

MISO 网络下的鲁棒性多目标波束成形设计

吴 苏,代延梅,王保云

(南京邮电大学 通信与信息工程学院,江苏 南京 210003)

摘 要:传统的物理层安全通信只研究信息的安全传输或者系统的能量消耗,而这两者相互冲突且越来越难以满足人们对无线通信系统的高要求,因此寻求有效均衡两者的方法成为无线通信系统设计的关键。在多输入单输出(MISO)的下行网络中,联合优化接收端的安全速率和发送端的功率消耗,提出了一种基于加权切比雪夫方法的多目标优化框架(MOO),将两个冲突的单目标问题转化为一个多目标优化问题(MOOP)。引入泰勒级数展开,将非凸问题线性化;运用S-Procedure和柯西施瓦兹不等式,处理半无限约束。在发送端对信道状态信息(CSI)不完全已知的情况下,所提出的鲁棒性迭代算法,获得了安全速率和功率消耗的帕累托最优边界。实验结果表明,所提出的算法优于传统的非鲁棒性算法。

关键词:安全通信;波束成形设计;多目标最优问题;鲁棒性;多输入单输出网络

中图分类号:TP301

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)05-0183-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.05.038

Design of Robust Multi-objective Beamforming in MISO Networks

WU Su, DAI Yan-mei, WANG Bao-yun

(College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of
Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Either the security transmission of information or the energy consumption of systems is investigated in traditional physical security communication. It is of great significance to seek effective ways to balance them because of their conflicting performances and the fact that it is more and more difficult to meet people's high requirements of the wireless communication system. The optimization of the transmit power and the secrecy rate jointly is considered in a Multiple-Input-Single-Output (MISO) downlink network. A Multi-Objective Optimization (MOO) framework based on the weighted Tchebycheff approach is proposed to transform the two conflicting single-objective problems into a multi-objective problem. Taylor series expansion is then employed to recast the formulated Multi-Objective Optimization Problem (MOOP) as a linear one. S-Procedure and Cauchy-Schwarz inequality are applied to deal with the semi-infinite constraints. Finally, a robust iterative algorithm is proposed to achieve the Pareto optimal boundary under the assumption that the Channel State Information (CSI) is not perfectly known at the transmitter. Simulation results that the proposed algorithm not only demonstrates the convergence, but also indicates the effectiveness of it compared with traditional non-robust one.

Key words: secure communication; beamforming design; MOOP; robust; MISO Networks

0 引言

随着多媒体需求的不断增长,无线通信技术迎来了新的发展机遇与挑战。多耦合目标设计^[1]无线通信网络从而满足人们对网络服务质量的高要求已经成为一种新的方式。因此,研究多目标问题以及多目标均衡设计最近也受到了广泛关注。一方面,无线通信系统信息的安全传输^[2-4],即系统接收端安全速率,是判断通信系统性能的一项重要指标。其中,加入空间选

择性的人工噪声^[3]抑制系统被窃听的方法,可以增大系统接收端的安全速率。另一方面,尽管许多可再生资源(太阳能、风能等)被广泛用作无线通信系统中的新能源,然而如何有效减少通信系统发送端的能量消耗,同时满足高速无线数据传输需求,仍然是一项值得研究的课题。文献[5]提出了功率分离法最小化系统发送端功率消耗。文献[6]提出了二阶锥规划松弛,联合波束成形设计和功率分离的方法最小化发送端能

收稿日期:2016-05-29

修回日期:2016-09-08

网络出版时间:2017-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271232);国家移动通信研究实验室开放研究基金(2012D05)

作者简介:吴 苏(1992-),女,硕士研究生,研究方向为物理层安全、多目标资源优化等;王保云,教授,博士生导师,研究方向为无线通信中的博弈与协作、无线通信中的信号处理技术等。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170307.0921.052.html>

量消耗。

然而,上述文献只是从单一的目标或者只是从网络设计的一个方面对无线通信系统进行设计。考虑到实际生活中存在多个需要研究的目标,且它们之间存在潜在的冲突,因此,寻找有效的设计方法来均衡各个性能指标间的冲突以达到系统整体性能最优,显得尤为迫切和重要。

