性能影响的研究

王旭东<sup>①②</sup> 岳殿武<sup>②</sup> 刘其中<sup>①</sup> 林斌<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室 西安 710071)

<sup>②</sup>(大连海事大学信息工程学院 大连 116026)

**摘要:** 该文对脉冲及非高斯噪声环境下空时分组码(STBC)性能进行了研究。采用脉冲和高斯加性混合噪声模型,利用矩母函数(MGF)分析方法,通过建立多发单收(MISO)近似等效模型,推导出 Rayleigh 衰落信道下 MISO 空时分组码误符号率(SER)闭式表达式的渐近解。在此基础上,对于不同脉冲噪声发生概率、脉冲噪声与高斯噪声功率比条件下 STBC 的性能进行了分析。结果表明,即使在高信噪比情况下,混合噪声也将使 STBC 系统性能显著降低。蒙特卡洛仿真结果验证了 SER 闭式解的有效性。

**关键词:** 空时分组码; 脉冲噪声; 矩母函数; 多发单收

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)11-2624-04

## Evaluation of the Effect of Impulsive Noise on Space-Time Block Coding

Wang Xu-dong<sup>①②</sup> Yue Dian-wu<sup>②</sup> Liu Qi-zhong<sup>①</sup> Lin Bin<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(National Key Laboratory of Antennas and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

<sup>②</sup>(College of Information Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

**Abstract:** The problem of the analyses of Space-Time Block Coding (STBC) in impulsive, non-Gaussian noise environments is considered. A model of an additive mixture of Gaussian and non-Gaussian impulsive noise is adopted, and the asymptotical solution of the closed-form expression for the average symbol error rate (SER) of orthogonal space-time block coding over Rayleigh flat fading channel is derived by means of the Moment Generating Function (MGF) with the approximate equivalent Multiple-Input Single-Output (MISO) model of mixture noise. Also, the performance evaluation of STBC is performed in terms of the impulsive noise occurring probability and the power ratio of the impulsive noise to the Gaussian noise. It is shown that mixture noise degrades the system performance significantly even at high SNR. Monte Carlo simulation results corroborate the effectiveness of analyses.

**Key words:** Space-Time Block Coding (STBC); Impulsive noise; Moment Generating Function (MGF); Multiple-Input Single Output (MISO)

### 1 引言

随着蜂窝和无线通信网的飞速发展,对于无线通信容量提出了更高的要求。特别是为满足无线互联网接入及多媒体应用业务,要求无线通信系统必须具有高速率数据传输的能力。多输入多输出MIMO(Multiple Input Multiple Output)系统由于能够显著提高系统容量和改善传输质量,得到了广泛关注<sup>[1-3]</sup>。在MIMO技术中,空时分组码(STBC)是一种简单但却具有独创性的发射分集技术,它能够以相对简单的接收机结构及译码算法来获得充分的分集增益,从而有效提高无线通信系统容量。

至今为止,已有大量文献报道了对于空时分组码性能分析研究的结果<sup>[4,5]</sup>。但是,上述研究均是在系统处于高斯白噪

声环境中这一条件下进行的,而实际上,由自然界及人为电磁源等因素造成的各种噪声(如大气噪声、电磁干扰、点火噪声等)却呈现出脉冲特性<sup>[6,7]</sup>,因此,更为接近实际情况的噪声模型应该是一个非高斯脉冲噪声和高斯噪声的加性混合<sup>[8]</sup>。文献[9]将噪声建模为高斯和对称alpha稳态(S $\alpha$ S)脉冲噪声的混合,给出了迫零(ZF)、最大似然(ML)和空时分组码(STBC)3种MIMO系统性能的仿真结果,但并未给出误符号率(SER)的闭式解。文献[10]首次给出了基于Middleton Class A噪声模型的MIMO信道空时码的设计准则,导出了脉冲噪声环境下ML接收机成对差错概率的上界。

本文针对脉冲噪声环境下空时分组码的性能进行了研究。对于 MIMO 信道噪声,采用脉冲和高斯加性混合噪声模型,利用矩母函数(MGF)分析方法,通过建立多发单收(MISO)近似等效模型,推导出了 Rayleigh 衰落信道下 MISO 空时分组码误符号率(SER)闭式表达式的渐近解,并且对文

