

文章编号: 2096-1618(2020)06-0610-06

# V-BLAST 天线相关性对系统性能影响研究

谢建峰, 高瑜翔, 楚春阳

(成都信息工程大学通信工程学院 气象信息与信号处理四川省高校重点实验室, 四川 成都 610225)

**摘要:**针对影响 V-BLAST 系统的天线阵列相关性的因素以及各因素综合作用下对系统性能存在重大影响这一情况, 基于 V-BLAST 系统模型以及天线相关性理论, 提出相应的影响天线相关性因素的理论模型和系统性能分析模型, 并对阵列相关性及系统误码率和信道容量性能进行多因素及综合仿真。仿真得到天线间距、波束到达角、角度扩展和耦合各单个因素和综合因素影响下的系统误码率和信道容量变化的数值结果和相关结论, 与只考虑单个因素影响相比, 综合后系统误码率至少增大了 1 倍, 信道容量至少降低了 30%。

**关键词:**信号与信息处理; MIMO 阵列; 天线相关性; 误码率; 信道容量; MIMO 天线研究

**中图分类号:** TN820

**文献标志码:** A

**doi:** 10.16836/j.cnki.jcuit.2020.06.005

## 0 引言

5G 及其相关技术在未来移动通信技术中广泛使用, 其中 V-BLAST 系统属于 MIMO 技术中的空间复用技术, 可以提高通信信道容量和改善通信质量。在 MIMO 系统中, 由于天线数量的增加, 天线在接收信号时受其他信号干扰降低了通信系统的性能指标。因此, 研究天线之间的相关性及其对 V-BLAST 系统性能影响便尤为重要<sup>[1-3]</sup>。在对角度扩展与相关性的关系研究中发现波达角的角度扩展对均匀线阵天线单元间空间衰落相关性相互关联<sup>[4]</sup>; 钱奎等<sup>[5]</sup>对比了影响 MIMO 系统天线相关性的因素, 并将之用于对 MIMO 系统的 BER 分析; 进一步对距离、波达角、角度扩展相关性的研究中给出了各模型下的天线相关性精确与近似表达式, 通过模拟仿真验证了角能量分布的标准差或角扩展是决定相关性的主要因素, 并分析了相关性对信道容量的影响<sup>[6]</sup>; 在探究互耦效应对天线相关性的影响时虽详细研究了互耦对系统信道容量的影响但并未结合波达角等因素综合分析<sup>[7]</sup>。可见在已有工作中缺乏综合研究影响天线相关性的因素及其对 MIMO 系统中的误码率和信道容量影响。

为此, 在已有的 V-BLAST 线型阵列模型系统研究工作中, 首先构建 V-BLAST 系统模型; 然后分析天线间距、波束到达角、角度扩展和耦合等多个因素对相关性影响情况后, 再结合系统性能模型, 进行各因素及其综合影响下的相关性对系统误码率和信道容量性能的仿真。

## 1 V-BLAST 系统信号模型

目前的 MIMO 技术大致可分为空间分集和空间复用 2 类, 在文中研究天线阵列相关性及其对空间复用 V-BLAST 系统的影响。假设发送和接收端均为天线单元间距相等的阵列, 则天线模型如图 1 所示。

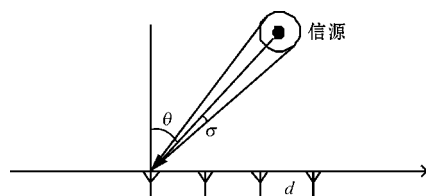


图1 均匀直线阵列模型

### 1.1 V-BLAST 系统模型

在发送端用  $X = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_{n_T}(t))^T$  表示第 1 到第  $n_T$  根天线所发送的信息符号; 在接收端用  $Y = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_{n_R}(t))^T$  表示第 1 到第  $n_R$  根天线接收到的信息符号。则表达式可以表示为

$$Y = HX + N \quad (1)$$

其中  $H$  为  $n_R \times n_T$  的信道矩阵, 可表示为

$$H = \begin{pmatrix} h_{11} & \cdots & h_{1n_T} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{n_R1} & \cdots & h_{n_Rn_T} \end{pmatrix}$$