针对 MISO 下行网络中多个性能指标的联合优化,基于多目标优化的理论与方法^[7-8]是解决上述问题的有效工具。在配置多根天线的发送端对信道状态信息不完全已知^[9]的情况下,对系统接收端安全速率和发送端功率消耗联合优化,得到两者的帕累托最优资源分配策略。通过泰勒级数展开,将建立的非凸多目标问题线性化;通过 S-Procedure 和柯西施瓦兹不等式,处理信道估计误差产生的非凸问题。提出了一种鲁棒性迭代算法,获得两个目标的帕累托最优边界。

1 系统模型与优化问题描述

1.1 系统模型

MISO 下行通信系统如图 1 所示。

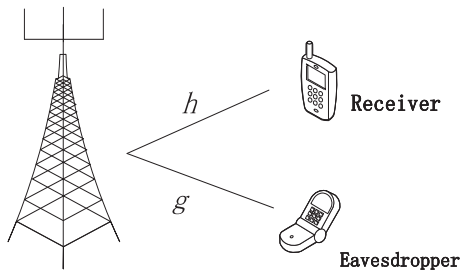


图 1 MISO 下行通信系统模型

该系统由一个发送端、一个接收端和一个窃听端^[10]组成。其中,发送端配置 N_t 根天线, $N_t > 1$, 接收端和窃听端都配置 1 根天线。在该系统中,假定所有信道均经历瑞利平坦衰落,且信道反馈有限,信道的状态信息不完全已知。 $s(t)$ 表示在 t 时刻的发送端传输符号向量,则接收端和窃听端的接收信号分别表示为:

$$\begin{aligned} y(t) &= \mathbf{h}^H \mathbf{w} s(t) + \mathbf{h}^H \mathbf{v} + \mathbf{n}(t) \\ \tilde{y}(t) &= \mathbf{g}^H \mathbf{w} s(t) + \mathbf{g}^H \mathbf{v} + \tilde{\mathbf{n}}(t) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示从发送端到接收端的信道矢量; $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示从发送端到窃听端的信道矢量; $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示对发送信号进行处理的波束成形矢量; $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 表示发送端用来抑制潜在窃听所产生的人工噪声。特别地, \mathbf{v} 是一个随机产生的,均值为 0,协方差矩阵为 $\mathbf{V} \in \mathbb{C}^{N_t \times N_t}$, $\mathbf{V} \succeq 0$ 的复高斯矢量, $\mathbf{n}(t) \sim N(0, \sigma^2)$ 和 $\tilde{\mathbf{n}}(t) \sim N(0, \tilde{\sigma}^2)$ 分别表示独立同分布的复高斯噪声。

根据式(1),接收端的互信息和窃听端的互信息

分别表示为:

$$\begin{aligned} C &= \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2} \right) \\ \tilde{C} &= \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{g}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \tilde{\sigma}^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{H} = \mathbf{h}\mathbf{h}^H$, $\mathbf{G} = \mathbf{g}\mathbf{g}^H$ 。

因此,接收端的可达安全速率^[3]可以表示为:

$$R_s = C - \tilde{C} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{g}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \tilde{\sigma}^2} \right) \quad (3)$$

如上文所述,发送端对信道的状态信息不完全已知,所以假设发送端到窃听端的信道矢量为: $\mathbf{g} = \hat{\mathbf{g}} + \Delta\mathbf{g}$ 。其中, $\hat{\mathbf{g}}$ 是对信道 \mathbf{g} 的估计, $\Delta\mathbf{g}$ 是对信道 \mathbf{g} 的估计误差。在该系统中,假设 $\Delta\mathbf{g}$ 是有界的,且满足^[3]:

$$\Omega = \{ \mathbf{g} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1} \mid \mathbf{g} = \hat{\mathbf{g}} + \Delta\mathbf{g}, \|\Delta\mathbf{g}\|_F \leq \varepsilon \} \quad (4)$$

其中, $\varepsilon > 0$ 。

1.2 优化问题描述

在研究多目标优化问题之前,首先要对 MISO 系统中两个相互冲突但有研究价值的单目标问题单独进行研究。然后,对这两个具有耦合性能的单目标问题^[11-12]建立一个多目标最优框架。为了满足用户对接收端安全速率的需求以及对发送端功率消耗的限制,文中对两者进行联合优化。因此,首先研究的单目标问题是系统接收端安全速率最大化问题^[10,13]:

问题 1(安全速率最大化):