献[11]中提出的几种空时分组码编码方案的误码性能进行了分析, 研究脉冲噪声对空时分组码性能的影响, 最后给出了仿真结果及结论。

## 2 系统模型

### 2.1 信号模型

考虑采用STBC的MIMO无线通信系统, 其中发射天线数为  $n_T$ , 接收天线数为  $n_R$ , 假设需要传送的信息符号序列为  $s_1, s_2, \dots, s_k$ , 其中每个符号都是从M-PSK或M-QAM信号星座  $\mathcal{A}$  中采用格雷映射选取的, 其平均能量为  $E_0$ 。采用基于广义正交设计的空时分组编码方案, 该方案以由一个维数为  $p \times n_T$  的矩阵  $\mathbf{G}$  来描述, 其元素  $g_{it}$  ( $t = 1, 2, \dots, p; i = 1, 2, \dots, n_T$ ) 为  $s_1, s_2, \dots, s_k$  及其共轭的线性组合。在每个时隙  $t$  内, 信号  $\{g_{it}\}_{i=1}^{n_T}$  由  $n_T$  个发射天线同时发送出去, 由于在  $p$  个时隙内发送了  $k$  个符号, 因此STBC的传输速率可以表示为  $R = k/p$ 。

设传输信道为 Rayleigh 准静态平坦衰落不相关 MIMO 信道, 由第  $i$  个发射天线到第  $j$  个接收天线之间的路径增益  $h_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, n_T, j = 1, 2, \dots, n_R$ ) 构造信道矩阵  $\mathbf{H}$ , 这里  $h_{ij}$  表示复信道系数, 其包络服从 Rayleigh 分布, 这样对于 MIMO 系统, 接收端所接收的信号可用矩阵形式表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{N} \quad (1)$$

其中  $\mathbf{N}$  是  $p \times n_R$  的噪声矩阵, 其元素  $n_{ij}$  ( $t = 1, 2, \dots, p$ ) 是加性高斯和脉冲混合噪声采样值。

### 2.2 噪声模型

针对符号域内时间离散模型, 这里用  $\mathbf{n}_k$  来表示对于任意发送时隙,  $n_R$  个接收天线上噪声信号的采样值矢量, 即噪声矩阵  $\mathbf{N}$  的任意行矢量的采样值, 可以表示为

$$\mathbf{n}_k = \mathbf{g}_k + \mathbf{i}_k \quad (2)$$

式中  $\mathbf{g}_k$  为零均值, 方差为  $2\sigma_g^2$  的复加性高斯白噪声(AWGN)随机变量,  $\mathbf{i}_k$  为脉冲噪声矢量, 可以表示成 Bernoulli-Gauss 过程, 即如下所示的一个 Bernoulli 实过程和一个复高斯过程的乘积:

$$\mathbf{i}_k = \mathbf{b}_k \cdot \mathbf{w}_k \quad (3)$$

式中  $\mathbf{b}_k$  为 Bernoulli 过程, 即以概率  $\Pr(\mathbf{b}_k = 1) = \varepsilon$  的独立同分布 0, 1 序列,  $\mathbf{w}_k$  是一个零均值, 每维方差为  $\sigma_w^2$  的复高斯随机变量, 一般要求  $\sigma_w^2 \gg \sigma_g^2$ , 这里令  $\sigma_w^2 = T\sigma_g^2$ ,  $T$  称为脉冲噪声参数,  $T \gg 1$ 。该噪声模型可以理解为发送的数据符号受到以概率  $\varepsilon$  出现的随机幅度为  $\mathbf{w}_k$  的脉冲信号的干扰, 因此,  $\mathbf{i}_k$  又可称作“ $\varepsilon$ -污染”噪声序列<sup>[8]</sup>。假设噪声模型中的所有随机变量都是相互独立的, 则信道噪声的特征函数(CF)  $\Phi_n(\omega_1, \omega_2)$  可以由下式给出:

$$\Phi_n(\omega_1, \omega_2) = (1 - \varepsilon) \cdot e^{-\frac{\sigma_g^2(\omega_1^2 + \omega_2^2)}{2}} + \varepsilon \cdot e^{-\frac{\sigma_g^2(1+T)(\omega_1^2 + \omega_2^2)}{2}} \quad (4)$$

