

# MIMO 系统一种新的功率分配算法及容量分析

姜永权<sup>1</sup>, 刘乃安<sup>2</sup>, 沈民奋<sup>1</sup>, 杨家玮<sup>2</sup>, 王承恕<sup>1</sup>, 周渊平<sup>3</sup>

(1. 汕头大学智能制造技术教育部重点实验室电子工程系, 广东汕头 515063;

2. 西安电子科技大学, 陕西西安 710071; 3. 四川大学, 四川成都 610065)

**摘要:** 在不额外增加发射功率和带宽消耗的情况下, 注水功率分配算法能够获得最大的多输入多输出(MIMO)系统容量. 基于拉格朗日乘数法, 推导给出了MIMO系统注水功率分配算法的显式解. 利用信道冲激响应矩阵的奇异值分解(SVD)算法, 推导给出了注水功率分配算法MIMO系统的容量分析公式. 利用数字波束形成(DBF)技术, 提出了一种新的功率分配算法, 推导给出了该算法MIMO系统的容量分析公式. 仿真结果表明, 提出的功率分配算法的系统容量虽然略低于注水功率分配算法的系统容量, 但它的计算复杂度较低.

**关键词:** 多输入多输出; 功率分配; 容量分析; 奇异值分解; 数字波束形成

**中图分类号:** TN91      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2007)09-1749-05

## A Novel Power Allocation Algorithm for MIMO Systems and Capacity Analysis

JIANG Yong-quan<sup>1</sup>, LIU Nai-an<sup>2</sup>, SHEN Min-fen<sup>1</sup>, YANG Jia-wei<sup>2</sup>, WANG Cheng-shu<sup>1</sup>, ZHOU Yuan-ping<sup>3</sup>

(1. The Key Lab of Intelligent Manufacture Technology, Ministry of Education, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China;

2. Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China; 3. Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China)

**Abstract:** The water filling power allocation algorithm can achieve the maximal capacity of multiple input multiple output (MIMO) systems with no additional power and bandwidth consumption. Based on Lagrange method, the explicit expression of the water filling power allocation algorithm for MIMO systems is derived. With the singular value decomposition (SVD) algorithm to the channel impulse response matrix, the capacity analytical equation is derived for MIMO systems with the water filling power allocation algorithm. Employing the digital beam forming (DBF) technique, a novel power allocation algorithm is proposed and the capacity equation for MIMO systems with this algorithm is derived. Simulation results show that although the capacity of systems with the proposed power allocation algorithm is slightly smaller than that of systems with the water filling power allocation algorithm, its computational complexity is lower.

**Key words:** multiple input multiple output (MIMO); power allocation; capacity analysis; singular value decomposition (SVD); digital beam forming (DBF)

## 1 引言

信息理论研究表明, 多输入多输出技术在不增加系统带宽和总发射功率的情况下, 能够获得比单输入单输出(SISO)技术更高的频谱效率(归一化容量)<sup>[1~5]</sup>. 为了便于分析比较, 本文采用归一化容量(容量密度)来表征系统容量, 即用频谱效率(单位: bit/s/Hz)来表征系统容量. MIMO系统极限容量的分析算法大致分为两类: ①基于最大互信息量的容量分析方法<sup>[3]</sup>; ②信道冲激响应矩阵奇异值分解的容量分析方法<sup>[4,5]</sup>. 两类分析方法均表明, 平均功率分配算法MIMO系统的极限容量依赖于

信道的相关矩阵.

注水原理研究表明, 在不增加总发射功率的前提下, 注水功率分配算法能够获得比平均功率分配算法更大的MIMO系统容量<sup>[6]</sup>. 基于拉格朗日乘数法, 本文推导给出了MIMO系统注水功率分配算法的显式解. 在此基础上, 推导给出了注水功率分配算法MIMO系统的容量分析公式. 注水功率分配算法采用逐步搜索法来求解子信道的分配功率, 因而它的计算复杂度较高. 利用数字波束形成(DBF)技术, 提出了一种新的低计算复杂度的功率分配算法, 推导给出了该算法MIMO系统的容量分析公式.

