

文章编号 1004-924X(2015)增-0600-06

联合能量约束下最大信道容量的 线性多输入多输出预编码设计

刘金华^{1*}, 汪彦龙^{1,2}, 戴继生³

1. 浙江传媒学院 电子信息学院, 浙江 杭州 310018;
2. 中国科学技术大学 电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230026;
3. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要:在发射总能量受限或峰值能量受限条件下,线性多输入多输出预编码不能很好地满足实际应用要求。因此,本文从凸优化理论出发,提出了在总能量和最大特征能量联合约束下适用于最大信道容量的线性 MIMO 预编码设计算法。通过对能量特征向量矩阵和能量特征值的特性研究,推导出了能量特征向量矩阵的闭式解,并提出了一种用于确定能量特征值的二维整数搜索算法。由于各维所需搜索点的数目小于系统发射天线的根数,因此提出的方法计算量小,运算效率较高,系统性能优于传统的 l_p 范数能量约束算法。

关键词:多输入多输出;预编码;联合能量约束;信道容量

中图分类号:TN911.25 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0600

Linear MIMO precoder optimization with maximizing channel capacity under joint power constraints

LIU Jin-hua^{1*}, WANG Yan-long^{1,2}, DAI Ji-sheng³

1. School of Electrical and Information, Zhejiang University of Communication and Media, Hangzhou 310018, China;
 2. Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
 3. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)
- * Corresponding author, E-mail: liujinh@163.com

Abstract: When the sum-powers and peak powers of transmit antennas are constrained, the linear precoders of multiple-input multiple-output (MIMO) systems can not well adapt to the practical applications. Therefore, this paper proposes a linear MIMO precoder optimization algorithm with maximizing channel capacity under joint power constraints (sum-powers and maximum eigenvalue) based on the convex optimization theory. By mining the internal property of the eigenvalue-decomposition of the power matrix, an exact closed-form of eigenmode is given and a two-dimensional searching method for

收稿日期:2015-05-20;修订日期:2015-06-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61102054);浙江省科技计划资助项目(No. 2013C33073)

deriving the values of the eigenvalues is proposed. As the searching points in every dimension are less than the number of the transmit antennas launched by the system, the algorithm has lower computational complexity and higher computer efficiency. Finally, simulation results verify the efficiency of the proposed method.

Key words: multiple-input multiple-output (MIMO); precoder; joint power constraint; channel capacity

1 引言

目前,相比于传统通信系统,由于多输入多输出(MIMO)通信系统能够提供更高的传输速率,且具有更好的链路可靠性,已成为通信领域的研究热点^[1-3]。为了进一步增加多输入多输出(MIMO)通信系统的频谱利用率,提高链路可靠性,国内外研究人员对线性 MIMO 预编码设计展开了研究。Sampath 等人^[4]提出了一种适用于总能量受限的最优预编码设计方案,该方案基于一种广义最小加权均方误差(MSE)准则(或者为最小 MSE 矩阵迹加权准则),运用代价函数加权理论证明多种 MIMO 系统设计准则存在着相关性:如果适当选取加权矩阵,则广义最小加权均方误差(MSE)准则可与最小均方误差准则、最大信道容量准则和等误码率准则或最大服务质量(QoS)准则相等价。Scaglione 等人^[5]关于线性 MIMO 预编码的研究则是基于最小均方误差准则,他们利用最小化联合符号估计误差和 MSE 矩阵行列式,在总能量受限和峰值能量受限情况下实现最优设计。

近期的研究表明,在总能量受限情况下,要获得最优预编码,设计方案中几乎所有的设计准则都可以采用盖理论(Majorization Theory)^[6]。

以上所阐述的各种方法只能适用于单一的总能量或峰值能量受约束的情况,但是这种情况却并不能满足所有实际应用的需求^[7-8],例如:在多天线基站系统中,每一个天线功放的物理特性要求发送天线总能量的动态范围不仅要小于某一阈值,而且它的发射能量也不能超过某一特定值。因此,联合能量受限约束下的最优线性 MIMO 系统预编码设计问题亟待解决。Feiten 等人^[8]通过在线性 MIMO 预编码设计中引入方向导数理论,提出一种用于解决最大化信道容量准则下的算法框架,从而避免要分别考虑不同能量受限约束形