通过对上式取傅氏变换可以得到混合噪声  $\mathbf{n}_k$  的概率密度函数(pdf)为

$$f(\mathbf{n}_k) = (1 - \varepsilon) \cdot N(0, \sigma_g^2) + \varepsilon \cdot N(0, (1+T)\sigma_g^2) \quad (5)$$

式中  $N(m_x, \sigma_x^2)$  表示均值为  $m_x$ , 每维方差为  $\sigma_x^2$  的复高斯随机变量概率密度函数。式(5)给出的模型可以看成是文献[7]中给出的 Middleton Class A 噪声模型的一种近似形式。

## 3 混合噪声的 MISO 近似等效模型

### 3.1 SISO 等效模型

对于正交空时分组码(OSTBC)系统, 在采用 ML 接收机译码时, 由于编码矩阵  $\mathbf{G}$  的正交性, 可以将使联合判决度量最小等效为使每个独立判决度量最小, 即每个发送符号  $s_i$  的译码度量都是基于对其判决统计  $\tilde{s}_i$  的线性处理, 这里  $\tilde{s}_i$  可以表示为

$$\tilde{s}_i = \arg \min_{s \in \mathcal{A}} \left( \|\mathbf{H}\|_F s_i + \eta_i \right) - \|\mathbf{H}\|_F s_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (6)$$

式中  $\|\mathbf{H}\|_F$  为信道矩阵  $\mathbf{H}$  的 Frobenius 范数,  $\eta_i$  为高斯白噪声。由式(6)可以看出, 具有信道矩阵  $\mathbf{H}$  的 MIMO 衰落信道能够转换成信道增益为  $\|\mathbf{H}\|_F$  的 SISO 信道。等效 SISO 模型在高斯白噪声环境下的每符号瞬时信噪比  $\mu = \|\mathbf{H}\|_F^2 E_S / (n_T n_R N_0)$ , 式中  $E_S$  为每个接收天线收到信号的平均功率,  $E_S = E_0 \cdot n_T \cdot \kappa \cdot R$ , 其中  $\kappa$  为常数, 对应  $\mathbf{G}_2$ ,  $\mathbf{H}_3$  和  $\mathbf{H}_4$ ,  $\kappa = 1$ , 对应  $\mathbf{G}_3$  和  $\mathbf{G}_4$ ,  $\kappa = 2$ 。因此,  $\mu$  的概率密度函数为<sup>[12]</sup>

$$f_\mu(\mu) = \frac{\mu^{n_T n_R - 1}}{\Gamma(n_T n_R) \mu_0} e^{-\frac{\mu}{\mu_0}}, \quad \mu \geq 0 \quad (7)$$

式中  $\mu_0 = E_S / (n_T n_R N_0)$ ,  $\Gamma(\cdot)$  表示伽马函数。相应的矩母函数(MGF)为

$$\phi_\mu(z) = \int_0^\infty f_\mu(\mu) \cdot e^{-z\mu} d\mu = (1 + z\mu_0)^{-n_T n_R} \quad (8)$$

### 3.2 MISO 近似等效模型

首先考虑空时编码  $\mathbf{G}_2$  方案 ( $n_T = 2, n_R = 1$ ), 根据两个连续符号发射周期之间脉冲噪声对信号的影响, 可以得到其 SISO 等效模型每符号瞬时信噪比  $\bar{\mu}$  的 pdf 和 MGF 分别为

$$f_{\bar{\mu}}(\bar{\mu}) = (1 - \varepsilon)^2 f_\mu(\bar{\mu}) + 2\varepsilon(1 - \varepsilon) \left( \frac{T+2}{2} \right) f_\mu \left( \frac{T+2}{2} \bar{\mu} \right) + \varepsilon^2 (T+1) f_\mu((T+1)\bar{\mu}) \quad (9)$$

$$\phi_{\bar{\mu}}(z) = (1 - \varepsilon)^2 \phi_\mu(z) + 2\varepsilon(1 - \varepsilon) \phi_\mu \left( \frac{2}{T+2} z \right) + \varepsilon^2 \phi_\mu \left( \frac{z}{T+1} \right) \quad (10)$$