本文内容安排如下,第2节给出了平均功率分配算法MIMO系统的容量分析公式,第3节给出了注水功率分配算法MIMO系统的容量分析公式,第4节提出了一种低计算复杂度的功率分配算法,给出了该算法的系统容量分析公式,第5节通过数值计算对各种MIMO系统的容量进行了分析比较,第6节对全文进行总结。

## 2 平均功率分配算法 MIMO 系统的容量分析

平均功率分配算法在多天线间平均分配MIMO系统的总发射功率。MIMO信道为组合信道,组合信道的总容量小于等于每个信道独立使用时的容量总和。只有当组合信道彼此正交时,组合信道的总容量才等于每个信道独立使用时的容量总和。通过对信道冲激响应矩阵进行奇异值分解(SVD),找出MIMO信道中包含的正交SISO信道组,则MIMO信道容量等于正交SISO信道容量的总和。

用  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_K]^T$  表示任一时刻的发射信号列矢量,  $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_M]^T$  表示归一化接收信号列矢量,  $\mathbf{n} = [n_1 \ n_2 \ \dots \ n_M]^T$  表示归一化接收噪声列矢量,其中  $K$  代表发射天线的数量,  $M$  代表接收天线的数量,上标  $T$  表示矩阵的转置运算。对于窄带MIMO系统(如在一个OFDM子载波上),  $\mathbf{y}$  可用下式表示<sup>[1-5]</sup>

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中  $M \times K$  矩阵  $\mathbf{H}$  为归一化信道冲激响应矩阵。

令  $\mathbf{H} = \mathbf{F}\mathbf{D}\mathbf{G}^\dagger$ , 对式(1)中的  $\mathbf{H}$  进行奇异值分解,其中上标  $\dagger$  表示矩阵的共轭转置运算。  $\mathbf{F}$  和  $\mathbf{G}$  都是酉矩阵,即  $\mathbf{F}\mathbf{F}^\dagger = \mathbf{I}_M$ ,  $\mathbf{G}\mathbf{G}^\dagger = \mathbf{I}_K$ 。  $\mathbf{D}$  是对角矩阵

$$\mathbf{D} = \text{diag}(\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \dots, \sqrt{\lambda_r}, 0, \dots, 0) \quad (2)$$

其中  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$  为信道相关  $\mathbf{Q}$  矩阵(又称 Wishart 矩阵)的特征值。  $\mathbf{Q}$  的表达式如下:

$$\mathbf{Q} = \begin{cases} \mathbf{H}\mathbf{H}^\dagger, & M \leq K \\ \mathbf{H}^\dagger\mathbf{H}, & M > K \end{cases} \quad (3)$$

其中  $r = \min(K, M)$  为发射天线与接收天线数量的较小者,即  $\mathbf{Q}$  矩阵的最大秩。

将  $\mathbf{H} = \mathbf{F}\mathbf{D}\mathbf{G}^\dagger$  代入式(1),则式(1)可改写如下:

$$\mathbf{y}' = \mathbf{D}\mathbf{x}' + \mathbf{n}' \quad (4)$$

其中  $\mathbf{y}' = \mathbf{F}^\dagger\mathbf{y}$  为正交信道组的输出信号列矢量,  $\mathbf{x}' = [x'_1 \ x'_2 \ \dots \ x'_K]^T = \mathbf{G}^\dagger\mathbf{x}$  为正交信道组的输出信号列矢量,  $\mathbf{n}' = [n'_1 \ n'_2 \ \dots \ n'_M]^T = \mathbf{F}^\dagger\mathbf{n}$  为正交信道组的输出噪声列矢量。

由式(2)、(4),我们得到MIMO系统中包含的  $r$  个正交SISO子信道,因此MIMO系统的容量可由下式给出<sup>[4,5]</sup>:

$$C_{MIMO} = \sum_{i=1}^r \log_2(1 + \lambda_i \gamma_i) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (5)$$

其中  $\gamma_i = E\{|x'_i|^2\}/E\{|n'_i|^2\} = P_{x'_i}/\sigma_{n'_i}^2$  为第  $i$  正交子信道的平均信噪比(SNR)。用  $P_{x'_i}$  表示第  $i$  正交子信道的发射功率  $E\{|x'_i|^2\}$ ,  $\sigma_{n'_i}^2$  表示第  $i$  正交子信道的归一化噪声功率  $E\{|n'_i|^2\}$ 。