其中  $h_{ij}$  表示天线  $j$  发送出的信号到达接收天线  $i$  所经过的信道因子,  $N$  为  $n_R \times 1$  的加性高斯白噪声, 均值为 0, 方差  $E = \sigma^2 I_{n_R}$ 。

在对 V-BLAST 系统研究天线相关性信道模型时, 将信道进行分解可得到:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{T}^{1/2} \quad (2)$$

其中  $\mathbf{R}$  为  $n_R \times n_R$  的接收天线相关矩阵,  $\mathbf{T}$  为  $n_T \times n_T$  的发射天线相关矩阵,  $\mathbf{H}_w$  是随机变量矩阵。

## 1.2 信号模型

设天线数量为  $n$ , 则均匀直线阵中信号矢量可以表示为

$$\mathbf{V}_i(\theta) = V(t) e^{-j2\pi(\frac{d_i}{\lambda}) \cdot \cos(\theta)} \quad (i=0, 1, \dots, n) \quad (3)$$

其中  $V(t)$  表示信号幅度,  $d_i$  表示第  $i$  根天线位置矢量,  $\lambda$  表示波长,  $\theta$  代表信号波达角。假设该阵列为全向天线阵列, 在只考虑信号波达角、角度扩展、天线单元间距的情况下, 即  $v(t) = 1$ , 若以第 1 根天线为基准, 因此天线接收信号可表示为

$$\mathbf{V}_i(\theta) = e^{-j2\pi(\frac{d_i}{\lambda}) \cdot \cos(\theta)} \quad (i=0, 1, \dots, n) \quad (4)$$

## 2 阵列天线相关性理论建模

对于线性天线阵列, 其天线空域相关性与天线距离、来波角度和角度扩展以及天线耦合 4 个参数有关, 因此将天线相关性信道模型以及其中的影响因素分别介绍如下。

### 2.1 天线相关性模型表示

相关性为影响 MIMO 发展的因素之一。在研究任意两天线之间的相关性时, 可以将两个天线之间的相关性表示为

$$\begin{aligned} \rho(i, j) &= E[\mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{V}_j(\theta)^*] \\ &= \int \mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{V}_j(\theta)^* \cdot P(\theta) d\theta \end{aligned} \quad (5)$$

其中  $\mathbf{V}_{ij}(\theta)$  为均匀直线阵中的信号矢量,  $P(\theta)$  为波达信号功率谱分布函数,  $E[\cdot]$  为期望函数。

### 2.2 天线单元间距对相关性影响建模

在实际环境中, 由于天线阵列间距不够大, 会导致各个分集支路信号之间并不总是独立的, 而且由于 MIMO 技术在朝着设备小型化、阵列规模扩大化发展, 使天线单元之间的距离不能太大。因此在考虑天线距离对相关性的影响时, 结合 (4)、(5) 式可以得天线阵列之间的距离与相关性之间的关系:

$$\rho(i, j) = E[\mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{V}_j(\theta)^*] = \int e^{-j2\pi(\frac{d_j - d_i}{\lambda})} \cdot P(\theta) d\theta \quad (6)$$

其中, 假设信号波长一定, 随着天线单元间距的增加, 积分得出的相关性因子减小, 最后使相关性减小。

### 2.3 平均波达角对相关性影响建模

在研究波达角对相关性的影响时, 通常考虑波达

角功率谱分布状态为高斯分布和拉普拉斯分布。

当波达信号功率谱为拉普拉斯分布时:

$$P(\theta) = \frac{P0}{\sigma\sqrt{2}} e^{\frac{-\sqrt{2}|\theta - \theta^-|}{\sigma}} \quad (7)$$

其中,  $\theta \in [\theta - \Delta\theta, \theta + \Delta\theta]$ ,  $\sigma$  为角度扩展,  $\theta^-$  为平均水平波达角,  $P0$  为归一化因子。根据式 (5)、(7) 得:

$$\begin{aligned} \rho(i, j) &= E[\mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{V}_j(\theta)^*] \\ &= \int \mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{V}_j(\theta)^* \cdot \frac{P0}{\sigma\sqrt{2}} e^{\frac{-\sqrt{2}|\theta - \theta^-|}{\sigma}} d\theta \end{aligned} \quad (8)$$

由拉普拉斯性质可知, 随着平均波达角的增加, 波达信号功率谱分布峰值也在增加, 当达到平均波达角为 0 时, 此时信号与天线阵列方向垂直, 天线之间的相关性最小。