上述结论可以推广到多发单收(MISO)时的情况, 假设在  $p$  个时隙内有  $m$  个突发脉冲噪声信号, 则 SISO 等效模型的每符号瞬时信噪比  $\bar{\mu}$  为一随机变量, 即  $\bar{\mu} = a_m^{-1} \mu$ , 对应发生概率为  $\varepsilon^m (1 - \varepsilon)^{p-m}$ , 其中  $a_m = [(T+1)m + (p-m)]/p$ ,  $m = 0, 1, \dots, p$ 。因此,  $\bar{\mu}$  的 pdf 和 MGF 可以分别表示如下

$$f_{\bar{\mu}}(\bar{\mu}) = \sum_{m=0}^p C_p^m (1 - \varepsilon)^{p-m} \varepsilon^m a_m f_\mu(a_m \bar{\mu}) \quad (11)$$

$$\phi_{\bar{\mu}}(z) = \sum_{m=0}^p C_p^m (1-\varepsilon)^{p-m} \varepsilon^m \phi_{\mu}(a_m^{-1}z) \quad (12)$$

可以证明混合噪声环境下,采用 ML 译码接收时,由 MISO 得到的等效 SISO 模型是一个近似等效,该近似能够保持在一、二阶矩上相同。

#### 4 性能分析

根据SISO等效模型,利用MGF分析方法<sup>[13]</sup>,可以对衰落信道下数字通信系统的误码率或误比特率的性能进行估计。OSTBC在混合噪声环境下的SER可以用下式估计:

$$P_s(E) = \int_0^{\infty} P_s(E | \bar{\mu}) f_{\bar{\mu}}(\bar{\mu}) d\bar{\mu} \quad (13)$$

由于混合高斯噪声环境下,基于 ML 译码接收的 SISO 是一个近似等效模型,因此,由式(13)推导出的 SER 是一个渐近解。这里考虑两种不同调制制度方式。

当采用 M-PSK 调制信号星座时,式(13)可以表示为

$$P_{\text{MPSK}}(E) = \frac{1}{\pi} \int_0^{(M-1)\pi/M} \phi_{\bar{\mu}} \left( \frac{\sin^2(\pi/M)}{\sin^2 \theta} \right) d\theta \quad (14)$$

当采用 M-QAM 调制信号星座时,式(13)可以表示为

$$P_{\text{MQAM}}(E) = \frac{4q}{\pi} \int_0^{\pi/2} \phi_{\bar{\mu}} \left( \frac{3(M-1)}{2 \sin^2 \theta} \right) d\theta - \frac{4q^2}{\pi} \int_0^{\pi/4} \phi_{\bar{\mu}} \left( \frac{3(M-1)}{2 \sin^2 \theta} \right) d\theta \quad (15)$$

式中  $q = (M - \sqrt{M})/M$ 。利用高斯和Marcum Q-函数的变换形式,在不同衰落信道下OSTBC的平均SER均可以由闭式解来描述,而这些闭式解可以用高级超越函数,如高斯超几何函数 ${}_2F_1$ 、阿贝尔超几何函数 $F_1$ 来表示。因此,根据文献[12],式(14)和式(15)便可得到其闭式解形式。

#### 5 仿真结果与分析

为了研究OSTBC在高斯和脉冲混合噪声环境下的误码性能,这里选取几种典型的空时分组编码方案  $G_2$ ,  $G_4$ ,  $H_3$  和  $H_4$ , 其速率分别为 1, 1/2, 3/4 和 3/4, 调制方式采用 M-PSK和M-QAM, 发射天线数为  $n_T$ , 接收天线数为 1, 并且假设信道为瑞利平坦衰落。仿真结果为OSTBC系统误符号率 (SER) 相对于信号-高斯噪声信噪比  $\text{SNR}_g$  的变化规律。

图1给出了采用QPSK调制方式,空时编码方案为  $G_2$  的 STBC系统在混合高斯噪声环境下的SER性能仿真结果,这里  $T=100$ ,  $\varepsilon=0.001, 0.01, 0.05, 0.15$ , 可以近似地分别代表低密度脉冲噪声即接近高斯噪声环境,中等密度脉冲噪声环境以及高密度脉冲噪声环境。从图中可以看出,相比纯高斯噪声环境,混合噪声环境下,STBC的性能要下降,并且这种下降程度随着脉冲发生概率的增加而变得更加严重。例如,对于  $\text{SER}=10^{-3}$ , 当  $\varepsilon=0.01, \varepsilon=0.05$  和  $\varepsilon=0.15$  时,相对于纯高斯噪声环境,其性能下降分别为 7.5dB, 12 dB 和 15 dB。此外,还可以看出,在接近高斯环境下( $\varepsilon=0.001$ ),小信噪比时,其性能接近纯高斯环境,而大信噪比时,性能