假设多天线的接收噪声具有正交性,即  $E\{\mathbf{m}\mathbf{m}^\dagger\} = \sigma^2\mathbf{I}_M$ , 其中  $\sigma^2 = E\{|n_i|^2\}$  为每路天线接收的归一化噪声的平均功率。由  $\mathbf{n}'_i = \mathbf{F}^\dagger\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{f}_i^\dagger\mathbf{f}_i = 1$ ,  $\mathbf{f}_i$  是酉矩阵  $\mathbf{F}$  的第  $i$  列,得到如下关系:

$$\sigma_{n'_i}^2 = E\{\mathbf{f}_i^\dagger\mathbf{m}\mathbf{f}_i\} = \sigma^2\mathbf{f}_i^\dagger\mathbf{I}_M\mathbf{f}_i = \sigma^2 \quad (6)$$

假设多天线的发射信号具有正交性且平均分配发射功率,即  $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^\dagger\} = \frac{P_T}{K}\mathbf{I}_K$ ,  $P_T$  表示MIMO系统的总发射功率。由  $\mathbf{x}'_i = \mathbf{g}_i^\dagger\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{g}_i^\dagger\mathbf{g}_i = 1$ ,  $\mathbf{g}_i$  是酉矩阵  $\mathbf{G}$  的第  $i$  列,得到如下关系:

$$P_{x'_i} = E\{\mathbf{g}_i^\dagger\mathbf{x}\mathbf{x}^\dagger\mathbf{g}_i\} = \frac{P_T}{K}\mathbf{g}_i^\dagger\mathbf{g}_i = \frac{P_T}{K} \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(5),得到平均功率分配算法MIMO系统的容量分析公式:

$$C_{MIMO}^{avg} = \sum_{i=1}^r \log_2\left(1 + \lambda_i \frac{\rho}{K}\right) = \log_2 \det\left[\mathbf{I}_r + \frac{\rho}{K}\mathbf{Q}\right] \quad \text{bit/s/Hz} \quad (8)$$

其中  $\rho = P_T/\sigma^2$  为总发射功率与归一化噪声功率之比,  $\mathbf{I}_r$  为  $r \times r$  单位矩阵,  $\det(\cdot)$  表示方阵的行列式运算。由于式(1)中对接收噪声进行了归一化处理,因此  $\rho = P_T/\sigma^2$  实际上反映了接收端的信噪比。当  $K = M = 1$  时,式(8)退化为SISO系统的容量分析公式:

$$C_{SISO} = \log_2(1 + \rho|\mathbf{H}|^2) \quad \text{bit/s/Hz} \quad (9)$$

## 3 注水功率分配算法 MIMO 系统的容量分析

设MIMO系统总发射功率  $P_T$  保持不变,即

$\sum_{i=1}^K |x_i|^2 = \text{Tr}(\mathbf{x}\mathbf{x}^\dagger) = P_T$ , 其中  $\text{Tr}(\cdot)$  为矩阵的迹。根据线性代数理论,有

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K P_{x'_i} &= \text{Tr}(\mathbf{x}'\mathbf{x}'^\dagger) = \text{Tr}(\mathbf{G}^\dagger\mathbf{x}\mathbf{x}^\dagger\mathbf{G}) = \text{Tr}(\mathbf{x}\mathbf{x}^\dagger) \\ &= \sum_{i=1}^K |x_i|^2 = P_T \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)表明,正交子信道组的总发射功率仍然为  $P_T$ 。如何在正交子信道间分配总发射功率  $P_T$ , 才能获得最大的MIMO系统容量呢? 这是一个有约束条件的极值问题。根据拉格朗日乘数法,引入目标函数<sup>[6]</sup>

$$J = \sum_{i=1}^K \log_2\left(1 + \lambda_i \frac{P_{x'_i}}{\sigma^2}\right) + L\left(P_T - \sum_{i=1}^K P_{x'_i}\right) \quad (11)$$

令  $\frac{\partial J}{\partial P_{x'_i}} = 0$ , 求得第  $i$  正交子信道的发射功率

$$P_{x'_i} = \frac{1}{L \ln 2} \frac{\sigma^2}{\lambda_i} = \bar{P} - \frac{P_T}{\rho \lambda_i} \quad (12)$$

式(12)中  $\bar{P} = \frac{1}{L \ln 2}$  为待定常数,  $\rho = \frac{P_T}{\sigma^2}$  为总发射功率与归一化噪声功率之比。考虑到发射功率  $P_{x'_i}$  只能为正值, 得到如下的注水功率分配算法<sup>[6]</sup>:

$$P_{x'_i} = \max \left\{ \bar{P} - \frac{P_T}{\rho \lambda_i}, 0 \right\} \quad (13)$$

