

MIMO 系统在空时二维相关莱斯快衰落信道下的性能

赖国庭 尹俊勋 喻华文 林 凡
(华南理工大学 电子与信息学院 广州 510640)

摘 要 与准静态独立的瑞利衰落信道模型相比较,在 MIMO(Multi-Input Multi-Output)系统中,实际信道更趋向于空时相关莱斯快衰落。考虑到 MIMO 系统的收发分集优势以及收发两端天线阵列的空时相关性,在简单论述了 MIMO 系统和信道模型的基础上,该文利用多变量统计学理论,推导出 MIMO 系统在空时相关莱斯快衰落信道下平均成对差错概率上界的闭合表达式,并探讨了信道特性对系统性能的影响,然后给出相应仿真结果。

关键词 MIMO, 空时编码, 莱斯衰落, 空时相关

中图分类号: TN92, TN914

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1364-04

Performance of MIMO System under Spatiotemporal Correlated Fast Rician Fading

Lai Guo-ting Yin Jun-xun Yu Hua-wen Lin Fan

(College of Electronic & Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract Compared with the quasi-static rayleigh fading model, in MIMO (Multi-Input Multi-Output) systems, the practical channel is better for the spatial correlated fast Rician fading. Considering the transmit and receive diversity advantage in MIMO system and spatiotemporal correlation in transmitter and receiver arrays, based on the simple discussion about the MIMO system and channel model, this paper derive the close-form solution of the upper bound of the average pairwise error probability of the MIMO system under spatiotemporal correlated fast Rician fading by use of multivariate statistics, and the effect of the characteristic of the mobile channel on the system performance is discussed. Finally, the simulation results are shown.

Key words MIMO, Space-time code, Rician fading, Spatiotemporal correlation.

1 引言

随着现代移动通信的高速发展,为了满足高速和可靠的通信需求,在有限频谱资源的限制下,在传统信号处理技术的基础上提高系统的性能和容量已经显得有点勉为其难。在此情况下,为了提高信道容量和传输质量,无线通信领域专家提出了分集技术,使得无线通信从传统的 SISO(Single-Input Single-Out)领域进入到 MIMO(Multi-Input Multi-Output)领域。使用 MIMO 技术,再加以适当的空时二维信号处理技术,可以提高系统的覆盖范围和服务质量。另外,现代的用户终端不再仅仅是一种通话设备,逐渐演变成为复杂的无线网络接入设施,因而,用户终端的外形、大小和复杂性的限制也得到适当的放宽,这些使得通信链路的两端都采用天线阵列变成可能。

另外,文献[1,2]也提出:在收发端同时采用天线阵列时,无线信道的信道容量将有显著的提高。与此同时, Tarokh 也在文献[3]中得出,在准静态平坦瑞利衰落信道下,如果发射分集系统采用合适的空时编码设计,能够获得较好的分集增益和编码增益,取得系统性能与软硬件实现复杂度的较好折衷。但实际上,具体扩展到 MIMO 系统中,当天线阵列中各

端子间距过小时,各信道间将存在空间相关性,而当移动台与基站间距离比较近时,存在视距(LOS)分量,此时再用瑞利信道模型也不尽准确,应当采用更为普遍和适用的相关莱斯信道模型。另外,考虑到现代无线通信快速移动的通信需求,这时多普勒频移对系统性能影响的考虑已经必不可少;相应地,系统的时间相关性对系统性能的影响也必须给予关注。但是,在时空相关莱斯信道模型下,由于数学运算的复杂性,求取误码率的概率分布比较困难。基于上述情况,本文利用了多变量统计学的方法解决这一问题,深入研究空时二维相关莱斯快衰落信道条件下,采用空时编码的 MIMO 系统的误码性能,得到平均成对差错概率的上界的闭合解,并对不同状态下编码增益、时间分集增益和多普勒频移对系统性能的影响进行比较研究,最后也给出信道空时二维相关性对系统性能的影响。

2 MIMO 系统与信道模型

2.1 MIMO 系统

考虑采用一个具有 N_t 根发射天线和 N_r 根接收天线空时相关 MIMO 系统,具体如图 1 所示。在接收端, t 时刻第 j 根天线接收到的信号 y_t 可以表示为