将逐渐变坏,其原因是小信噪比时,混合噪声中高斯噪声成分起主要作用,大信噪比时,脉冲噪声对误码性能起主要作用。

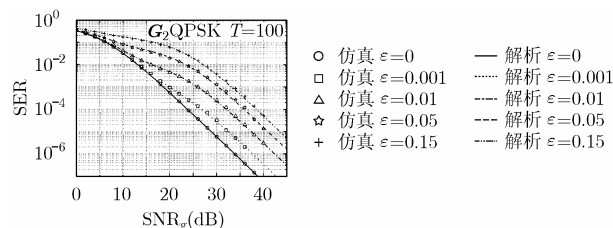


图1 不同脉冲噪声发生概率情况下 STBC 的性能

图2给出了对于不同脉冲参数  $T$  时,  $G_2$  STBC系统的SER性能仿真结果。图2表明,混合噪声环境下( $\varepsilon=0.01$ ),STBC的性能随着脉冲参数  $T$  的变大而下降,即性能随着脉冲强度的增加而变坏。从图中可以看出,当  $T$  增大时, SER 将会出现“平面效应”,SER将不再随  $\text{SNR}_g$  而变化了,这表明即使增加信噪比, SER性能也不会有所改善,其原因是由于此时脉冲噪声对性能的影响起主要作用。

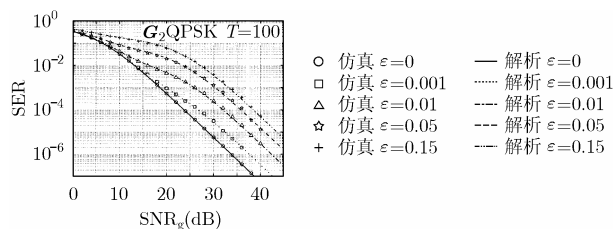


图2 不同脉冲噪声强度情况下 STBC 的性能

图1,图2中给出的SER结果表明,基于闭式解得到的解析性能和基于蒙特卡罗仿真得到的仿真性能十分吻合,从而验证了本文给出的混合噪声环境下OSTBC误符号率渐近解的有效性。

对于传输速率为 3bit/(s·Hz)时,几种空时编码系统: 8PSK- $G_2$ , 64QAM- $G_4$ , 16QAM- $H_3$  和 16QAM- $H_4$  在混合高斯噪声环境下( $\varepsilon=0.05$ )的SER性能结果如图3所示,可以看到,与纯高斯噪声环境下的性能相比,无论采用何种空时编码方案,系统性能均会降低。例如,在  $\text{SER}=10^{-3}$  时,上述4种系统的性能较高斯噪声环境下损失了近 11–12dB左右,同时,还可以看出,混合噪声环境下,空时分组码的分集增益将会损失。

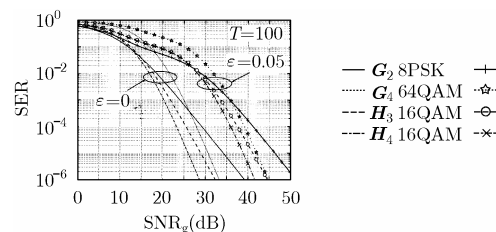


图3 混合噪声环境不同STBC方案的性能(传输速率为3bit/(s·Hz))

在图 4 中还给出了利用 SER 闭式解得到的采用 QPSK 和 64QAM 调制方式的  $H_4$  STBC 系统在高密度脉冲噪声环境下的性能, 这里取  $\varepsilon=0.15$ ,  $T$  分别取 50, 100 和 200。可以看出由于高进制调制符号星座分布较密, 导致其容易产生误码, 因此, 多进制调制 STBC 的性能会降低, 并且这种性能损失在高斯混合噪声环境下会变得更为严重。同时, 还可以看到, 当脉冲噪声强度加倍时, 系统性能降低 3dB 左右, 从而证明了混合噪声环境下, 大信噪比时脉冲噪声对系统性能的影响起主导作用。