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}, \mathbf{V}} \min_{\Delta\mathbf{g} \in \Omega} & \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{g}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \tilde{\sigma}^2} \right) \\ \text{s. t. } C_1: & \|\mathbf{w}\|^2 + \text{Tr}(\mathbf{V}) \leq P_{\max} \\ C_2: & \min_{\Delta\mathbf{g} \in \Omega} \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2} \right) - \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{g}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \tilde{\sigma}^2} \right) \geq R_{\text{req}} \\ C_3: & \mathbf{V} \succeq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

其中, P_{\max} 表示发送端的最大传输功率; R_{req} 表示系统接收端需要达到的最低安全速率。

其次,文中研究的另一个单目标问题是系统发送端功率消耗最小化问题。因此,问题 2(传输功率最小化)可以表示为:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, \mathbf{V}} & \|\mathbf{w}\|^2 + \text{Tr}(\mathbf{V}) \\ \text{s. t. } & C_1 - C_3 \end{aligned} \quad (6)$$

由能量守恒定理可知,为了在系统接收端获得更大的安全速率,必然需要在发送端消耗更多的功率。

因此,功率消耗最小化和安全速率最大化是相互冲突的目标,其中一个目标的提高必然导致另一个目标的下降。帕累托最优资源分配策略可以平衡两个耦合的目标,文中建立一个多目标最优框架^[1,7-8],对冲突问题均衡设计,运用加权切比雪夫方法^[8]处理上述建立的多目标问题,即问题3:

问题3(切比雪夫方法处理后的多目标):

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, \mathbf{V}} \max_{n=1,2} \{ \lambda_n (F_n(\mathbf{w}) - F_n^*) \} \\ \text{s. t. } \bar{C}_1 - C_3 \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $F_1(\mathbf{w}) = \max_{\Delta \mathbf{g} \in \Omega} -\log_2(1 + \frac{|\mathbf{h}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2}) - \log_2(1 + \frac{|\mathbf{g}^H \mathbf{w}|^2}{\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \sigma^2})$ 表示式(5)中的目标函数;

$F_2(\mathbf{w}) = \|\mathbf{w}\|^2 + \text{Tr}(\mathbf{V})$ 表示式(6)中的目标函数;常量 F_n^* 表示问题 n 中的最值; $\lambda_n \geq 0$ 反映对目标函数偏好的权值变量,并且满足约束 $\sum_n \lambda_n = 1$ 。

基于上述处理,如何将非凸的多目标问题凸优化,以及处理由信道估计误差而导致的半无限约束是下文的关键。

2 多目标问题最优化处理

为了处理多目标问题中的目标函数和约束2的非凸性^[14-15],做如下定义:

$$\begin{aligned} e^x &\triangleq \text{Tr}(\mathbf{W}\mathbf{H}) + \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2, e^y \triangleq \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2 \\ e^p &\triangleq \text{Tr}(\mathbf{W}\mathbf{G}) + \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \sigma^2, e^q \triangleq \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \sigma^2 \end{aligned} \quad (8)$$

其中, x, y, p, q 表示引入的四个松弛变量;矩阵 $\mathbf{W} = \mathbf{w}\mathbf{w}^H$ 表示引入的一个新的变量。

将式(8)代入问题1,可以得到问题1的变形:

$$\begin{aligned} \min_{\substack{\mathbf{w}, \mathbf{V} \\ x, y, p, q \in \mathbb{R}}} & -\log_2 e^{(x-y)-(p-q)} \\ \text{s. t. } & \bar{C}_1: \text{Tr}(\mathbf{W}) + \text{Tr}(\mathbf{V}) \leq P_{\max} \\ & \bar{C}_2: (x - y - p + q) \log_2 e \geq R_{\text{req}} \\ & \bar{C}_3: \text{Tr}(\mathbf{W}\mathbf{H}) + \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2 \geq e^x \\ & \bar{C}_4: \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2 \leq e^y \\ & \bar{C}_5: \text{Tr}(\mathbf{W}\mathbf{G}) + \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \sigma^2 \leq e^p, \forall \Delta \mathbf{g} \in \Omega \\ & \bar{C}_6: \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \sigma^2 \geq e^q, \forall \Delta \mathbf{g} \in \Omega \\ & \bar{C}_7: x \geq y, p \geq q \\ & \bar{C}_8: \mathbf{W} \succeq 0, \mathbf{V} \succeq 0 \end{aligned} \quad (9)$$