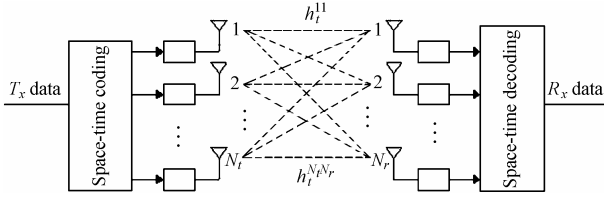


图 1 空时相关 MIMO 系统框图

Fig.1 Space-time correlated MIMO system scheme

$$y_t^j = \sqrt{E_s} \sum_{i=1}^{N_t} h_t^{i,j} s_t^i + n_t^j, \quad j=1,2,\dots,N_r \quad (1)$$

其中 E_s 代表每个符号的能量, $h_t^{i,j}$ 表示 t 时刻从第 i 根发射天线发射出去的信号到达接收端第 j 根接收天线所经历的无线信道的信道增益。 s_t^i 表示 t 时刻从第 i 根发射天线发射出去的信号。 n_t^j 表示 t 时刻第 j 根接收天线所接收到的噪声, 符合 0 均值的复高斯白噪声, 方差为 N_0 。

接下来, 我们用 $\mathcal{CN}(\alpha, \beta)$ 表示均值为 α , 方差为 β 的循环对称复高斯分布, $E[\cdot]$ 表示期望运算, $\text{Var}[\cdot]$ 表示方差运算, $(\cdot)^H$ 表示矩阵共轭转置, $(\cdot)^*$ 表示矩阵共轭, $\det(\cdot)$ 表示矩阵的行列式。

考虑衰落信道情况, 即信道在一个发射信号的时间间隔内看成不变, 但是不同发射信号所对应的信道的增益有较显著的变化。在这一前提下, 使用矢量的表达方法, t 时刻接收端接收到的信号 $\mathbf{y}(t)$ 可以表示如下:

$$\mathbf{y}_t = \sqrt{E_s} \mathbf{s}(t) \mathbf{h}(t) + \mathbf{w}_t \quad (2)$$

其中 $\mathbf{s}(t) = [s_t^1, s_t^2, \dots, s_t^{N_t}]^T$, 表示 t 时刻发射端发射的信号矢量。 $\mathbf{h}(t)$ 是大小为 $N_t \times N_r$ 的矢量, 表示 t 时刻的信道增益, 具体如下:

$$\mathbf{h}(t) = \begin{bmatrix} h_t^{1,1} & h_t^{1,2} & \dots & h_t^{1,N_r} \\ h_t^{2,1} & h_t^{2,2} & \dots & h_t^{2,N_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_t^{N_t,1} & h_t^{N_t,2} & \dots & h_t^{N_t,N_r} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{w}_t = [w_t^1, w_t^2, \dots, w_t^{N_r}]^T$ 表示 t 时刻接收天线端的噪声矢量, 且 $w_t^i \in \mathcal{CN}(0, N_0)$ 。在快衰落情况下, 由于不同时刻信道有着显著变化, 因而在时间间隔 τ 内, 运用矩阵论, 接收端接收到的信号阵列可表示为

$$\mathbf{Y}(t) = \sqrt{E_s} \mathbf{S}(t) \mathbf{H}(t) + \mathbf{W}(t)$$

其中 $\mathbf{Y}(t) = [\mathbf{y}_{t+1}, \mathbf{y}_{t+2}, \dots, \mathbf{y}_{t+\tau}]^T$, 大小为 $N_r \tau \times N_r N_t \tau$ 的信号矩阵 $\mathbf{S}(t) = \mathbf{I}_{N_r} \otimes \mathbf{s}_t$, 具体可表示如下:

$$\mathbf{S}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{N_r} \otimes \mathbf{s}_{t+1} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I}_{N_r} \otimes \mathbf{s}_{t+2} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{I}_{N_r} \otimes \mathbf{s}_{t+\tau} \end{bmatrix}$$

$\mathbf{H}(t)$ 是大小为 $N_r N_t \tau \times 1$ 的列向量, $\mathbf{H}(t) = [\mathbf{h}_{t+1}, \mathbf{h}_{t+2}, \dots, \mathbf{h}_{t+\tau}]$; $\mathbf{W}(t)$ 是大小为 $N_r \tau \times 1$ 的列向量, $\mathbf{W}(t) = [\mathbf{W}_{t+1}, \mathbf{W}_{t+2}, \dots, \mathbf{W}_{t+\tau}]^T$, 且 $\mathbf{W}(t) \in \mathcal{CN}(0, N_0 \tau)$ 。在接收端, 假设准