### 2.4 角度扩展对相关性影响建模

如果将一个方向上经过散射的信号视为一个“簇”, 则一簇信号内包含多条传播路径, 每条路径包含一个 AOA(波达角)和 AOD(离开角), 那么对于一个信号簇所有信号的 AOD/AOA 对应的扩展成为角度扩展。角度扩展会造成空间选择性衰落, 扩展大小受天线位置的影响, 一般而言当基站天线(BS)位置较高时, 周围的反射体较少, 角度扩展便小。

在考虑角度扩展对相关性的影响时, 角度扩展越大, 相邻天线带来的干扰越小, 相关性便越小, 再结合到达角的分布情况来研究角度扩展对相关性的影响。由式 (5)、(7) 可得

$$\begin{aligned} \rho(i, j) &= E[\mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{V}_j(\theta)^*] \\ &= \int \mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{V}_j(\theta)^* \cdot \frac{P0}{\sigma\sqrt{2}} e^{\frac{-\sqrt{2}|\theta - \theta^-|}{\sigma}} d\theta \end{aligned} \quad (9)$$

当角度扩展增大, 相关系数便减小。因此可以得到随着角度扩展的增加, 天线之间的相关性减小。

### 2.5 天线间耦合对相关性影响建模

在研究天线耦合对相关性的影响时, 以发送端为例, 假设  $V_s$ 、 $V_T$ 、 $I_s$ 、 $Z_s$ 、 $\mathbf{Z}_T$  分别为源电压、发送端电压、电路中的电流、源阻抗、负载阻抗矩阵, 由  $V_T = \mathbf{Z}_T \cdot I_s$  得:

$$\mathbf{Z}_s = \mathbf{Z}_T^{-1} \cdot \mathbf{V}_T \quad (10)$$

在电路中有:

$$V_s = V_T + I_s \cdot Z_s \quad (11)$$

由 (9)、(10) 式可以得到:

$$\mathbf{Z}_T(\mathbf{Z}_T + \mathbf{Z}_s)^{-1} V_s = V_T \quad (12)$$

在天线阵列中, 负载阻抗矩阵  $\mathbf{Z}_T$  中的  $Z_{mn}$  表示天线阵列中第  $m$  根天线与第  $n$  根天线间的互阻抗, 其表达式为

$$Z_{mn} = \begin{cases} 30[0.577 + \ln(2\pi) + jSi(2\pi)], m=n \\ 30\{2Ci(2\pi\lambda^{-1}d_i) - Ci[2\pi\lambda^{-1}(\sqrt{d_i^2 + L^2} \\ +L)] - Ci[2\pi\lambda^{-1}(\sqrt{d_i^2 + L^2} - L)]\} - \\ 30j\{2Si(2\pi\lambda^{-1}d_i) - Si[2\pi\lambda^{-1}(\sqrt{d_i^2 + L^2} \\ +L)] - Si[2\pi\lambda^{-1}(\sqrt{d_i^2 + L^2} - L)]\}, \\ m \neq n \end{cases}$$

其中  $d_i$  为天线单元之间的间距,  $L$  为天线长度, 且:

$$Ci(x) = \int_{-\infty}^x \left(\frac{\cos x}{x}\right) dx \approx \frac{\sin x}{x}$$
$$Si(x) = \int_{-\infty}^x \left(\frac{\sin x}{x}\right) dx \approx \frac{x}{2} - \frac{\cos x}{x}$$

因此可以得到耦合矩阵

$$\mathbf{C}_T = \mathbf{Z}_T(\mathbf{Z}_T + \mathbf{Z}_S)^{-1} \tag{13}$$

在式(1)中所得到的天线信号电压未考虑耦合情况的理想情况,在考虑耦合后可以得到实际发送端的电压  $V_T^i(\theta)$  为

$$V_T^i(\theta) = \mathbf{C}_T \mathbf{V}_i(\theta) \tag{14}$$

同理,也可以得出天线接收端的实际电压值  $V_R^i(\theta)$ 。最后得出天线耦合对相关性的影响:

$$\rho(i,j) = E[V_T^i(\theta) \cdot V_T^j(\theta)^*]$$
$$= \int V_T^i(\theta) \cdot V_T^j(\theta)^* \cdot P(\theta) d\theta \tag{15}$$