其中  $\max\{\cdot, \cdot\}$  表示取最大值运算, 而  $\bar{P}$  的取值受总发射功率  $P_T$  的限制<sup>[6]</sup>:

$$\sum_{i=1}^r \max \left\{ \bar{P} - \frac{P_T}{\rho \lambda_i}, 0 \right\} = P_T \quad (14)$$

以下给出  $\bar{P}$  的求解算法。由式(13)、(14)可知,  $\lambda_i$  较大的正交子信道将被分配较多的发射功率,  $\lambda_i$  较小的正交子信道将被分配较少的发射功率, 甚至不分配任何的发射功率。为了获得  $\bar{P}$  的显式解, 对  $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, r$  由大到小重新排序。以下的  $\lambda_i$  是指排序后的取值。同时对正交子信道也按  $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, r$  由大到小重新排序。设前  $N_{uf}$  个正交子信道分配的发射功率不为零, 而后  $r - N_{uf}$  个正交子信道分配的发射功率为零, 则式(14)改写为

$$\bar{P} = \frac{P_T}{N_{uf}} + \frac{P_T}{N_{uf} \rho} \sum_{i=1}^{N_{uf}} \frac{1}{\lambda_i} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13), 得到如下关系:

$$\frac{1}{N_{uf}} + \frac{1}{N_{uf} \rho} \sum_{i=1}^{N_{uf}} \frac{1}{\lambda_i} > \frac{1}{\rho \lambda_{N_{uf}}} \quad (16)$$

$N_{uf}$  的取值越小, 式(16)的不等方程越容易满足。初始值令  $N_{uf} = 1$ , 通过逐次加 1 逐步搜索法, 可确定满足式(16)不等方程的  $N_{uf}$  最大值。由于  $N_{uf}$  的取值越小, 式(16)的不等方程越容易满足, 且  $N_{uf} \leq r$ , 所以  $N_{uf}$  的最大值一定存在。一旦  $N_{uf}$  的最大值  $N_{uf}^{\max}$  确定了,  $\bar{P}$  的最优值由式(15)确定, 则注水功率分配算法的显式解:

$$P_{x'_i} = \frac{P_T}{N_{uf}^{\max}} - \frac{P_T}{\rho \lambda_i} + \frac{P_T}{N_{uf}^{\max} \rho} \sum_{i=1}^{N_{uf}^{\max}} \frac{1}{\lambda_i} \quad (17)$$

将式(17)代入式(5)中, 便得到注水功率分配算法 MIMO 系统的容量分析公式:

$$C_{MIMO}^{wf} = \sum_{i=1}^{N_{uf}^{\max}} \log_2 \left[ \frac{\lambda_i \rho}{N_{uf}^{\max}} + \frac{\lambda_i}{N_{uf}^{\max} \rho} \sum_{j=1}^{N_{uf}^{\max}} \frac{1}{\lambda_j} \right] \text{ bit/s/Hz} \quad (18)$$

注意式(18)的结论并不要求发射信号具有正交性。

#### 4 低计算复杂度功率分配算法及系统容量分析

在 MIMO 系统的接收端采用 DBF 算法以实现信道的空间多波束分割, 可构成波束信道 MIMO 系统。用  $z = [z_1 z_2 \dots z_B]^T$  表示任一时刻  $B$  个波束信道的输出信号列矢量。由式(1)得

$$z = Bx + q \quad (19)$$

其中  $B = W^H H$  为波束信道冲激响应矩阵, 为  $q = W^H n$

$= [q_1 q_2 \dots q_B]^T$  波束信道噪声列矢量, 波束信道权系数矩阵由各波束的权系数列矢量构成:

$$W = [w_1 w_2 \dots w_b \dots w_B] \quad (20)$$

其中  $w_b$  为第  $b$  波束的权系数列矢量。对于均匀线阵,  $\theta_b$  指向的第  $b$  波束信道的权系数矢量

$$w_b = \frac{1}{\sqrt{M}} [1 e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta_b} \dots e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (m-1) d \sin \theta_b} \dots e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d \sin \theta_b}]^T \quad (21)$$