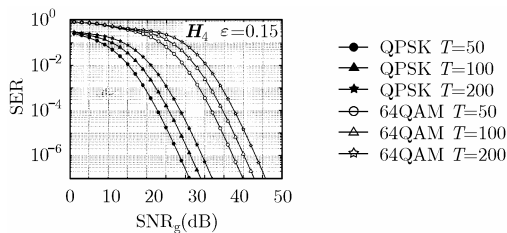


图 4 高密度脉冲噪声环境下采用不同调制方案的 STBC 的性能比较

## 6 结束语

本文研究了脉冲及非高斯噪声环境下空时分组码的性能。采用脉冲和高斯加性混合噪声模型, 建立了混合噪声环境下 OSTBC 的多发单收(MISO)近似等效模型, 该近似能够保持在一、二阶矩上相同。推导出了 Rayleigh 衰落信道下空时分组码误符号率(SER)渐近解的闭式表达式。针对不同脉冲噪声发生概率、脉冲噪声强度, 分析了不同空时编码方案和调制方式的性能。蒙特卡洛仿真结果验证了文中给出的 SER 闭式解的正确性。结果表明, 即使在高信噪比情况下, 混合噪声也将会使 STBC 系统性能显著降低。

## 参考文献

- [1] Foschini G J and Gans M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas [J]. *Wireless Personal Communications*, 1998, 6(3): 311-335.
- [2] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels [J]. *European Trans. on Telecomm.*, 1999, 10 (6): 585-595.
- [3] Maleki-Tehrani A, Hassibi B, and Cioffi J M. Adaptive equalization of MIMO channels [C]. *IEEE International Conference on Communications*, New Orleans, LA, USA, 2000, 3: 1670-1674.
- [4] Alamouti S M. A simple transmit diversity technique for wireless communications [J]. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1998, 16(8): 1451-1458.
- [5] Tarokh V, Jafarkhani H, and Calderbank A R. Space-time block coding for wireless communications: Performance results [J]. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1999, 17(3): 451-460.
- [6] Middleton D. Non-gaussian noise models in signal processing for telecommunications: New methods and results for class A and class B noise models [J]. *IEEE Trans. on Info. Theory*, 1999, 45(4): 1129-1149.
- [7] Blackard K L, Rappaport T S, and Bostian C W. Measurements and models of radio frequency impulsive noise for indoor wireless communications [J]. *IEEE J. Select Areas Communications*, 1993, 11(7):991-1001.
- [8] Ghosh M. Analysis of the effect of impulse noise on multicarrier and single carrier QAM systems [J]. *IEEE Trans. on Commun.*, 1996, 44(2):145-147.
- [9] Li Anxin, Wang Youzheng, and Xu Weiyu, *et al.* Performance evaluation of MIMO systems in a mixture of Gaussian noise and impulsive noise [C]. *IEEE Joint Conference of 10th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC2004) and 5th International Symposium on Multi-Dimensional Mobile Communications*, Beijing, China, 2004: 292-296.
- [10] Gao Ping, and Tepedelenlioglu C. Space-time coding over MIMO channels with impulsive noise [C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '05)*, Philadelphia, PA, USA, 2005, 3: 1081-1084.
- [11] Tarokh V, Jafarkhani H, and Calderbank A R. Space-time block codes from orthogonal designs [J]. *IEEE Trans.on Info. Theory*, 1999, 45(5): 1456-1467.
- [12] Shin H and Lee J H. Exact symbol error probability of orthogonal space-time block codes [C]. *GLOBECOM 2002-IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'02)*, Taipei, Taiwan, 2002, 11: 1206-1210.
- [13] Simon M K and Alouini M-S. *Digital Communication over Fading Channels: A Unified Approach to Performance Analysis* [M]. New York: Wiley, 2000: 3-13.

王旭东: 男, 1967年生, 副教授, 主要研究方向为空时编码和智能天线。

岳殿武: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为无线通信、信息安全与软件无线电。

刘其中: 男, 1938年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天线数值计算与CAD, 智能天线和宽带小型化天线。