### 2.6 综合因素对相关性影响建模

在分别考虑4个因素对天线相关性的影响后,将4个因素综合考虑,得出综合因素下天线相关性为

$$\rho(i,j) = E[V_T^i(\theta) \cdot V_T^j(\theta)^*]$$
$$= \int \mathbf{C}_T \mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{C}_T \mathbf{V}_j(\theta)^* \cdot \frac{P_0}{\sigma\sqrt{2}} e^{\frac{-\sqrt{2}|\theta-\theta^*|}{\sigma}} d\theta$$

## 3 仿真实验

设收发天线阵列为  $4 \times 4$ , 为研究综合因素对系统性能的影响进行如下仿真实验: 首先分别仿真天线距离、来波角度和角度扩展以及天线耦合单独对系统的影响, 然后将4个因素进行综合仿真研究, 得出多因素综合后系统性能, 最后将考虑多因素与考虑单因素的系统进行对比。

### 3.1 相关性对系统性能影响的仿真模型

在分析了天线距离、来波角度和角度扩展以及天线耦合对相关性的影响后, 将得到的相关性矩阵与信道矩阵相结合, 由式(6)可以得出天线距离、来波角度和角度扩展影响下的天线相关性因子, 由式(5)、(13)、(14)可以得出考虑所有情况下的天线阵列相关性因子, 因此  $\mathbf{R}$  矩阵可表示为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & \rho(1, n_R) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(n_R, 1) & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

同理也可求出  $\mathbf{T}$  矩阵:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & \rho(1, n_T) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho(n_T, 1) & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

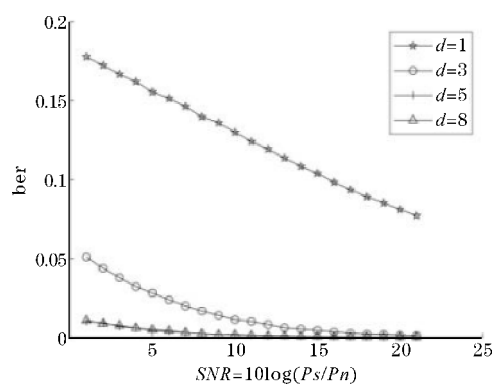
最后通过式(2)得出  $\mathbf{H}$  矩阵, 将  $\mathbf{H}$  矩阵值代入 MIMO 系统中得出其误码率, 而 MIMO 信道容量, 可以由下式得出

$$C = \log_2 [\det(I_{\min} + \frac{snr}{n_T} \mathbf{H}^H \mathbf{H})] \tag{16}$$

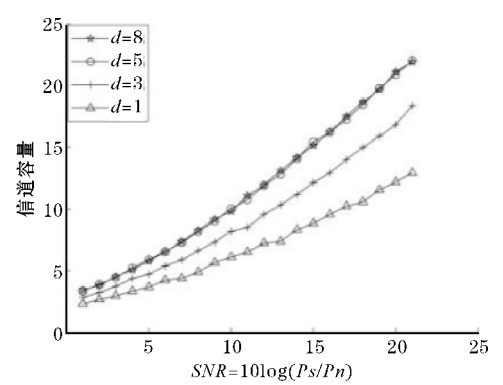
其中  $C$  代表信道容量,  $\det$  代表求解行列式的值,  $snr$  代表信噪比,  $\mathbf{H}$  代表信道矩阵。

### 3.2 天线单元距离的影响仿真

在仿真中不考虑耦合, 令信号波达角、角度扩展为相关性为零的理想情况, 通过改变天线阵列单元距离研究间距对于系统误码率和信道容量的影响。如图2所示, 随着单元间距增大, 天线误码率和信道容量都在变好, 当单元间距达到一定程度时, 两者便不会受到影响, 这是由于  $d$  的增大,  $\mathbf{V}_i(\theta) \cdot \mathbf{V}_j(\theta)^*$  也就减小, 从而相关性就变小了, 因此对系统性能影响减小。