确的信道信息 $\mathbf{H}(t)$ 已知, 最大似然接收机根据准则:

$$\hat{\mathbf{S}} = \arg \min_{\mathbf{S}} \left| \mathbf{Y} - \sqrt{E_s} \mathbf{S} \mathbf{H}(t) \right|^2 \quad (3)$$

在所有可能发射的码字矩阵中寻找可以作为判决结果的码字 $\hat{\mathbf{S}}$, 使得式(3)取值最小。

2.2 相关信道模型

假设在某时刻 t , 从第 i 根发射天线到第 k 根接收天线的信道增益可以表示为 $h_{t+l}^{i,k} = h_{t+l}^{i,k}(R) + j h_{t+l}^{i,k}(I)$ $i=1,2,\dots, N_t, k=1,2,\dots, N_r, l=1,2,\dots, \tau$, $j = (-1)^{l/2}$ 。 $h_{t+l}^{i,k}(R)$ 与 $h_{t+l}^{i,k}(I)$ 分别表示 $h_{t+l}^{i,k}$ 的实部和虚部。当 $h_{t+l}^{i,k}(R)$ 与 $h_{t+l}^{i,k}(I)$ 都满足高斯分布, 亦即 $E[h_{t+l}^{i,k}(R)] = A_{iR}^{i,k}, E[h_{t+l}^{i,k}(I)] = A_{iI}^{i,k}$, $\text{Var}[h_{t+l}^{i,k}(R)] = \text{Var}[h_{t+l}^{i,k}(I)] = \Sigma_i^{i,j} \sigma^2 / 2$ 时, 我们认为信道是莱斯衰落信道^[4], 复变量 $h_{t+l}^{i,k}$ 满足复高斯分布, 满足 $E[h_{t+l}^{i,k}] = E[h_{t+l}^{i,k}(R)] + j E[h_{t+l}^{i,k}(I)]$, 亦即 $A_i^{i,k} = A_{iR}^{i,k} + j A_{iI}^{i,k}$, $\text{Var}[h_{t+l}^{i,k}] = \Sigma_i^{i,k} \sigma^2$, 可以表示为 $h_{t+l}^{i,k} \sim \mathcal{CN}(A_i^{i,k}, \Sigma_i^{i,k} \sigma^2)$ 。借助多变量统计学理论^[5], 此时矢量 \mathbf{H} 的概率密度分布函数为

$$p(\mathbf{H}) = \frac{1}{\pi^2 \det(\mathbf{R})} \exp \left[-(\mathbf{H} - \mathbf{A})^H \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{H} - \mathbf{A}) \right] \quad (4)$$

其中 \mathbf{A} 为对应 \mathbf{H} 的均值矢量, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{1,1} & \mathbf{A}^{1,2} & \dots & \mathbf{A}^{1,N_r} \\ \mathbf{A}^{2,1} & \mathbf{A}^{2,2} & \dots & \mathbf{A}^{2,N_r} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}^{N_t,1} & \mathbf{A}^{N_t,2} & \dots & \mathbf{A}^{N_t,N_r} \end{bmatrix}$ 。 \mathbf{R}

为 \mathbf{H} 的协方差矩阵, 大小为 $N_t N_r \tau \times N_t N_r \tau$ 。位于 \mathbf{R} 的第 i 行, 第 m 列的元素为 $R_{i,m} = E[(h_i^i - A^i)(h_i^m - A^m)^*]$, 记 $\mathbf{H} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{A}, \mathbf{R})$ 。

3 平均成对差错概率

在上述信道模型的基础上, 下面将计算在空时相关莱斯衰落条件下, 采用空时编码 MIMO 系统的平均成对差错概率。假设 \mathbf{S} 和 \mathbf{X} 是两个不同的码字矩阵。在接收端已知信道信息 \mathbf{H} 的条件下, 假设码字矩阵 \mathbf{S} 被发送, 但是接收端错判为 \mathbf{X} 。利用式(3), 条件成对差错概率可以表示为^[6]

$$P(\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{X} | \mathbf{H}) \leq \exp \left[-\frac{E_s}{4N_0} |(\mathbf{S} - \mathbf{X}) \mathbf{H}|^2 \right] \quad (5)$$