其中  $\lambda$  为射频载波的波长。式(21)中对  $w_b$  的归一化处理保证了每个波束信道的输出噪声功率与单天线的输出噪声功率相同。

令  $B = UOV^H$ , 对  $B$  进行 SVD 分解, 其中  $U$  和  $V$  是酉矩阵,  $O$  是对角矩阵

$$O = \text{diag}(\sqrt{\xi_1}, \sqrt{\xi_2}, \dots, \sqrt{\xi_s}, 0, \dots, 0) \quad (22)$$

其中  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_s$  为波束信道相关矩阵  $P$  的特征值。  $P$  的表达式如下:

$$P = \begin{cases} BB^H, & B \leq K \\ B^H B, & B > K \end{cases} \quad (23)$$

$s = \min(K, M, B)$  为  $P$  矩阵的最大秩。

将  $B = UOV^H$  代入式(19), 则式(19)改写为

$$z' = O x'' + q' \quad (24)$$

其中  $z' = U^H z$ ,  $x'' = [x_1'' x_2'' \dots x_K'']^T = V^H x$ ,  $q' = [q_1' q_2' \dots q_B']^T = U^H q$ ,  $x_i'' = v_i^H x$ ,  $q_i' = u_i^H q$ ,  $u_i$  是  $U$  的第  $i$  列,  $v_i$  是  $V$  的第  $i$  列。

由式(24), 我们得到波束信道 MIMO 系统中包含的  $s$  个正交子信道, 因此波束信道 MIMO 系统的容量可由下式给出:

$$C_{MIMO}^{beam} = \sum_{i=1}^s \log_2(1 + \xi_i \eta_i) \text{ bit/s/Hz} \quad (25)$$

其中  $\eta_i = E\{|x_i''|^2\} / E\{|q_i'|^2\} = P_{x_i''} / \sigma_{q_i'}^2$  为第  $i$  正交子信道的平均 SNR。用  $P_{x_i''}$  表示波束信道 MIMO 系统第  $i$  正交子信道的发射功率  $E\{|x_i''|^2\}$ ,  $\sigma_{q_i'}^2$  表示第  $i$  正交子信道的接收噪声功率  $E\{|q_i'|^2\}$ 。

假定  $E\{nn^H\} = \sigma^2 I_M$ 。由  $q_i' = u_i^H q$  和  $q = W^H n$ , 我们得到如下关系:

$$\begin{aligned} \sigma_{q_i'}^2 &= E\{|q_i'|^2\} = E\{u_i^H q q^H u_i\} = E\{u_i^H W^H n n^H W u_i\} \\ &= \sigma^2 u_i^H W^H W u_i = \mu_i \sigma^2 \end{aligned} \quad (26)$$

其中  $\mu_i = u_i^H W^H W u_i$  为第  $i$  正交子信道的噪声功率与单个天线的噪声功率之比, 称为第  $i$  正交子信道的噪声系数。

假设 MIMO 系统总发射功率为  $P_T$  且保持不变。根据线性代数理论, 有

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^K P_{x_i''} &= \text{Tr}(x'' x''^H) = \text{Tr}(V^H x x^H V) = \text{Tr}(x x^H) \\ &= \sum_{i=1}^K |x_i|^2 = P_T \end{aligned} \quad (27)$$

式(27)表明,波束信道MIMO系统中包含的正交子信道组总的发射功率仍然为 $P_T$ ,即没有增加发射功率.由式(26)我们发现,在波束信道MIMO系统中,各正交子信道的噪声系数并不相同.为了抵消噪声系数对各子信道SNR的影响,我们根据噪声系数的大小对各正交子信道进行线性功率分配,提出了如下的功率分配算法:

$$\begin{cases} P_{x_i} = \frac{\mu_i P_T}{\sum_{i=1}^s \mu_i}, & i = 1, 2, \dots, s \\ P_{x_i} = 0, & i = s+1, \dots, K \end{cases} \quad (28)$$

将式(26)、(28)代入式(25)中,便得到提出的功率分配算法MIMO系统的容量分析公式:

$$\begin{aligned} C_{MIMO}^{Novel} &= \sum_{i=1}^s \log_2 \left[ 1 + \rho \frac{\xi_i}{\sum_{j=1}^s \mu_j} \right] \\ &= \log_2 \det \left[ I_s + \frac{\rho}{\sum_{i=1}^s \mu_i} P \right] \quad \text{bit/s/Hz} \end{aligned} \quad (29)$$

其中 $I_s$ 为 $s \times s$ 单位矩阵.可以证明 $\sum_{i=1}^s \mu_i = B$ ,代入式(29),得

$$C_{MIMO}^{Novel} = \sum_{i=1}^s \log_2 \left[ 1 + \rho \frac{\xi_i}{B} \right] = \log_2 \det \left[ I_s + \frac{\rho}{B} P \right] \quad \text{bit/s/Hz} \quad (30)$$

同样式(30)的结论并不要求发射信号具有正交性.