式的问题。该设计框架的出发点在于 l_p 范数能量受限约束可以近似表示联合能量受限约束。在文献[9]中 Dai 等人将相关结论扩展到最小化均方误差准则的线性预编码设计中,并利用方向导数理论证明了最大化信道容量准则与最小化 MSE 矩阵行列式准则具有等价性。

虽然联合能量受限约束可用 l_p 范数能量受限约束近似表示,但因能量受限约束条件存在近似过程,故所得的能量分配策略并非最优。此外,广义 l_p 范数约束下的优化问题不存在闭式解,因此数值求解所需的迭代过程使计算复杂度增加,同时对算法的稳定性也会产生不利的影 响。为解决上述问题,本文拟从凸优化理论出发,在不采用近似方法的前提下,提出一种联合总能量约束和峰值能量约束下适用于最大信道容量准则的最优线性 MIMO 系统预编码设计算法。该算法与近似的 l_p 范数约束问题相比,能够取得最优的系统性能。虽然该算法需要二维搜索,但是由于各维所需搜索点的数目小于或等于系统发射天线的根数,因此其计算量极小,运算效率较高。

2 MIMO 信号模型及问题的数学描述

假设一个 MIMO 通信系统中具有 M 根发射天线和 N 根接收天线,满足平坦衰落无线信道条件,设定发射天线 j 和接收天线 i 之间的信道增益是信道矩阵 $\mathbf{H}_{[i,j]}$ 元素,则该系统应满足如下输出输入关系:

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

式中:向量 $\mathbf{y} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 代表接收信号,向量 $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 代表发射信号,向量 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 是归一化传输数据,矩阵 $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 是发射端预编码,向量 $\mathbf{n} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 是零均值对称复高斯噪声, \mathbf{R}_n 是它的噪声自相关矩阵,即 $\mathbf{n} \sim \text{CN}(0, \mathbf{R}_n)$ 。设数据与噪声是互不相关的随机过程,则有:

$$\begin{cases} E(\mathbf{x}\mathbf{x}^H) = \mathbf{I} \\ E(\mathbf{x}\mathbf{n}^H) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

根据 Shannon 定理, MIMO 系统的信道容量为:

$$C = \max_{\mathbf{F}} \mathbf{I}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \max_{\mathbf{F}} \log |\mathbf{I} + \mathbf{F}^H \mathbf{H}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{H} \mathbf{F}| \quad (3)$$

总能受限约束是常采用的能量约束条件之一,其具体含义为所有天线的发射总能量应小于某一给定值 φ , 即 $tr(\mathbf{F}\mathbf{F}^H) < \varphi$ 。在实际中,各根天线都分别装备了功率放大器,受放大器线性特性的限制,也应考虑各自天线发射能量的上限问题,或者说 $[\mathbf{F}\mathbf{F}^H]_{ii}$ 应受限於某一个给定值 Φ 。Scaglione 等^[5]注意到能量矩阵 $\mathbf{F}\mathbf{F}^H$ 的最大特征值 $\lambda_{\max}(\mathbf{F}\mathbf{F}^H)$ 总是大于 $[\mathbf{F}\mathbf{F}^H]_{ii}$ 的,因此,得出一个较为简单的单天线能量约束方法:通过让 $\lambda_{\max}(\mathbf{F}\mathbf{F}^H)$ 受限从而迫使 $[\mathbf{F}\mathbf{F}^H]_{ii}$ 也受限,即 $[\mathbf{F}\mathbf{F}^H]_{ii} \leq \lambda_{\max}(\mathbf{F}\mathbf{F}^H) \leq \Phi$ 。

本文考虑的联合能量约束包括总能量受限於 φ 的约束和最大特征能量受限於 Φ 的约束。为便于分析,定义能量矩阵 \mathbf{Q} 为:

$$\mathbf{Q} = E(\mathbf{s}\mathbf{s}^H) = \mathbf{F}\mathbf{F}^H \in \bar{\mathbf{Q}}, \quad (4)$$

式中 $\bar{\mathbf{Q}}$ 表示能量矩阵所在的可行域,它由联合能量约束条件确定:

$$\bar{\mathbf{Q}} = \{\mathbf{Q} | tr(\mathbf{Q}) \leq \varphi, \lambda_{\max}(\mathbf{Q}) \leq \Phi, \mathbf{Q} \geq 0\}. \quad (5)$$

