

和速率约束下衰落高斯 MIMO 广播信道的和功率优化

李光平, 冼峻, 张广驰, 秦家银

(1. 中山大学信息科学与技术学院, 广东广州 510275; 2. 中山大学数字家庭教育部重点实验室, 广东广州 510275)

摘 要: 本文研究了在系统和速率一定的条件下有着高斯噪声的衰落 MIMO 广播信道和功率最小化问题. 该问题通常存在于无线通信系统动态资源分配中, 是和功率约束下衰落 MIMO 下行链路和速率最大化的互补问题. 首先利用 MIMO MAC 和 MIMO BC 的对偶性, 将问题描述和转化为凸最优化问题, 在此基础上, 利用子梯度法和二分法, 设计了相应的快速迭代的 multi-user water-filling 算法, 用于计算基站的发射功率. 理论分析和数值仿真结果表明, 该算法全局有效地收敛于最小的和功率.

关键词: MIMO 广播信道; 和功率; 动态资源分配; 子梯度; 二分法

中图分类号: TN911.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)01-0160-05

Sum Power Optimization in Fading Gaussian MIMO Broadcast Channels under the Constraint of Sum Rate

LI Guang-ping, XIAN Jun, ZHANG Guang-chi, QIN Jia-yin

(1. Department of Electronics and Communication Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China;

2. Key Laboratory of Digital Life of Ministry of Education, Sun Yat-sen University, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: In this paper, we consider the problem of minimizing sum power under the constraint of a sum rate in fading Gaussian multiple input multiple output (MIMO) broadcast channel (BC) with additive Gaussian noise. This problem arises frequently in dynamic resource allocation of wireless communication systems. It is the complementary problem to sum rate maximization with a sum power constraint for fading MIMO downlink. We first formulate the equivalent convex optimization problem using the duality between the MIMO multi-access channel (MAC) and the MIMO BC. Then we derive a simple and fast iterative water-filling algorithms based on the subgradient and bisection methods that compute sum power of the transmitter. Theory analysis and numerical simulations show that the proposed algorithm converges to the minimum sum power globally and efficiently.

Key words: multiple input multiple output (MIMO) broadcast channel (BC); sum power; dynamic resource allocation; subgradient; bisection

1 引言

在宽带无线通信系统如 IEEE 802.16e/m (WiMAX) 和 3GPP LTE 中, 功率分配和功率效率优化是一项重要的研究课题. 尽可能有效地利用功率的研究可以大致归纳为两类: (1) 对于给定的功率约束, 最大化系统的和速率 (sum rate); (2) 对于给定的速率约束, 最小化发射功率.

对于单发射天线和单接收天线 (SISO) 的情形, 文献 [1~4] 已经很好解决了功率分配和功率效率优化的问题. 多输入多输出 (MIMO) 天线技术的引入, 大大地增加了系统的性能^[5], 但同时也使功率分配和功率效率优化更加复杂. 首先, W. Yu 等人提出了在满足每个用户功

率约束条件下, 高斯 MIMO MAC 和速率最大化的 multi-user 迭代注水算法^[6]. Jindal 利用 MIMO MAC 和 MIMO BC 的对偶关系^[7~9], 研究了和功率约束条件下, MIMO BC 的和速率最大化问题^[10], 该算法随着用户数的增加, 收敛速度变慢. 随后, 文献 [11] 用对偶分解的方法研究了同样的问题, 该文提出的算法既不需要记忆, 也不依赖于用户数. 以上的研究都是针对功率效率优化的第一类问题, 近年来研究者将研究的重点转向第二类问题, 首先文献 [12] 提出了在 MIMO BC 中, 当保证每个用户速率的情况下, 和功率最小化的算法; 接着文献 [13] 提出了基于子梯度和椭圆形方法的凸最优化算法, 从而优化了衰落 MIMO MAC 和 MIMO BC 的传输; 而文献 [14] 研究了当发送端只知道信道分布信息 (CDI) 时, 如何描述

收稿日期: 2007-08-06; 修回日期: 2008-11-03

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60672048); 广州市科技计划 (No. 2008Z1-D151); 国家自然科学基金和广东省联合基金 (No. U0635003); 广东省自然科学基金 (No. 7301261)

衰落 MIMO MAC 的多用户功率区域的问题. 以上文献 [12~14] 均假定了各个用户的速率被满足. 最近, 文献 [15] 研究了在 MIMO BC 系统中和速率(即系统的吞吐量)一定的情况下, 发射功率的最小化问题. 该算法假定了一个短期的功率约束, 只是文献 [10] 中提出算法的略微改进. 且该算法只适用于单个块的块衰落信道 (single block fading channel) 的情形.