又因为 $|(\mathbf{S} - \mathbf{X}) \mathbf{H}|^2 = \mathbf{H}^H (\mathbf{S} - \mathbf{X})^H (\mathbf{S} - \mathbf{X}) \mathbf{H}$, 令 $(\mathbf{S} - \mathbf{X})^H (\mathbf{S} - \mathbf{X}) = \mathbf{F}$, 可以得到

$$P(\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{X} | \mathbf{H}) = \exp \left(-\frac{E_s}{4N_0} \mathbf{H}^H \mathbf{F} \mathbf{H} \right)$$

由于 $\mathbf{H} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{A}, \mathbf{R})$, 对上式求出关于 \mathbf{H} 的统计平均, 可以得到

$$\begin{aligned} P(\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{X}) &= \int_{-\infty}^{\infty} P(\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{X} | \mathbf{H}) p(\mathbf{H}) d\mathbf{H} \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(-\frac{E_s}{4N_0} \mathbf{H}^H \mathbf{F} \mathbf{H} \right) \frac{1}{\pi^2 \det(\mathbf{R})} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \exp\left[-(\mathbf{H}-\mathbf{A})^H \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}-\mathbf{A})\right] d\mathbf{H} \\ &= \frac{1}{\pi^2 \det(\mathbf{R})} \\ & \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{E_s}{4N_0} \mathbf{H}^H \mathbf{F} \mathbf{H} - (\mathbf{H}-\mathbf{A})^H \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}-\mathbf{A})\right] d\mathbf{H} \\ &= \frac{1}{\det\left(\mathbf{I}_{N_t} + \frac{E_s}{4N_0} \mathbf{F} \mathbf{R}\right)} \\ & \cdot \exp\left[-\frac{E_s}{4N_0} \mathbf{A}^+ \left(\mathbf{I}_{N_t} + \frac{E_s}{4N_0} \mathbf{F} \mathbf{R}\right)^{-1} \mathbf{F} \mathbf{A}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

令 r 为矩阵 $\mathbf{F} \mathbf{R}$ 的秩。由于矩阵 \mathbf{F} 的列均为 $(\mathbf{S}^1 - \mathbf{X}^1)$, $(\mathbf{S}^2 - \mathbf{X}^2), \dots, (\mathbf{S}^{N_t} - \mathbf{X}^{N_t})$ 及其共轭的不同乘积, 又 $\mathbf{S} \neq \mathbf{X}$, 故有 \mathbf{F} 的秩为 1。而 \mathbf{R} 为正定矩阵且满秩, 因此 $r=1$ 。令 $\mathbf{F} \mathbf{R}$ 的唯一非零特征值为 λ , 可以得到

$$\det\left(\mathbf{I}_{N_t} + \frac{E_s}{4N_0} \mathbf{F} \mathbf{R}\right) = 1 + \frac{E_s}{4N_0} \lambda$$

因为 $(\mathbf{B})^{-1} = \boldsymbol{\Xi}(\mathbf{B}) / \det(\mathbf{B})$, 其中 $\boldsymbol{\Xi}(\mathbf{B})$ 为 \mathbf{B} 的伴随矩阵。令 $\boldsymbol{\Xi}[\mathbf{I}_{N_t} + (E_s / 4N_0) \mathbf{F} \mathbf{R}] = \boldsymbol{\Omega}$, 可以得到

$$\left(\mathbf{I}_{N_t} + \frac{E_s}{4N_0} \mathbf{F} \mathbf{R}\right)^{-1} = \frac{\boldsymbol{\Omega}}{1 + E_s \lambda / 4N_0}$$

因此, 当 $E_s \lambda / 4N_0 \ll 1$ 时, 即信噪比较大时, 式(6)可另表示成

$$P(\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{X}) \leq (E_s \lambda / 4N_0)^{-1} \exp[-\lambda^{-1} \mathbf{A}^H \boldsymbol{\Omega} \mathbf{F} \mathbf{A}] \quad (7)$$

从式(7)不难看出, 成对差错概率的大小同信道的特性、码字矢量的设计方案有关。在使用相同码字设计方案的条件下, 当信道空间相关性越高, \mathbf{R} 矩阵的元素值越大, λ 的值就越小, 性能就越差。而当均值矢量 \mathbf{A} 取值越大, 系统性能显然越好。