(a) 间距对误码率的影响

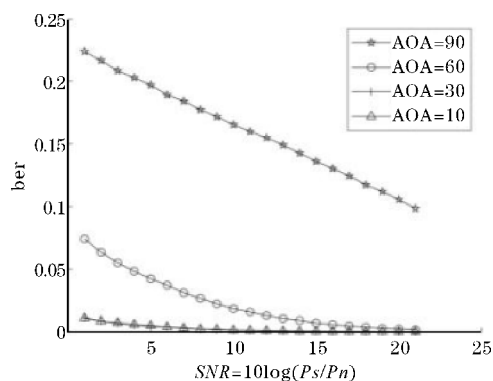


(b) 间距对信道容量的影响

图2 阵列单元间距对系统的影响

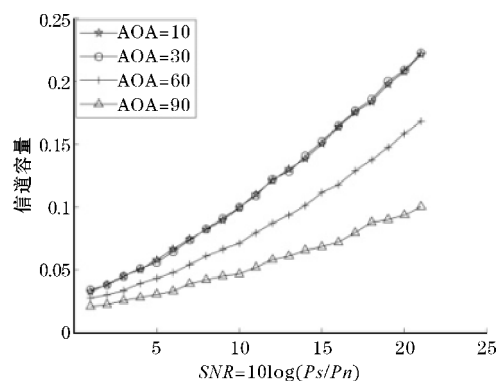
### 3.3 波达角的影响仿真

在仿真中不考虑耦合,令天线单元间距、角度扩展为相关性为零的理想情况,通过改变 AOA 的大小研究



(a) AOA 对误码率的影响

AOA 对于系统误码率和信道容量的影响。图 3 可知来波角度越大,天线的相关性也就越大,主要是因为式(6)、(7)中随着来波角度的增大, $P(\theta)$ 相应地增大,造成了相关系数的增大,使系统性能变差。

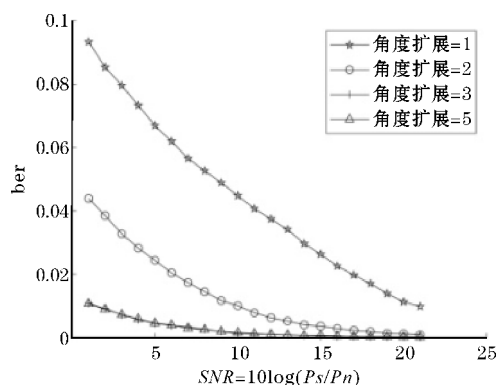


(b) AOA 对信道容量的影响

图3 AOA 对系统的影响

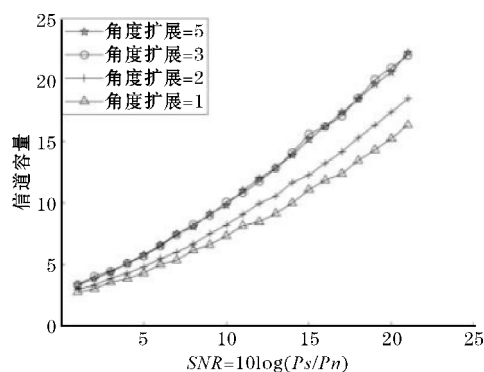
### 3.4 角度扩展的影响仿真

在仿真中不考虑耦合,令天线单元间距、信号波达角为相关性为零的理想情况,通过改变角度扩展大小



(a) 角度扩展对误码率的影响

研究角度扩展对于系统误码率和信道容量的影响。由图 4 可知角度扩展越大,天线的相关性也就越小,主要是因为式(9)中随着  $\sigma$  的增加, $P(\theta)$ 相应地减小,从而相关系数减小,使系统性能变好。