其中,约束 \bar{C}_7 和 \bar{C}_8 分别表示接收端的速率非负以及窃听端的速率非负。

因为 $\text{rank}(\mathbf{W}^*) = 1$ 显然成立,所以式(9)是式(5)的等价变形^[2]。其中 \mathbf{W}^* 表示式(9)中的最优解。

同理,将式(8)分别带入式(6)和式(7),可以得到:

问题2 等价形式:

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}, \mathbf{V}} & \text{Tr}(\mathbf{W}) + \text{Tr}(\mathbf{V}) \\ \text{s. t. } & \bar{C}_1 - \bar{C}_8 \end{aligned} \quad (10)$$

问题3 等价形式:

$$\begin{aligned} \min_{\substack{\mathbf{w}, \mathbf{V} \\ x, y, p, q \in \mathbb{R}, t}} & t \\ \text{s. t. } & \bar{C}_1 - \bar{C}_8 \\ & \bar{C}_9: \lambda_n \{F_n - F_n^*\} \leq t, \forall n = \{1, 2\} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, t 表示最优辅助变量。

通过变形,式(9)中的目标函数以及约束 \bar{C}_2 已经被转换为凸的,但是,约束 \bar{C}_4, \bar{C}_5 和 \bar{C}_6 仍然是非凸的。因此,文中定义多目标最优问题中的可行点 \bar{y} 和 \bar{p} :

$$\begin{aligned} \bar{y} &\triangleq \ln(\text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2) \\ \bar{p} &\triangleq \ln(\text{Tr}(\mathbf{W}\mathbf{G}) + \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \sigma^2) \end{aligned} \quad (12)$$

然后,引入泰勒展开,将约束 \bar{C}_4, \bar{C}_5 转化成:

$$\begin{aligned} \bar{C}_4: & \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{H}) + \sigma^2 \leq e^{\bar{y}}(y - \bar{y} + 1) \\ \bar{C}_5: & \text{Tr}(\mathbf{W}\mathbf{G}) + \text{Tr}(\mathbf{V}\mathbf{G}) + \sigma^2 \leq e^{\bar{p}}(p - \bar{p} + 1), \\ & \forall \Delta \mathbf{g} \in \Omega \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $e^{\bar{y}}(y - \bar{y} + 1)$ 和 $e^{\bar{p}}(p - \bar{p} + 1)$ 分别是约束 \bar{C}_4, \bar{C}_5 中的 e^y 和 e^p 经过泰勒近似的一阶下界。尽管通过式(13)可以将约束 \bar{C}_5 转换为线性约束,但由于信道误差的存在,约束 \bar{C}_5 仍然是半无穷的。因此,接下来引入 S-Procedure 将 \bar{C}_5 转变成线性矩阵不等式,从而解决半无穷这一问题。

引理1(S-Procedure^[3]):函数 $f_m(x) = \mathbf{x}^H \mathbf{A}_m \mathbf{x} + 2 \Re\{\mathbf{b}_m^H \mathbf{x}\} + c_m, \mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, 其中 $\mathbf{A}_m \in \mathbb{H}^N, \mathbf{b}_m \in \mathbb{C}^{N \times 1}, c_m \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$ 。如果存在一个点 \hat{x} 使得 $f_m(\hat{x}) \leq 0$ 成立,则关系式 $f_1(x) \leq 0 \Rightarrow f_2(x) \leq 0$ 成立,那么当且仅当存在 $\delta \geq 0$ 使得下式成立:

$$\delta \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{b}_1 \\ \mathbf{b}_1^H & c_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{A}_2 & \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{b}_2^H & c_2 \end{bmatrix} \succeq 0 \quad (14)$$