本文在文献 [15] 的基础上, 研究了在平均和速率的约束下, 衰落高斯 MIMO BC 的长期和功率的最小化问题. 功率能在时间上(不同的衰落状态)和空间上(不同的天线)进行分配. 也就是说联合了功率分配和功率效率优化. 因此长期功率约束条件下的功率分配比短期功率约束条件下提供了更多的增益^[16]. 首先, 本文根据 MIMO MAC 和 MIMO BC 的对偶理论把非凸的下行链路问题转化为一个凸的上行链路问题. 然后根据该凸问题的特殊结构, 提出了基于子梯度^[17]和一维搜索方法^[18]的多用户迭代注水算法, 来计算基站的最小和功率. 同时该算法也能确定在每一个衰落状态下发射给每个用户的发射协方差矩阵.

2 系统的模型

考虑一个基站有 r 根发射天线, K 个移动台分别有 t 根接收天线的高斯白噪声的衰落离散 MIMO BC (这种模式也容易推广到每个用户有不同根接收天线的情形), 其中基站同时向各个移动台发射独立的信息. 同时假定信道服从块衰落模型, 即信道在每一个块的传输期间保持不变. 信道衰落的状态是离散有限的, 且衰落过程是联合平稳和各态历经的. 因此, 在某一状态 n , 衰落的 MIMO BC 能表示为:

$$\begin{bmatrix} y_1(n) \\ \vdots \\ y_K(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1(n) \\ \vdots \\ H_K(n) \end{bmatrix} \mathbf{x}(n) + \begin{bmatrix} z_1(n) \\ \vdots \\ z_K(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

在上式中, $\mathbf{x}(n) \in \mathcal{E}^{r \times 1}$ 表示基站发射的信号向量, $\mathbf{y}_k(n) \in \mathcal{E}^{t \times 1}$ 表示第 k 个用户接收到的信号向量, $\mathbf{H}_k(n) \in \mathcal{E}^{t \times r}$ 表示基站与第 k 个用户之间的复信道矩阵, $\mathbf{z}_k(n) \in \mathcal{E}^{t \times 1}$ 表示第 k 个用户接收端的复高斯噪声向量, 其中 $\mathbf{z}_k(n) \sim CN(0, I)$. 接着考虑其对偶的 MIMO MAC 如下:

$$\bar{\mathbf{y}}(n) = [H_1^H(n) \quad \cdots \quad H_K^H(n)] \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}}(n) \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{x}}_K(n) \end{bmatrix} + \bar{\mathbf{z}}(n) \quad (2)$$

在式(2)中, $\bar{\mathbf{y}}(n) \in \mathcal{E}^{r \times 1}$ 表示基站接收到的信号向量, $\tilde{\mathbf{x}}_k(n) \in \mathcal{E}^{r \times 1}$ 表示用户 k 发射的信号向量, $\mathbf{H}_k^H(n) \in \mathcal{E}^{r \times t}$ 表示第 k 用户与基站之间的复信道矩阵, $\bar{\mathbf{z}}(n) \in \mathcal{E}^{r \times 1}$ 表

示基站接收端的复高斯噪声向量, 其中 $\bar{\mathbf{z}}(n) \sim CN(0, I)$, $n = 1, 2, \dots, N$ 表示不同的信道衰落状态.

假定了发射端和接收端知道完全的信道状态信息 (Perfect CSI), 因此发送端采用了脏纸编码 (Dirty Paper Coding). 通常假定了脏纸编码的顺序是 $\pi(K), \pi(K-1), \dots, \pi(1)$, 其中 π 是一种排列顺序, 这样用户 $\pi(k)$ 在衰落状态 n 可取得的速率 (achievable rate) 如下:

$$R_{\pi(k)}^{BC}(n) = \log \left| I + H_{\pi(k)}(n) \sum_{m=1}^k Q_{\pi(m)}(n) H_{\pi(m)}^H(n) \right| - \log \left| I + H_{\pi(k)}(n) \sum_{m=1}^{k-1} Q_{\pi(m)}(n) H_{\pi(m)}^H(n) \right| \quad (3)$$