此时,最大信道容量(或最大信息速率)准则下的线性 MIMO 系统预编码设计在数学上可描述为:

$$\left| \mathbf{I} + \frac{\mathbf{\Pi}_1 \dot{\mathbf{Q}} \mathbf{\Pi}_1 + \dot{\mathbf{Q}}}{2} \right| \geq \frac{|\mathbf{I} + \mathbf{\Pi}_1 \dot{\mathbf{Q}} \mathbf{\Pi}_1 \Lambda| + |\mathbf{I} + \dot{\mathbf{Q}} \Lambda|}{2} = |\mathbf{I} + \dot{\mathbf{Q}} \Lambda|. \quad (10)$$

若定义:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Q}}_1 = \frac{\mathbf{\Pi}_1 \dot{\mathbf{Q}} \mathbf{\Pi}_1 + \dot{\mathbf{Q}}}{2} \\ \dot{\mathbf{Q}}_2 = \frac{\mathbf{\Pi}_2 \dot{\mathbf{Q}}_1 \mathbf{\Pi}_2 + \dot{\mathbf{Q}}_1}{2} \\ \dot{\mathbf{Q}}_l = \frac{\mathbf{\Pi}_l \dot{\mathbf{Q}}_{l-1} \mathbf{\Pi}_l + \dot{\mathbf{Q}}_{l-1}}{2}, l = 3, 4, \dots, M \end{cases} \quad (11)$$

易见

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{F}} \log |\mathbf{I} + \mathbf{F}^H \mathbf{H}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{H} \mathbf{F}| \\ & \text{s. t. } \begin{cases} tr(\mathbf{F}\mathbf{F}^H) \leq \varphi \\ \lambda_{\max}(\mathbf{F}\mathbf{F}^H) \leq \Phi \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

或者,等价地表示为:

$$\max_{\mathbf{Q} \in \bar{\mathbf{Q}}} |\mathbf{I} + \mathbf{R}_H \mathbf{Q}| \quad (7)$$

式中 $\mathbf{R}_H = \mathbf{H}^H \mathbf{R}_n^{-1} \mathbf{H}$ 。

3 联合能量约束情况下最大信道容量的 MIMO 预编码设计

本文将利用凸优化理论求解关于联合能量约束下的最大信道容量优化问题(7)。

定义矩阵 \mathbf{R}_H 的特征值分解(EVD)为:

$$\mathbf{R}_H = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H, \quad (8)$$

式中 $\mathbf{U} \in C^{M \times M}$ 为特征向量矩阵, $\mathbf{\Lambda} \in C^{M \times M}$ 为特征值矩阵且特征值按降序排列。下面将证明最优能量矩阵 \mathbf{Q} 的特征向量矩阵与 \mathbf{U} 密切相关,即:

定理 1. 若定义 $\mathbf{Q} = \mathbf{U}_q \mathbf{\Lambda}_q \mathbf{U}_q^H$ 为能量矩阵 \mathbf{Q} 的特征分解形式,则有 $\mathbf{U}_q = \mathbf{U} \mathbf{\Pi}$ 。

证明:根据能量矩阵 \mathbf{Q} 的特征分解形式,有:

$$\begin{aligned} |\mathbf{I} + \mathbf{R}_H \mathbf{Q}| &= |\mathbf{I} + \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{U}^H \mathbf{U}_q \mathbf{\Lambda}_q \mathbf{U}_q^H| = \\ &= |\mathbf{I} + \dot{\mathbf{Q}} \mathbf{\Lambda}| \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{U}^H \mathbf{U}_q \mathbf{\Lambda}_q \mathbf{U}_q^H \mathbf{U}$ 。证明最优能量特征矩阵 $\mathbf{U}_q = \mathbf{U} \mathbf{\Pi}$ 与证明矩阵 $\dot{\mathbf{Q}}$ 非对角线元素的归零化会使目标函数(7)的值增加。如果定义一个对角矩阵 $\mathbf{\Pi}_1$, 它的第 1 个对角线元素为 -1, 其它对角线元素为 1, 那么,根据 Jensen's 不等式,有:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{Q}}_M = \text{diag}(\dot{\mathbf{Q}}_{11}, \dot{\mathbf{Q}}_{22}, \dots, \dot{\mathbf{Q}}_{MM}) \\ tr(\dot{\mathbf{Q}}_M) = tr(\dot{\mathbf{Q}}) \\ \dot{\mathbf{Q}}_{ii} \leq \lambda(\dot{\mathbf{Q}}), \forall i \end{cases} \quad (12)$$