将 S-Procedure 应用到约束 \bar{C}_5 中,并代入等式 $\mathbf{g} = \hat{\mathbf{g}} + \Delta \mathbf{g}$ 。通过式(4)可以推导出 $\Delta \mathbf{g}^H \Delta \mathbf{g} \leq \varepsilon^2$, 由于等式成立:

$$\Delta \mathbf{g}^H \Delta \mathbf{g} - \varepsilon^2 \leq 0 \Rightarrow \Delta \mathbf{g}^H (\mathbf{W} + \mathbf{V}) \Delta \mathbf{g} + 2 \Re\{\mathbf{g}^H (\mathbf{W} +$$

$$\begin{aligned} & \{V\Delta g\} + \hat{g}^H(W+V)\hat{g} + \bar{\sigma}^2 - \\ & e^p(p - \bar{p} + 1) \leq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

$$T(W, V, x, y, p, q, \delta) \stackrel{\Delta}{=} \begin{bmatrix} \delta I_{N_t} - (W+V) & -(\hat{g}^H(W+V)\hat{g} - \bar{\sigma}^2 + e^p(p - \bar{p} + 1)) \\ -\hat{g}^H(W+V) & -\delta \varepsilon^2 - \hat{g}^H(W+V)\hat{g} - \bar{\sigma}^2 + e^p(p - \bar{p} + 1) \end{bmatrix} \succ 0 \quad (16)$$

其中, δ 表示引入的松弛变量。

因此根据引理 1, 约束 \bar{C}_5 可以被转换成一个线性矩阵不等式。

然而约束 \bar{C}_6 不满足引理 1, 所以只能求出约束 \bar{C}_6 的下界。由柯西施瓦兹不等式可知 $|\langle x, y \rangle|^2 \leq \langle x, x \rangle \cdot \langle y, y \rangle$, 其中 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 表示内积, x 和 y 是内积空间的元素, 当且仅当 x 和 y 线性相关时等式成立。

令 $x = \Delta g, y = Vg, \|\Delta g\| \leq \varepsilon$, 并带入柯西施瓦兹不等式可得:

$$\begin{aligned} |x^H y| & \leq \|x\| \|y\| \Leftrightarrow -\|x\| \|y\| \leq -|x^H y| \Rightarrow \\ & -\varepsilon \|Vg\| \leq -\|\Delta g\| \|Vg\| \leq -|\Delta g^H Vg| \end{aligned} \quad (17)$$

又因为下式显然成立:

$$-|x^H y| \leq \text{Re}(x^H y) \Rightarrow -|\Delta g^H Vg| \leq \text{Re}(\Delta g^H Vg) \quad (18)$$

则结合式(17)和式(18), 可以得到:

$$\begin{aligned} \bar{C}_5: & \begin{bmatrix} \delta I_{N_t} - (W+V) & -(\hat{g}^H(W+V)\hat{g} - \bar{\sigma}^2 + e^p(p - \bar{p} + 1)) \\ -\hat{g}^H(W+V) & -\delta \varepsilon^2 - \hat{g}^H(W+V)\hat{g} - \bar{\sigma}^2 + e^p(p - \bar{p} + 1) \end{bmatrix} \succ 0 \\ \bar{C}_6: & \hat{g}^H Vg - 2\varepsilon \|Vg\| + \bar{\sigma}^2 \geq e^q \\ \bar{C}_9: & \delta \geq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

问题 2:

$$\begin{aligned} & \min_{W, V, \delta} \text{Tr}(W) + \text{Tr}(V) \\ & \text{s. t. } \bar{C}_1 - \bar{C}_3, \bar{C}_7, \bar{C}_8, \bar{C}_4 - \bar{C}_6, \bar{C}_9 \end{aligned} \quad (22)$$

问题 3:

$$\begin{aligned} & \min_{W, V, \delta, t} t \\ & \text{s. t. } \bar{C}_1 - \bar{C}_3, \bar{C}_7, \bar{C}_8, \bar{C}_4 - \bar{C}_6, \bar{C}_9 \\ & \bar{C}_{10}: \lambda_n \{F_n - F_n^*\} \leq t, \forall n = \{1, 2\} \end{aligned} \quad (23)$$

式(23)是一个凸的半定规划问题, 任意给定一个 W 和 V , 都可以通过迭代算法求出它的最小值。其中, 令 $W[n], V[n]$ 表示第 n 次迭代的可行解。

3 鲁棒性迭代算法及收敛性分析

3.1 鲁棒性迭代算法

算法 1: 迭代算法处理问题(23)。

则当且仅当存在 $\delta \geq 0$ 使得下式成立:

$$\begin{aligned} & -(\hat{g}^H(W+V)\hat{g} - \bar{\sigma}^2 + e^p(p - \bar{p} + 1)) \\ & -\varepsilon \|Vg\| \leq \text{Re}(\Delta g^H Vg) \end{aligned} \quad (19)$$