### 5 数值结果与分析

考虑到来自不同波达角度(AOA)的多径分量间的相关性较弱这一事实,我们以AOA进行多径分量划分.基于阵列方向响应矢量<sup>[7,8]</sup>,归一化信道冲激响应矩阵由以下仿真算法产生

$$H = \frac{1}{\sqrt{\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^L |a_k^i|^2}} \sum_{i=1}^L [a_1^i A(\theta_1^i) \ a_2^i A(\theta_2^i) \ \dots \ a_k^i A(\theta_k^i) \ \dots \ a_k^i A(\theta_k^i)] \quad (31)$$

其中 $a_k^i$ 为第 $k$ 发射天线的第 $i$ 个AOA多径分量到第1个接收天线的空间传输复系数, $\theta_k^i$ 为第 $k$ 发射天线的第 $i$ 多径分量的AOA, $A(\theta_k^i)$ 为 $\theta_k^i$ 对应的 $M \times 1$ 阵列方向响应矢量.对于相邻间隔为 $d$ 的均匀线阵,阵列方向响应列矢量

$$A(\theta) = [1 \ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta} \ \dots \ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (m-1) d \sin \theta} \ \dots \ e^{j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) d \sin \theta}]^T \quad (32)$$

仿真系统中接收端均匀线阵的相邻间隔 $d = \lambda/2$ ,空间传输复系数 $a_k^i$ 的实部、虚部均由 $N(0,1)$ 的高斯随机变量模型产生.波达角度 $\theta_k^i$ 由 $\Delta\theta$ 区间的均匀分布

随机变量模型产生.作为举例,取发射天线数量 $K=6$ ,接收天线数量 $M=4$ .在AOA空间角度扩散量 $\Delta\theta$ 为120度、60度、30度的情况下,图1~3分别给出了注水功率分配算法MIMO系统的容量、提出的功率分配算法MIMO系统的容量、平均功率分配算法MIMO系统的容量与信噪比关系曲线.通过对数值结果进行分析比较,我们得出以下的结论:

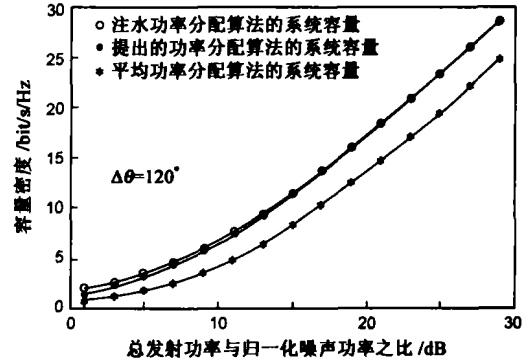


图1 各种MIMO系统的极限容量与信噪比关系曲线(AOA扩散量为120度)

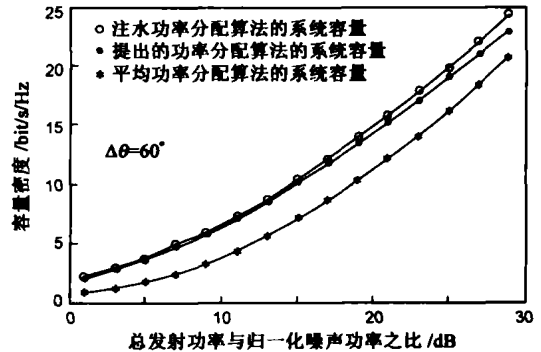


图2 各种MIMO系统的极限容量与信噪比关系曲线(AOA扩散量为60度)

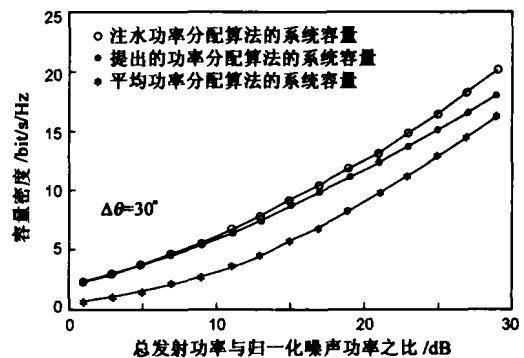


图3 各种MIMO系统的极限容量与信噪比关系曲线(AOA扩散量为30度)

①提出的功率分配算法的系统容量与注水功率分配算法的系统容量基本相近,略小于注水功率分配算法的系统容量.特别是当AOA扩散量较大时,两种算法的系统容量非常接近.