式中最后一个不等式由下式决定:

$$\dot{\mathbf{Q}}_{ii} = \mathbf{e}_i^H \dot{\mathbf{Q}} \mathbf{e}_i \leq \max_{\|x\|=1} x^H \dot{\mathbf{Q}} x = \lambda_{\max}(\dot{\mathbf{Q}}), \forall i, \quad (13)$$

式中 \mathbf{e}_i 为一个除了第 i 个元素为 1 的全零向量。

如果 \mathbf{Q} 为可行解,那么新矩阵 $\mathbf{Q}^0 = \mathbf{U}\dot{\mathbf{Q}}_M\mathbf{U}^H$ 一定 包含在可行域内,并且由式(10)和式(11),有:

$$|\mathbf{I} + \mathbf{R}_H \mathbf{Q}^0| = |\mathbf{I} + \dot{\mathbf{Q}}_M \mathbf{\Lambda}| \geq |\mathbf{I} + \dot{\mathbf{Q}}_{M-1} \mathbf{\Lambda}| \geq \dots \geq |\mathbf{I} + \dot{\mathbf{Q}}_1 \mathbf{\Lambda}| \geq |\mathbf{I} + \mathbf{R}_H \mathbf{Q}|. \quad (14)$$

综上所述,结论得证。

根据定理 1,优化问题(7)可简化为:

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{\Lambda}_q, \mathbf{H}} \log |\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q| \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \text{tr}(\mathbf{\Lambda}_q) \leq \varphi \\ 0 \leq [\mathbf{\Lambda}_q]_{ii} \leq \Phi \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

为求解上述问题,列出该式的拉格朗日对偶式:

$$L(\mathbf{\Lambda}_q, \gamma, \mathbf{\Gamma}) = |\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q| + \gamma(\text{tr}(\mathbf{\Lambda}_q) - \varphi) + \text{tr}(\mathbf{\Gamma}(\mathbf{\Lambda}_q - \Phi \mathbf{I})) + \text{tr}(\mathbf{\Omega} \mathbf{\Lambda}_q), \quad (16)$$

式中 $\gamma, \mathbf{\Gamma}, \mathbf{\Omega}$ 为拉格朗日乘子,且 $\mathbf{\Gamma}$ 和 $\mathbf{\Omega}$ 为对角矩阵。Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 最优条件表明,优化问题(15)取得最优值的充分必要条件是式(17)~(20)成立:

$$\gamma(\text{tr}(\mathbf{\Lambda}_q) - \varphi) = 0, \quad (17)$$

$$\text{tr}(\mathbf{\Gamma}(\mathbf{\Lambda}_q - \Phi \mathbf{I})) = 0, \quad (18)$$

$$\text{tr}(\mathbf{\Omega} \mathbf{\Lambda}_q) = 0, \quad (19)$$

$$|\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q| (\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q)^{-1} \mathbf{\Lambda} + \gamma \mathbf{I} + \mathbf{\Gamma} + \mathbf{\Omega} = 0. \quad (20)$$

为了充分挖掘 KKT 最优条件的内在含义,定义 $[\mathbf{\Lambda}]_{ii} = \lambda_i$, $[\mathbf{\Lambda}_q]_{ii} = q_i$, $[\mathbf{\Gamma}]_{ii} = \tau_i$ 和 $[\mathbf{\Omega}]_{ii} = \omega_i$,接着分情况讨论 $\mathbf{\Lambda}$ 对角元素的所有可能取值:

(1) 当 $q_i = 0$ 时,有 $\tau_i = 0$ 。由式(20)得:

$$(1 + \lambda_i q_i)^{-1} \lambda_i = \mu_i, \quad (21)$$

式中 $\mu_i = -(\gamma + \omega_i) |\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q|^{-1}$ 。对于不同的 i ,无法确定 μ_i 是否相等。

(2) 当 $q_i = \Phi$ 时,有 $\omega_i = 0$ 。由式(20)得:

$$(1 + \lambda_i q_i)^{-1} \lambda_i = \mu_i, \quad (22)$$

式中 $\mu_i = -(\gamma + \tau_i) |\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q|^{-1}$ 。对于不同的 i ,无法确定 μ_i 是否相等。