因此, 可得约束 \bar{C}_6 的下界:

$$\begin{aligned} \text{Tr}(Vg) & = \hat{g}^H Vg = (\hat{g}^H + \Delta g^H) V(\hat{g} + \Delta g) = \\ & \underbrace{\hat{g}^H Vg + 2\text{Re}\{\Delta g^H Vg\} + \Delta g^H V\Delta g}_{(a)} = \\ & \underbrace{\hat{g}^H Vg + 2\text{Re}\{\Delta g^H Vg\}}_{(b)} \geq \underbrace{\hat{g}^H Vg - 2\varepsilon \|Vg\|}_{(c)} \end{aligned} \quad (20)$$

其中, 由于 $\Delta g^H V\Delta g$ 相对 $2\text{Re}\{\Delta g^H Vg\}$ 很小, 所以在(b)中将其忽略。对(c)运用柯西施瓦兹不等式得到了(b)的下界。

综上所述, 多目标问题可以转化为:

问题 1:

$$\begin{aligned} & \min_{W, V, \delta} -\log_2 e^{(x-y)-(p-q)} \\ & \text{s. t. } \bar{C}_1 - \bar{C}_3, \bar{C}_7, \bar{C}_8 \\ & \bar{C}_4: \text{Tr}(VH) + \sigma^2 \leq e^y \end{aligned}$$

步骤 1: 令 $n = 0$, 初始化可行点 $w[n], v[n]$ 和 $W[n] = w[n]w^H[n], V[n] = v[n]v^H[n]$;

步骤 2: 更新 $n = n + 1$;

步骤 3: 求解式(12), 得到 $\bar{y}[n]$ 和 $\bar{p}[n]$;

步骤 4: 求解半定规划问题(23), 得到 W^*, V^* ;

步骤 5: 更新迭代 $W[n] \leftarrow W^*, V[n] \leftarrow V^*$;

步骤 6: 重复步骤 2~5, 直到前后两次值之差不大于一个给定小的容忍值, 迭代结束;

步骤 7: 对得到的解 W^*, V^* 进行特征值分解, 获得 w, v 。

3.2 收敛性分析

由发送端的功率限制和式(23)中的目标函数形式, 可知 $x[n]$ 和 $q[n]$ 单调递增且有界, 同理, $y[n]$ 和 $p[n]$ 单调递减且有界^[4]。每次迭代后, 优化问题(23)的解是可行的且值更优的。因此, 优化问题的目标函数将会在几次迭代之后趋向于一个稳定值。

4 仿真结果及分析

仿真相关的设置如下: $N_t = 8, P_{\max} = 46 \text{ dB}, R_{\text{req}} = 1 \text{ bps/Hz}$ 。在瑞利平坦衰落信道条件下, 信道状态信息

\mathbf{h} 和 \mathbf{g} 分别由服从均值为 0, 方差为 $\sigma^2 = \tilde{\sigma}^2 = 25$ dBm 的复合高斯随机分布产生。仿真结果由 1 000 次信道的均值产生。

图 2 给出了系统接收端安全速率和系统发送端功率消耗在不同信道下的收敛情况。

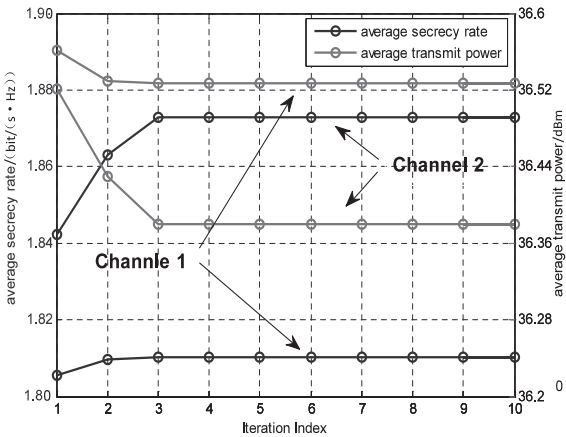


图 2 收敛性

正如上文分析,安全速率和功率消耗是单调有界的,因此,每一次迭代都会得到一个更优的解。从仿真图可以看出,安全速率和功率消耗在多次迭代之后收敛于一个稳定值,很好地证明了提出算法的收敛性。