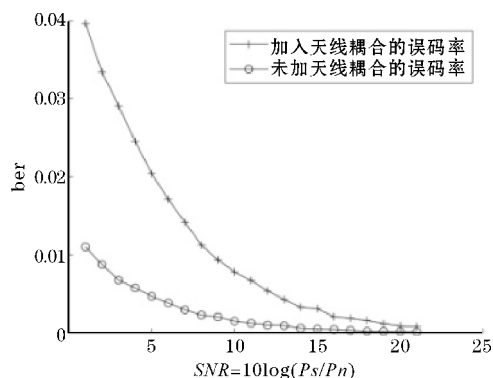


(b) 角度扩展对信道容量的影响

图4 扩展角度对系统的影响

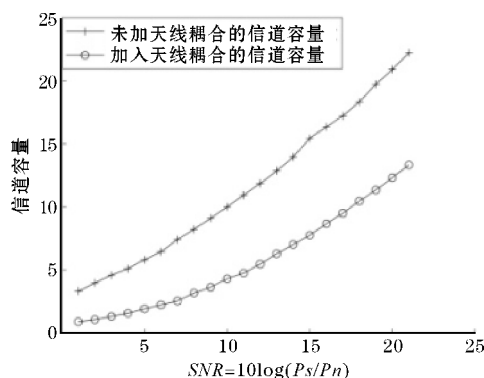
### 3.5 天线耦合的影响仿真

在考虑耦合对相关性的影响时,令天线间距、波束到达角、角度扩展对相关性的影响为零,对比理想情况下有耦合和无耦合系统的误码率和信道容量,此时天线间距、



(a) 天线耦合对误码率的影响

波束到达角、角度扩展所引起的相关性为零,令源电压阻抗和负载阻抗都为  $50 \Omega$ 。如图 5 所示,在考虑天线耦合后会使得误码率显著提高信道容量减小,其主要原因是天线阵列单元之间的间距很小时,天线阵列中的天线方向图会受邻近天线单元电磁辐射的影响发生畸变。



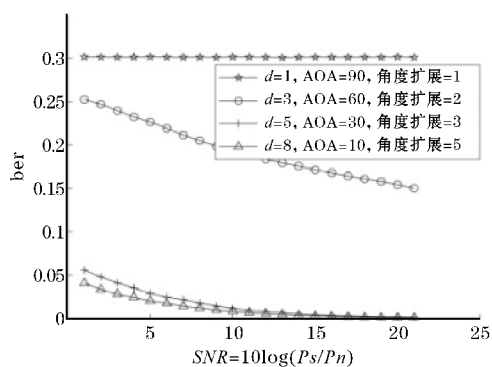
(b) 天线耦合对信道容量的影响

图5 天线耦合对系统的影响

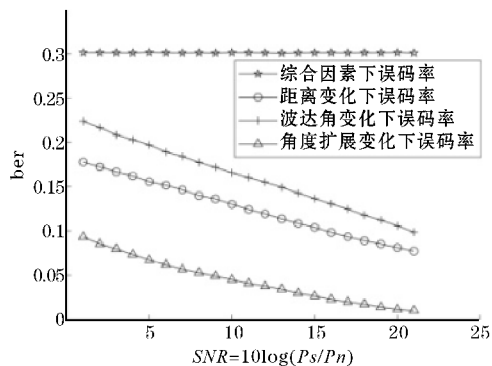


### 3.6 多因素综合影响的仿真

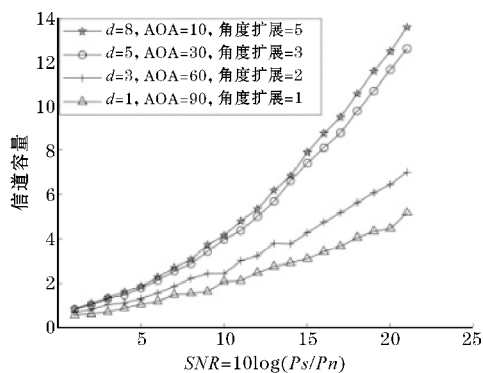
研究综合因素对相关性的影响时,考虑天线间距、波达角、角度扩展以及天线耦合对系统同时的影响,如图6(a)、(b)所示,综合考虑各因素对系统的影响后,