②在AOA扩散量较小的情况下,提出的功率分配

算法、注水功率分配算法的系统容量较平均功率分配算法的系统容量有更大的提高。AOA 扩散量小, MIMO 空间信道间的相关性强, 信道相关矩阵特征值间的差异大, 非平均功率分配算法能够更好地利用当前的信道条件。

③在各种信噪比条件下, 提出的功率分配算法、注水功率分配算法较平均功率分配算法对系统容量的提升量基本相同。当信噪比较小时, 由于平均功率分配算法的系统容量较小, 非平均功率分配算法对系统容量的提升效果明显。

## 6 总结

基于拉格朗日乘法, 本文推导给出了 MIMO 系统注水功率分配算法的显式解。基于这一结果, 利用信道冲激响应矩阵的奇异值分解算法, 推导给出了注水功率分配算法 MIMO 系统的容量分析公式。利用阵列天线的 DBF 算法, 提出了一种新的功率分配算法, 推导给出了该算法 MIMO 系统的容量分析公式。基于阵列方向响应矢量, 提出了一种 MIMO 信道冲激响应矩阵的仿真算法。仿真结果表明, 提出的功率分配算法的系统容量虽然略低于注水功率分配算法的系统容量, 但它的计算复杂度较低。

### 参考文献:

- [1] V Tarokh, N Seshadri, A R Calderbank. Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and Code construction[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1998, 44(2): 744- 765.
- [2] G J Foschini, G D Golden, et al. Simplified processing for high spectral efficiency wireless communication employing multielement arrays[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1999, 17(11): 1841- 1852.
- [3] S N Diggavi. On achievable performance of spatial diversity

fading channels[J]. IEEE Trans Inform Theory, 2001, 47(1): 308- 325.

- [4] G G Raleigh, J M Cioff. Spatio-temporal coding for wireless communication[J]. IEEE Trans Commun, 1998, 46(3): 357- 366.
- [5] D Gesbert, M Shafi, et al. From theory to practice: an overview of MIMO space-time coded wireless systems[J]. IEEE J Select Areas Commun, 2003, 21(3): 281- 302.
- [6] B Vucetic, J H Yuan. Space-Time Coding[M]. Beijing: China Machine Press, 2004. 4- 42.
- [7] J Razavilar, F R Farokhi, et al. Software radio architecture with smart antennas: a tutorial on algorithms and complexity[J]. IEEE J Select Areas Commun, 1999, 17(4): 662- 676.
- [8] A Kavak, M Torlak, et al. Vector channels for smart antennas: Measurements, statistical modeling, and directional properties in outdoor environments[J]. IEEE Trans Microwave Theory Tech, 2000, 48(1): 930- 937.

### 作者简介:



姜永权 男, 1965 年 6 月出生于辽宁省瓦房店市, 汕头大学工程系教授、硕士生导师, 中国电子学会高级会员。分别于 1988、1991、2006 年毕业于大连理工大学、中国空间技术研究院、中山大学, 获工学学士、工学硕士、理学博士学位。主要研究领域包括无线通信中的智能天线技术、空时二维自适应信号处理技术、MIMO 及虚拟 MIMO 技术、MIMO-OFDM 技术等。

E-mail: jyq@stu.edu.cn

刘乃安 男, 1966 年 2 月出生, 1988 年毕业于大连理工大学电子工程系, 获学士学位, 1991 年毕业于西安电子科技大学通信与电子系统专业, 获工学硕士学位, 现任西安电子科技大学综合业务网络论及关键技术国家重点实验室教授、硕士研究生导师, 移动计算网络课题组组长, 主要研究方向为宽带无线 IP 网络与技术、无线局域网、无线通信与射频技术、扩频技术与通信对抗。

E-mail: naliu@mail.xidian.edu.cn