(3) 当 $0 < q_i < \Phi$,则 $\tau_i = \omega_i = 0$ 。由式(20)得:

$$(1 + \lambda_i q_i)^{-1} \lambda_i = \mu_i, \quad (23)$$

式中 $\mu_i = -\gamma |\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q|^{-1}$ 。显然,对于任意 i , μ_i 都相等(此后,统一记作 μ)。于是,此情况下的 $q_i = 1/\mu - 1/\lambda_i$ 。

综上所述, q_i 的最优取值只有 3 种可能:

$$\begin{cases} q_i = 0 \\ q_i = \Phi \\ q_i = 1/\mu - 1/\lambda_i \end{cases}. \quad (24)$$

为了确定 q_i 的确切取值,需要如下定理:

定理 2. 假设 $\mathbf{\Lambda}_q$ 是最优解:

1) 若 $\varphi < M\Phi$,则 $\sum_{i=1}^M q_i = \varphi$

2) 若 $k < j$,则 $q_k \geq q_j$

证明:下面将采用反证法证明该定理(类似的证明过程可参见文献[10])。

1) 假设 $\sum_{i=1}^M q_i < \varphi$ 。因为 $\varphi < M\Phi$,所以总存在某一系数 k 和某一正数 δ 使得: $q_k + \delta < \Phi$ 以及 $\delta + \sum_{i=1}^M q_i < \varphi$ 。因此,可构造出另一可行解 $\hat{\mathbf{\Lambda}}_q$, 其对角元素满足:

$$\begin{cases} [\hat{\mathbf{\Lambda}}_q]_{ii} = q_i, i \neq k \\ [\hat{\mathbf{\Lambda}}_q]_{kk} = q_k + \delta \end{cases}. \quad (25)$$

容易验证 $|\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \hat{\mathbf{\Lambda}}_q| > |\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q|$ 。这与 $\mathbf{\Lambda}_q$ 的最优性相矛盾。

2) 假设 $q_k < q_j$ 。可构造另一个可行解 $\hat{\mathbf{\Lambda}}_q$, 其对角元素满足:

$$\begin{cases} [\hat{\mathbf{\Lambda}}_q]_{ii} = q_i, i \neq k, j \\ [\hat{\mathbf{\Lambda}}_q]_{kk} = q_j \\ [\hat{\mathbf{\Lambda}}_q]_{jj} = q_k \end{cases}. \quad (26)$$

由于 $\mathbf{\Lambda}$ 按降序排列,容易验证 $|\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \hat{\mathbf{\Lambda}}_q| > |\mathbf{I} + \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}_q|$ 。这与 $\mathbf{\Lambda}_q$ 的最优性相矛盾。

综上所述,定理得证。

综合定理 2 和 q_i 的取值特性知:必定存在着两个正整数 n_1 和 n_2 (其中 $0 \leq n_1 < n_2 \leq M$) 将最优 $\mathbf{\Lambda}_q$ 的对角元素划分如下:

$$[\underbrace{\Phi, \dots, \Phi}_{n_1}, \underbrace{q_{n_1+1}, \dots, q_{n_2}}_{n_2 - n_1}, \underbrace{0, \dots, 0}_{n_1}], \quad (27)$$

式中 $q_{n_1+1}, \dots, q_{n_2}$ 可由式(23)确定。因此,为求得最优的 $\mathbf{\Lambda}_q$,可以采用一种遍历 n_1 和 n_2 的二维搜索算法。具体步骤如下:

- 1) 初始化: $q_i = 0, \forall i$;
 - 2) For $n_1 = 0, 1, \dots, M-1$
 - For $n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots, M$
 - a. 根据式(23)和 $\sum_{i=1}^M q_i = \varphi$ 计算 μ ;
 - b. 更新 q_i 的值, 步骤如下

$$\begin{cases} q_i = \Phi & i = 1, \dots, n_1 \\ q_i = 1/\mu - 1/\lambda_i & i = n_1 + 1, \dots, n_2; \\ q_i = 0 & i = n_2 + 1, \dots, M \end{cases}$$
 If $0 \leq q_i \leq \Phi$
 - 根据式(3)计算 C_{n_1, n_2} ;
 - End IF
 - End For
- 3) 寻找最大的 C_{n_1, n_2} , 并输出相应的 q_i 。