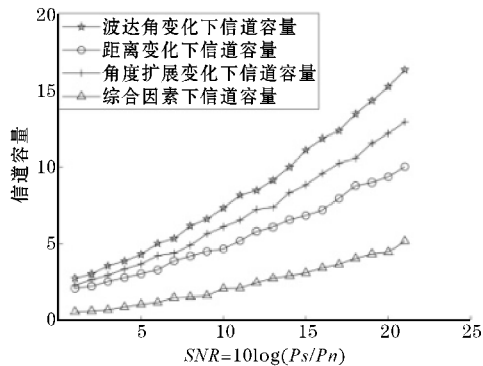
(a)综合各因素对误码率的影响



(c)单个与多个因素的误码率影响对比



(b)综合各因素对信道容量的影响



(d)单个与多个因素的信道容量影响对比

图6 综合因素对系统的影响

## 4 结束语

主要将天线间距、波达角、角度扩展以及天线耦合对相关性的影响进行综合分析,对影响 V-BLAST 天线相关性的几个因素及其对系统性能影响进行建模与仿真。结果表明天线阵列间距越大、平均波达角越小、角度扩展越大,天线耦合越小,天线之间相关性就越小,系统性能降低就越小;与无相关理想情况相比,系统误码率增大可达 30 倍,信道容量降低约 40%,若各因素综合作用下,系统误码率还可增大 1 倍,信道容量可进一步降低 30%。该结论为未来 5G 天线以及天线阵列的优化设计提供了参考作用,方便设计者理解天线多种因素相关性如何影响系统。

## 参考文献:

- [1] 吕波. MIMO 空间相关性近似算法及性能研究 [D]. 南京:南京信息工程大学,2011.
- [2] 肖道文. MIMO 系统信道相关性及闭环空时算

当  $d=1$ , 平均到达角  $\theta=90$ , 角度扩展  $\sigma=1$  时系统中误码率在 0.32 左右呈直线, 且信道容量仅为最好情况下的 32%。对比单一因素对相关性的影响, 如图 6(c)、(d), 得出综合考虑所有因素下系统性能比考虑单一因素系统性能大幅降低。

法研究 [D]. 成都:电子科技大学,2005.

- [3] 刘顺兰, 曹佳. 多天线超宽带信道建模及相关性对其影响 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2011, 31 (5): 103-106.
- [4] 杨国荣. 基于 V-BLAST 的 MIMO 无线通信系统性能分析 [J]. 系统仿真技术, 2014, 10(1): 81-84.
- [5] 钱鉴, 周杰. 天线相关性对 MIMO 系统 BER 性能的影响分析 [J]. 电信科学, 2012, 28(5): 54-59.
- [6] 李峻松. 紧凑型 MIMO 天线阵列空间衰落相关性模型分析及其性能研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2016.
- [7] 陈靖峰, 周杰. 互耦效应对天线阵单元间相关性的影响 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012, 24(4): 420-425.
- [8] 张唯希. 信道相关性对 MIMO 系统性能影响的研究 [D]. 南京:南京信息工程大学, 2011.
- [9] J Liu. Wireless multipath fading channels modeling and simulation based on Sum-of-Sinusoids [C]. 2016 First IEEE International Conference on Computer Communication and the Internet (ICCCI),

- Wuhan, 2016:165–168.
- [10] D ManhTuan, N VietAnh, S Park. Derivation and Analysis of Spatial Correlation for 2×2 MIMO System[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 8:409–413.
- [11] X Wang, H D Nguyen, H T Hui. Correlation coefficient expression by S-parameters for two omni-directional MIMO antennas[C]. 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane, WA, 2011:301–304.
- [12] M Gustafsson, J Aulin, M Höglberg, et al. Impact of mutual coupling on capacity in large MIMO antenna arrays [C]. The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2014), The Hague, 2014:2723–2727.
- [13] Seo Dongwook, Myung NohHoon. Analysis of mutual coupling effects on channel capacity of Rician MIMO channel [C]. 2008 Asia-Pacific Microwave Conference, Macau, 2008:1–4.

## Study on the Influence of V-blast Antenna Correlation on System Performance

XIE Jianfeng, GAO Yuxiang, CHU Chunyang

(College of Communication Engineering, Meteorological Information and Signal Processing Key Laboratory of Sichuan Higher Education Institutes, CUIT, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** For the factors that influence V-BLAST system antenna array correlation and the circumstance under the action of various factors on the system performance, based on V-BLAST system model and the antenna correlation theory, we put forward the corresponding theoretical model and system performance analysis model which influencing the antenna correlation, and the multiple factors and comprehensive simulation is carried out for the array correlation and system bit error rate and channel capacity. The numerical results and relevant conclusions of the changes of system bit error rate and channel capacity are obtained, under the influence of single and comprehensive factors such as antenna spacing, beam arrival Angle, Angle expansion and coupling. In comparison of the influence by single factor, under comprehensive factors, the system bit error rate is doubled at least and the channel capacity is decreased by 30% at least.

**Keywords:** signal and information processing; MIMO array; antenna correlation; bit error rate; channel capacity; MIMO antenna research