4 仿真结果

在仿真设置中^[7], 分别使用 2 状态、4 状态和码率为 1-bit/symbol 的 BPSK 最佳网格编码调制设计的网格图(图 2), 每帧进行 130 次发射, 以帧差错率作为性能指标。当移动台距离基站较近时, 认为存在视距分量, 定义视距信噪比分量和散射信噪比分量之比为莱斯因子 K :

$$K = \frac{\mathbf{A}^H \mathbf{F} \mathbf{A}}{\text{tr}(\mathbf{F} \mathbf{R})} \quad (8)$$

采用高斯模型^[8]表征 $\mathbf{R}_{i,m}$, 表示如下:

$$R_{i,m} = \exp\left[-(\mu/2)(i-k)^2 d_i d_r\right] \quad (9)$$

其中 d_i 和 d_r 分别表示发射和接收天线阵列相邻两端子之间的距离和载波波长之比, μ 为常数, 取值 21.4。所有的 MIMO

系统的收发天线阵列配置都为 $N_t=2, N_r=2$ 。分别采用 2 状态、4 状态和 8 状态网格编码下系统性能的比较如图 3 和图 4 所示; 在相同的空时条件下, 采用 2 状态网格编码时不同的莱斯因子下系统性能的比较如图 5 所示; 最后, 在采用 4 状态网格编码下, 不同空时条件下系统的性能比较如图 6 所示。图 3-图 6 中, k 为信道均值矢量。

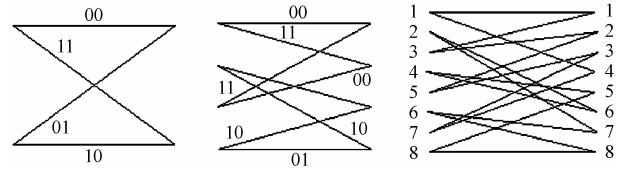


图 2 2, 4 和 8 状态, 1-bit/symbol BPSK 网格编码调制设计

Fig.2 2, 4 and 8 states, 1bit/symbol BPSK TCM scheme

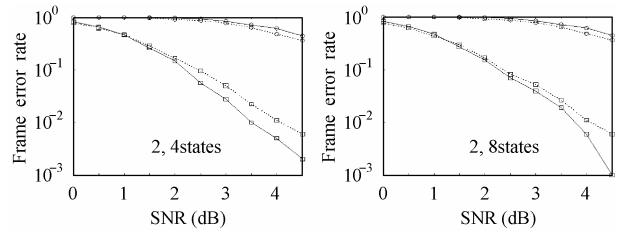


图 3 2、4 状态编码下的系统空时性能比较
图 4 2、8 状态编码下的系统空时性能比较

Fig.3 Space-time performance comparison of system using 2, 4 states coding

Fig.4 Space-time performance comparison of system using 2, 8 states coding

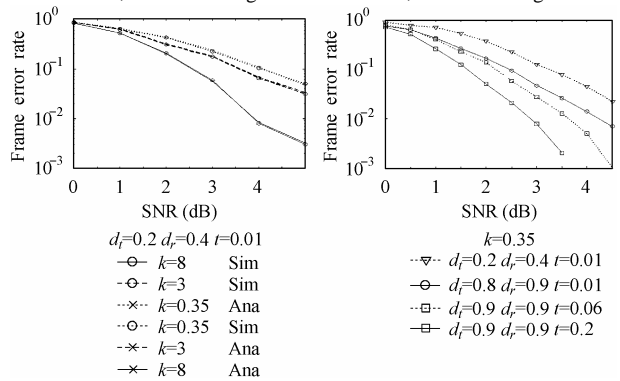


图 5 2 状态编码和不同莱斯因子 K 下系统性能的比较

图 6 4 状态编码和不同空时相关性下系统性能比较

Fig.5 Performance comparison of system using various Rician factor and 2 states coding

Fig.6 Performance comparison of system using various Spatio-temporal correlation factor and 4 states coding

从式(8), 式(9)可见: 信道相关矩阵元素随着 d_i, d_r 的增大而减小, 所对应的 λ 值变大, 相应系统的性能得到提高, 亦即系统性能随着 d_i, d_r 的提高呈现递增趋势; 另外, 由于莱斯因子 K 随着信道均值 \mathbf{A} 的增大而增大, 因而当莱斯因子 K 取值较大时, 信道均值矢量相应也取值较大, 系统的性能也就较好。