4 仿真实验与结果分析

为了验证文中提出算法的正确性和有效性, 设计了如下的两个仿真实验:

实验一, 将本文算法的能量分配方案与穷举法的能量分配方案进行对比, 同时, 给出文献[8]中次优解算法的结果做参照。

因已证明能量矩阵 \mathbf{Q} 的最优特征向量矩阵和矩阵 \mathbf{R}_H 的特征向量矩阵相同, 所以不失一般性, 在仿真实验过程中假设这两个矩阵都为对角矩阵。为了便于比较结果, 设存在一个特定的非奇异 MIMO 信道矩阵, 其中它的 $M = L = 3$, 矩阵 \mathbf{R}_H 的特征值分别为 $\lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 0.5$, 峰值能量受限于 $\Phi = 1.5$, 总能量受限于某一常数 $\varphi = [2, 4]$ 。

在最大化信道容量准则下, 不同算法随总能量约束 φ 变化而得到的能量分配情况 ($q_i, i = 1, 2, 3$) 如图 1 所示。图 2 给出了不同算法所得到的信道容量对比图。由图 1 和图 2 的结果可以看出: 对于任意的 φ , 本文算法和穷举法得到的系统性能相同。由于穷举法得到的解一定是最优解, 所以本文算法一定也取得了全局最优解。另外, 从图 2 还可以看出: 在相同信噪比条件下, 文中所提算法的系统性能优于文献[8]的算法, 这是因为文献[8]的算法采用了可行域的近似表示, 导致所得结果是次优的。

实验二, 通过实际信道模型下本文所提出算法与文献[8]中算法系统性能的比较, 验证文中算法的有效性。

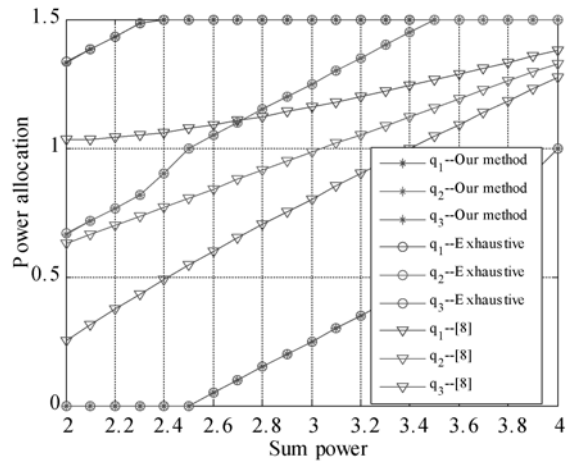


图 1 不同算法的能量分配对比图 ($M = L = 3, \lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 0.5, \Phi = 1.5, \varphi = [2, 4]$)
Fig. 1 Comparison of power allocation for different methods

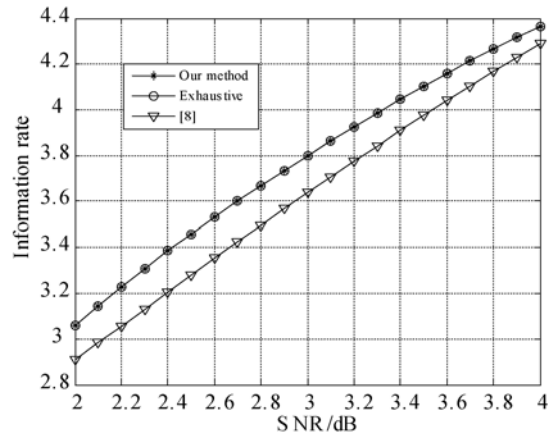


图 2 不同算法的信道容量对比图 ($M = L = 3, \lambda_1 = 2, \lambda_2 = 1, \lambda_3 = 0.5, \Phi = 1.5, \varphi = [2, 4]$)
Fig. 2 Comparison of information chain capacity for different methods

如果一个无时延扩展的 4×4 的 MIMO 信道, 它的噪声统计特性满足 $\mathbf{n} \sim \text{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I})$, 各个链路的信道增益是统计独立零均值复循环高斯过程, 它需要传输 $L = 4$ 路数据流, 发射总能量应满足 $\varphi = 3$, 峰值能量应满足 $\Phi = 1$ 。