其中 $Q_{\pi(k)}(n) = E[x_{\pi(k)}(n)x_{\pi(k)}^H(n)]$ 表示基站在衰落状态 n 发射给用户 $\pi(k)$ 的发射协方差矩阵, 期望通过码本来取得. 因此 MIMO BC 的和容量能够用下式来表示:

$$C_{BC}^{sum\ capacity} = \log \left| I + H_{\pi(1)}(n) Q_{\pi(1)}(n) H_{\pi(1)}^H(n) \right| + \log \frac{\left| I + H_{\pi(2)}(n) (Q_{\pi(1)}(n) + Q_{\pi(2)}(n)) H_{\pi(2)}^H(n) \right|}{\left| I + H_{\pi(2)}(n) Q_{\pi(1)}(n) H_{\pi(2)}^H(n) \right|} + \cdots + \log \frac{\left| I + H_{\pi(K)}(n) (Q_{\pi(1)}(n) + \cdots + Q_{\pi(K)}(n)) H_{\pi(K)}^H(n) \right|}{\left| I + H_{\pi(K)}(n) (Q_{\pi(1)}(n) + \cdots + Q_{\pi(K-1)}(n)) H_{\pi(K)}^H(n) \right|} \quad (4)$$

根据 MIMO BC 和 MIMO MAC 的对偶性^[7-9], MIMO BC 的和容量等于对偶的 MIMO MAC 的和容量, 因此上式(4)能表示成如下:

$$C_{BC}^{sum\ capacity} = C_{MAC}^{sum\ capacity} = \log \left| I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n) S_k(n) H_k(n) \right| \quad (5)$$

其中 $S_k(n) = E[\tilde{\mathbf{x}}_k(n)\tilde{\mathbf{x}}_k^H(n)]$ 表示 MIMO MAC 中用户 k 在衰落状态 n 的发射协方差矩阵.

3 问题的公式化

本文研究了衰落高斯 MIMO BC 中平均和速率约束下的长期和功率的最优化(空间和时间联合功率优化). 研究的问题公式化如下:

$$\begin{aligned} \min E \{ & \sum_{k=1}^K \text{Tr}(Q_k(n)) \} \\ \text{s. t. } E \{ & \log \left| I + H_{\pi(1)}(n) Q_{\pi(1)}(n) H_{\pi(1)}^H(n) \right| \\ & + \log \frac{\left| I + H_{\pi(2)}(n) (Q_{\pi(1)}(n) + Q_{\pi(2)}(n)) H_{\pi(2)}^H(n) \right|}{\left| I + H_{\pi(2)}(n) Q_{\pi(1)}(n) H_{\pi(2)}^H(n) \right|} \\ & + \cdots + \log \frac{\left| I + H_{\pi(K)}(n) (Q_{\pi(1)}(n) + \cdots + Q_{\pi(K)}(n)) H_{\pi(K)}^H(n) \right|}{\left| I + H_{\pi(K)}(n) (Q_{\pi(1)}(n) + \cdots + Q_{\pi(K-1)}(n)) H_{\pi(K)}^H(n) \right|} \} \\ & \geq R^* \end{aligned} \quad (6)$$

其中期望是通过信道衰落的分布来计算的. 很显然, 约

束函数是一个关于 $Q_{\pi(1)}(n), Q_{\pi(2)}(n), \dots, Q_{\pi(K)}(n)$ 的非凸的函数. 然而, 通过联合(4~6)能把非凸的下行链路问题转化为上行链路问题.

$$\begin{cases} \text{minimize } E\left\{\sum_{k=1}^K \text{Tr}(S_k(n))\right\} \\ \text{s.t. } E\left\{\log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right|\right\} \geq R^* \\ S_k(n) \geq 0, \forall k, n \end{cases} \quad (7)$$

这里, 假定 n 是一个随机变量, 在衰落状态 $n=1, 2, \dots, N$ 中取值. 由于信道是平稳的, 因此每个状态有相同的概率分布 $f(n)$ ^[13]. 这样能够去掉期望, 用 $f(n)$ 来代替.

$$\begin{cases} \min \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \text{Tr}(S_k(n))f(n) \\ \text{s.t. } \sum_{n=1}^N \log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right|f(n) \geq R^* \\ S_k(n) \geq 0, \forall k, n \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知, 目标函数是线性的, 约束函数在半正定矩阵空间中是凹的. 因此式(8)是一个凸最优化问题. 通常, 凸优化问题能够用内点方法来求解^[18]. 但本文利用了凸优化问题(8)的特殊结构设计了简单高效的多用户迭代注水算法.