另外, 由于莱斯快衰落信道可以看成由视距和漫射两部

分组成, 其中的视距部分对系统性能的影响起到关键的作用。当移动终端快速移动时, 由此而引起的多普勒频移对信道性能的影响不可忽略, 这点从仿真结果也可以看出来。

当 $d_t = d_r = 0.8$ 时, 这时可认为系统空间不相关, 从图 3 和图 4 可以看出, 当系统采用 2 状态网格编码时, 时间相关 ($t = 0.01$) 下系统的性能要优于时间不相关 ($t = 0.04$) 时系统的性能。这是因为虽然时间不相关时系统可以获得适当的时间分集增益, 但是, 由于 2 状态网格编码下系统所能获得的编码增益比较小, 由编码增益同时间分集增益所带来的正面影响还不如由于多普勒频移带来的负面影响大, 因而表现为时间不相关时系统性能不如时间相关时系统性能; 相对比, 当采用 4 状态和 8 状态网格编码时, 在时间不相关下, 由于系统所能获得的编码增益同时间分集增益所带来的正面影响要大于多普勒频移所带来的负面影响, 因而表现为时间不相关时系统性能要优于时间相关时系统性能。

从图 5 可以看出, 在采用 2 状态网格编码且空时相关 ($d_t = 0.2, d_r = 0.4$) 下, 在采用不同莱斯因子情况下, 当莱斯因子取值较小, 亦即信道均值矢量取值较小 ($k = 0.35$) 时, 这时系统性能要比莱斯因子取值较大, 亦即信道均值矢量取值较大 ($k = 3, k = 8$) 时差。同时, 由图可见, 仿真结果曲线与理论推导曲线高度一致, 这也证明了我们前面理论推导的正确性。

从图 6 可以看出, 在采用 4 状态网格编码时, 这时系统编码增益加上时间分集增益的正面影响要强于多普勒频移的负面影响时, 空间一维不相关时的系统性能要优于空时二维相关时的系统性能; 同时, 空时二维不相关时的系统性能要优于空间一维不相关时的系统性能。

5 结束语

本文研究了在空时相关莱斯快衰落信道条件下, 采用空时编码的 MIMO 系统的误码性能, 得到平均成对差错概率的上界的闭合解, 在此基础上, 对系统空间一维不相关时, 分别采用不同状态网格编码下编码增益、时间分集增益以及多普勒频移对系统性能的影响做进一步的研究, 然后讨论了信道收发端空时二维相关特性对系统性能的影响, 最后给出仿真结果。本文采用了比瑞利衰落更为普遍和实用的莱斯快衰

落信道, 同时, 由理论推导和实验结果证明, 当使用 2 状态 TCM 编码时, 其所带来的编码增益同分集增益所带来的正面影响还不如多普勒频移所带来的负面影响, 而使用 4 或 8 状态 TCM 编码时, 总的编码增益和分集增益所带来的正面影响要强于多普勒频移所带来的负面影响, 这对实际信道下空时编码的设计和应用有重要指导意义。

参考文献

- [1] Foschini G J, Gans N 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]. *Ero. Trans. Telecommun*, 1999, 10 (11): 585-595.
- [3] Tarokh V, Seshadri N, Calderbank A. 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.
- [4] Stuber G L. Principles of mobile communication [M]. Second Edition. Boston. Kluwer Academic Publishers, 2001: 51-52.
- [5] Muirhead R J. Aspects of Multivariate Statistical Theory [M]. New York, Wiley, 1982: 190-193.
- [6] Proakis J G. Digital Communications [M]. Third Edition, New York, McGraw-Hill, 1995: 616-618.
- [7] 陈其铭, 尹俊勋. 发射分集系统在空间相关莱斯快衰落信道下的性能[J]. 电讯技术, 2004, 44 (3): 20-23.
- [8] Lombardo P, Fedele G, Rao M M. MRC performance for binary signals in Nakagami fading with general branch correlation, *IEEE Trans. on Communications*, 1999, COM-47 (1): 44-52.

赖国庭: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为 MIMO 系统、OFDM 调制技术及空时码。

尹俊勋: 男, 1942 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信、数字语音和图像处理。

喻华文: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为无线宽带通信、自适应调制技术。

林 凡: 男, 1983 年生, 硕士生, 研究方向为宽带多载波调制、空时编码。