基于最大化信道容量准则, 两种算法随信噪比的变化所取得的信息链容量对比情况如图 3 所示。所有仿真实验结果都是由 5 000 次随机信道所得信道容量的平均值确定的, 其中每一次随机信道 MIMO 系统均采用了最优预编码。从图 3 的结果可以看出, 本文所提出算法在任意信噪比

下都优于文献[8]中的算法,从而验证了所提算法的有效性。

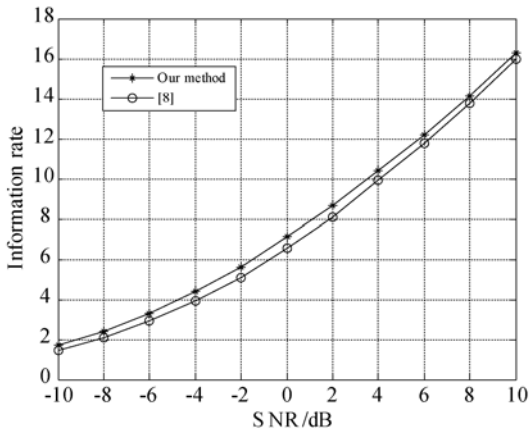


图 3 两种不同算法信道容量对比图,其中 $M = N = L = 4$, $\varphi = 3$, $\Phi = 1$, $\mathbf{n} \sim \text{CN}(0, \sigma^2 D)$
Fig. 3 Comparison of information chain capacity for ref. [8] method and proposed method

参考文献:

- [1] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels [J]. *European Transactions on Telecommunications*, 1999, 10(6):585-595.
- [2] ZHANG R, LIANG Y Y, POOR H V. On Gaussian MIMO BC-MAC Duality with Multiple Transmit covariance constraints [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(4): 2064-2078.
- [3] LIOLIS K, BERTINELLI M, PANAGOPOULOS A, et al. MIMO over satellite: a review [J]. *IEEE Communications surveys and Tutorials*, 2011, 13(1): 27-51.
- [4] SAMPATH H, STOICA P, PAULRAJ A. Generalized linear precoder and decoder design for MIMO channels using the weighted MMSE criterion [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, 49(12):2198-2206.
- [5] SCAGLIONE A, STOICA P, BARBAROSSA S, et al. Optimal designs for space-time linear precoders and decoders [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50(5):1051-1064.

作者简介:



刘金华(1972—),女,黑龙江佳木斯人,实验师,工程师,2009年于杭州电子科技大学获得硕士学位,主要从事无线通信和信号处理的研究。E-mail: liujinh@163.com

5 结 论

针对 l_p 范数能量约束算法的不足,本文提出了一种在联合总能量约束和峰值能量约束下适用于最大信道容量准则的最优线性 MIMO 系统预编码设计算法。将该算法与可行域近似的 l_p 范数能量约束算法进行比较,结果表明其能够取得最优的系统性能。通过定理 1 和定理 2 从数学上严格证明了能量特征向量矩阵的闭式解,并推导出了能量特征值的固有结构特性。根据这些结论提出一种二维整数搜索算法,用于确定能量特征值。由于各维所需搜索点的数目小于系统发射天线的根数 M ,因此其计算量较小,运算效率较高。仿真实验结果验证了所提算法的有效性。

- [6] Palomar D P, CIOFFI J M, LAGUNAS M A. Joint Tx-Rx beamforming design for multicarrier MIMO channels; A unified framework for convex optimization[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(9):2381-2401.
- [7] KAVIANI S, KRZYMIEN W A. Robust joint precoder and equalizer design in MIMO communication systems [C]. *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference 2012*. 1-4 April 2012, Shanghai, China, USA, Piscataway, 277-282.
- [8] FEITEN A, MATHAR F R, HANLY S. Eigenvalue-based optimum-power allocation for Gaussian vector channels[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(6):2304-2309.
- [9] DAI J, YE Z. Optimal designs for linear MIMO transceivers using directional derivative [J]. *IET Communications*, 2009, 3(9):1452-1462.
- [10] DAI J S, ZHAO D A. Linear MIMO transceivers design with weighted MMSE criterion [J]. *Chinese Journal of Electrics*, 2011, 20(1): 58-62.