为了计算的简单, 假定了所有的 n 均匀的分布^[13], 即 $f(n) = 1/N$. 于是优化的问题最后可简化为:

$$\begin{cases} \min \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \text{Tr}(S_k(n)) \\ \text{s.t. } \sum_{n=1}^N \frac{1}{N} \log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right| \geq R^* \\ S_k(n) \geq 0, \forall k, n \end{cases} \quad (9)$$

4 多用户迭代注水算法

最优化问题(9)的拉格朗日算子如下:

$$\begin{aligned} L(\{S_k(n)\}, \mu) &= \frac{1}{N} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \text{Tr}(S_k(n)) \\ &- \mu \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right| - R^* \right) \end{aligned} \quad (10)$$

其中 μ 是对偶变量(拉格朗日乘子).

于是可以得到式(9)的拉格朗日对偶函数

$$g(\mu) = \min_{S_k(n) \geq 0} L(\{S_k(n)\}, \mu) \quad (11)$$

对于凸函数, 如果 Slater's 条件成立, 这样对偶间隙为零^[18]. 用足够大的功率, 能使 $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right|$ 足够大以至于指定的速率 R^* 是它的内点. 因此对于最优化问题(9), Slater's 条件成立. 原始问题(9)能通过求解下面的拉格

朗日对偶问题而得:

$$\begin{cases} \max g(\mu) \\ \text{s.t. } \mu > 0 \end{cases} \quad (12)$$

在上式中, 因为拉格朗日对偶函数 $g(\mu)$ 是凹的, μ 是一个单变量, 因此可以利用标准的一维线性搜索方法. 然而从 $g(\mu)$ 的结构中可以观察到要想获得它的梯度是很难的. 这里, 利用了子梯度^[18]的方法, 来代替梯度的方法.

为了获得 $g(\mu)$ 的子梯度, 首先得求解最优化问题(11). 拉格朗日算子(10)通过简单的变化后可以表示成以下表达式.

$$\begin{aligned} L(\{S_k(n)\}, \mu) &= \mu R^* + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\sum_{k=1}^K \text{Tr}(S_k(n)) \right. \\ &\left. - \mu \log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right| \right) \end{aligned} \quad (13)$$

利用对偶分解算法(dual-decomposition method)^[18], 表达式(11)的最小化可以分解为 N 个独立的子问题的最小化.

$$\begin{aligned} \bar{g}_n(\mu) &= \min_{S_k(n)} \sum_{k=1}^K \text{Tr}(S_k(n)) \\ &- \mu \log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right| \end{aligned} \quad (14)$$

因此, 拉格朗日对偶函数 $g(\mu)$ 能表示成如下:

$$g(\mu) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{g}_n(\mu) + \mu R^* \quad (15)$$

而表达式(14)中的每一个最优化问题经过简单的变化后能写成:

$$\begin{aligned} \bar{g}_n(\mu) &= \max_{S_k(n)} \log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right| \\ &- \frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^K \text{Tr}(S_k(n)) \end{aligned} \quad (16)$$

很显然, 式(16)属于凸优化问题. 在本文中, 利用了简单的迭代注水算法来计算式(16)中的 $S_k(n)$. 跟式(16)有关的拉格朗日算法如下:

$$\begin{aligned} \bar{L}(S_k(n), \varphi_k) &= \log\left|I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n)\right| \\ &- \frac{1}{\mu} \sum_{k=1}^K \text{Tr}(S_k(n)) + \text{Tr}(\varphi_k S_k(n)) \end{aligned} \quad (17)$$

其中 φ_k 是跟正定约束有关的矩阵对偶变量. Karush-Kuhn-Tucker(KKT)条件能够通过微分 $\partial \bar{L} / \partial S_k(n) = 0$ 而得:

$$H_k(n) \left(I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n)S_k(n)H_k(n) \right)^{-1} H_k^H(n) = \frac{1}{\mu} I - \varphi_k \quad (18)$$

上式是高斯向量信道注水的条件^[6]. 在式(16)给出的问题中, μ 是固定的, 因此注水水平是固定的. 注水

的过程能够用下面的算法 1 来描述:

算法 1: 固定注水水平的多用户迭代注水算法

给定固定注水水平

While 算法不收敛 do

For $k=1$ to K do

固定 $|S_k|_{i=1, \dots, i, \mu, k}$, 对 $|S_k|$ 实行多用户注水

end for

end while

上表提出了一种多用户迭代注水算法来求解当具有固定水平时的凸优化问题(5). 但要求解问题(12), 仍需要找到 $g(\mu)$ 的子梯度. 因此代入式(14)到式(15)得到:

$$g(\mu) = \min_{S_k(n) \geq 0} \mu R^* + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\sum_{k=1}^K \text{Tr}(S_k(n)) - \mu \log \left| I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n) S_k(n) H_k(n) \right| \right) \quad (19)$$

令 $S_k^*(n), k=1, \dots, K, n=1, \dots, N$ 是表达式(19)的最优解. 因此, 对于 $\delta \geq 0$, 能获得如下的表达式:

$$g(\mu) = \mu R^* + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\sum_{k=1}^K \text{Tr}(S_k^*(n)) - \log \left| I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n) S_k^*(n) H_k(n) \right| \right) \geq g(\delta) + (\mu - \delta)(R^* - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log \left| I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n) S_k^*(n) H_k(n) \right|) \quad (20)$$

从上式可以得知:

$$h = (R^* - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log \left| I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n) S_k^*(n) H_k(n) \right|)$$

是 $g(\mu)$ 的子梯度. 根据二分法线性搜索方法, 如果:

$$R^* > \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \log \left| I + \sum_{k=1}^K H_k^H(n) S_k^*(n) H_k(n) \right|$$

这样增加注水水平 μ , 否则减少注水水平 μ 直到满足二分法的停止标准.

于是提出的算法可以描述如下:

算法 2:

(1) 初始化 μ_{\min}, μ_{\max} ;

(2) 设置 $\mu = (\mu_{\min} + \mu_{\max})/2$;

(3) 用注水水平 μ 代入算法 1 求解最优化问题(13)

(4) 计算子梯度 h . 如果 $h > 0$, $\mu_{\min} = \mu$, 否则 $\mu_{\max} = \mu$;

(5) 如果 $|\mu_{\max} - \mu_{\min}|$ 小于给定的偏差, 算法停止, 否则, 转到步骤(2)

5 算法复杂度分析和计算机仿真

由于本文提出的算法利用了凸优化问题的特殊结

构, 使用了迭代注水的算法, 因此算法的复杂度跟用户数成线性关系 $O(K)$, 而标准的内点凸优化算法由于使用了牛顿方法, 因此算法的复杂度是用户数的立方 $O(K^3)$. 又因为本文算法利用了二分法, 所以当选用任意的可行初始点, 算法全局收敛.

在接下来的计算机仿真中, 假定了总的频谱效率 $R^* = 40 \text{ nats/s/Hz}$. 其中基站和每个用户各装有 4 根天线. 同时假定了块衰落的信道模型. 即每个衰落状态的信道元素, 由零均值单位方差独立循环对称的复高斯随机变量产生. 在仿真中采取衰落状态数 $N = 50$ 是足够的^[16].

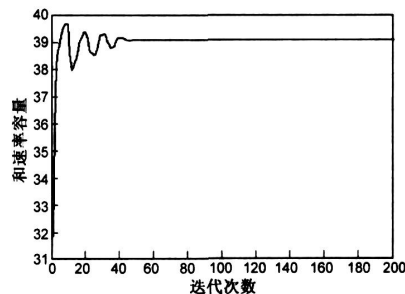


图1 当 μ 一定时, 算法1的收敛特性

图1论证了当注水水平固定, 用户数 $K=10$ 时算法1的收敛特性. 从图中可以观察到有着固定水平的多用户迭代注水算法收敛, 且收敛速度比较快.

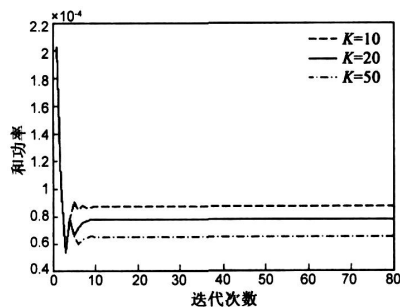


图2 当用户数 $K=10, 20, 50$ 时, 算法2的收敛性能

图2论证了在衰落高斯 MIMO BC 中当用户数分别为 10、20、50 时算法 2 的收敛特性. 从仿真图中可以得知在第 10 次迭代时算法就基本上已经收敛. 从而可知我们的算法提供了比较快的收敛速度. 同时本文也变化了不同的用户数, 但算法的收敛速度是不受用户数的影响, 因此是独立于用户数的.

6 结论

本文提出了一种迭代注水算法用来求解有着系统吞吐量约束的衰落高斯 MIMO BC 中的长期和功率的最小化问题. 首先利用 MIMO MAC 和 MIMO BC 的对偶理论把非凸的下行链路问题转化为凸的上行链路问题.

然后再利用原始问题和拉格朗日对偶问题的等效性,提出了基于子梯度和一维线性搜索的方法多用户注水算法求解了拉格朗日对偶问题,从而也求解了原问题.理论分析和数值仿真表明了提出的算法提供了较低的复杂度和快速的收敛速度.而且,本文的算法不受用户数的影响,也就是说独立于用户数的.

参考文献:

- [1] Tse D N C, Hanly S V. Multi-access fading channels-Part I: polymatroid structure, optimal resource allocation and throughput capacities[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1998, 44(7): 2796 - 2815.
- [2] Hanly S V, Tse D N C. Multi-access fading channels-Part II: delay-limited capacities[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 1998, 44(7): 2816 - 2831.
- [3] Li L, Goldsmith A. Capacity and optimal resource allocation for fading broadcast channels-Part I: ergodic capacity[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2001, 47(3): 1083 - 1102.
- [4] Li L, Goldsmith A. Capacity and optimal resource allocation for fading broadcast channels-Part II: outage capacity[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2001, 47(3): 1103 - 1127.
- [5] Telatar E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. Europ. Trans. Telecomm., 1999, 10(6): 585 - 596.
- [6] Yu W, Rhee W, Boyd S, Cioffi J M. Iterative waterfilling for Gaussian vector multiple access channels[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2004, 50(1): 142 - 151.
- [7] Jindal N, Vishwanath S, Goldsmith A. On the duality of Gaussian multiple-access and broadcast channels[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2004, 50(5): 768 - 783.
- [8] Vishwanath S, Jindal N, Goldsmith A. Duality, achievable rates, and sum-rate capacity of MIMO broadcast channels[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2003, 49(10): 2658 - 2668.
- [9] Viswanath P, Tse D N. Sum capacity of the vector Gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2003, 49(8): 1912 - 1921.
- [10] Jindal N, Rhee W, Vishwanath S, Jafar S, Goldsmith A. sum power iterative water-filling for multi-antenna Gaussian broadcast channels[J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2005, 51(4): 1570 - 1580.
- [11] Yu W. sum-capacity computation for the vector broadcast via dual decomposition [J]. IEEE Trans. Inf. Theory, 2006, 52(2): 754 - 759.
- [12] Oh J, Kim S J, Narasimhan R, Cioffi J M. Transmit power optimization for Gaussian vector broadcast channels[A]. Proc. IEEE Conf. Commun. [C]. Seoul: IEEE press, 2005. 2712 - 2716.
- [13] Mohseni M, Zhang R, Cioffi J M. Optimized transmission for fading multiple-access and broadcast channels with multiple antennas[J]. IEEE J. Sel. Areas Commun., 2006, 24(8): 1627 - 1639.
- [14] Zhang R, Mohseni M, J Cioffi. Power region for fading multiple-access channel with multiple antennas[A]. Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory[C]. Seattle: IEEE press, 2006. 2709 - 2713.
- [15] Michel T, Wunder G. Sum Rate Iterative water-filling for Gaussian MIMO broadcast channels[A]. Proc. 9th Intern. Symposium on WPMC [C]. San Diego: IEEE press, 2006. 2007 - 2011.
- [16] Caire G, Taricco G, Biglieri E. Optimum power control over fading channels[J]. IEEE trans. Inf. theory, 1999, 24(5): 1468 - 1489.
- [17] Boyd S, Vandenberghe. Convex Optimization [M]. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [18] Bertsekas D. Nonlinear Programming [M]. Belmont, Mass: Athena Scientific, 1999.

作者简介:



李光平 男,1981年出生于湖南桂阳,中山大学与加拿大女王大学联合培养博士生,主要研究方向为多用户 MIMO 系统的传输最优化和 relay 系统的性能分析.
E-mail: gilbert_gpli@gmail.com



洗峻 女,1972年出生于哈尔滨,中山大学博士生,主要研究方向为下一代无线通信的关键技术.