图 3 表示不同方法 (SDP, Robust, nonRobust) 中系统接收端安全速率最大化和系统发送端功率消耗最小化之间的帕累托最优边界。其中, $\lambda \geq 0$ 以步长为 0.1 增加,并且满足约束 $\sum_n \lambda_n = 1$ 。

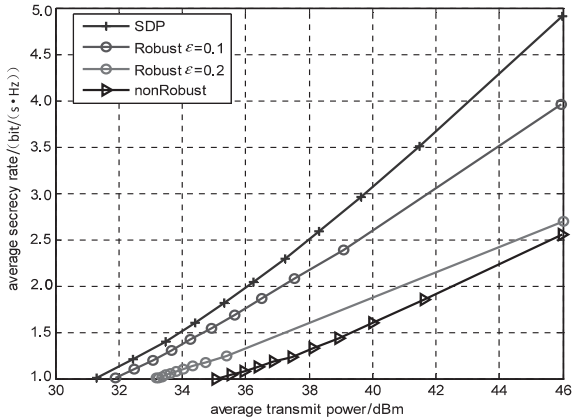


图 3 安全速率和传输功率的帕累托边界(1)

如图所示,当 ε 越大,即信道估计误差越大,相应的帕累托最优边界性能越差。另外,从图中可以看出,提出的鲁棒性方法显然要优于传统的非鲁棒性方法。

图 4 比较了系统发送端配置不同天线数 ($N_t = 4, 6, 8$) 所获得的不同帕累托最优边界。

从图中可看出,当发送端天线数越多,安全速率最大化和发送功率最小化均衡设计更优。因此,可以通过增加发送端天线配置,来增加系统接收端的安全速率。 万方数据

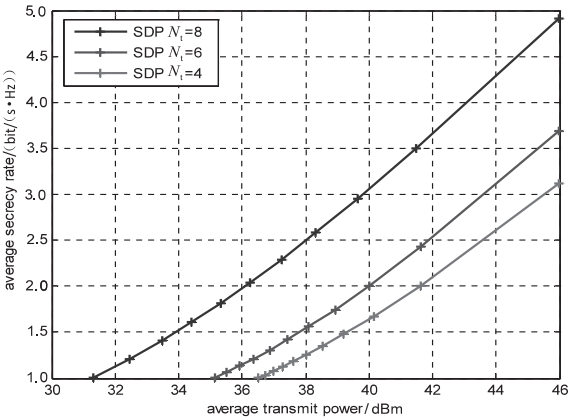


图 4 安全速率和传输功率的帕累托边界(2)

5 结束语

为了实现系统接收端安全速率和系统发送端功率消耗之间的均衡设计,构建了一个多目标最优框架。运用柯西施瓦兹不等式,一阶泰勒近似以及 S-Procedure 等方法,将构造的非凸问题转化为凸优化问题。仿真结果验证了鲁棒性迭代算法对均衡以上两个冲突问题的有效性。

参考文献:

[1] Björnson E, Jorswieck E A, Debbah M, et al. Multiobjective signal processing optimization: the way to balance conflicting metrics in 5G systems[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(6): 14–23.

[2] Li Q, Ma W K. Optimal and robust transmit designs for MISO channel secrecy by semidefinite programming [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 3799–3812.

[3] Li Q, Ma W K. Spatially selective artificial-noise aided transmit optimization for MISO multi-eves secrecy rate maximization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(10): 2704–2717.

[4] Zhao P, Zhang M, Yu H, et al. Robust beamforming design for sum secrecy rate optimization in MU-MISO networks [J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2015, 10(9): 1812–1823.

[5] Timotheou S, Krikidis I, Zheng G, et al. Beamforming for MISO interference channels with QoS and RF energy transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 13(5): 2646–2658.

[6] Shi Q, Xu W, Chang T, et al. Joint beamforming and power splitting for MISO interference channel with SWIPT: an SOCP relaxation and decentralized algorithm[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(23): 6194–6208.

[7] Marler R T, Arora J S. Survey of multi-objective optimization methods for engineering[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2004, 26(6): 369–395.

从约简结果来看,数据库原理课程对于就业的影响最为重要,这有两点原因:首先,数据库原理是计算机专业课程体系中的高阶课程,课程的学习需要大量其他专业课程的理论基础。其次,这也是对工程应用的真实反映,因为大多数的软件都应用了各种各样的数据库,熟练掌握数据库理论及应用已成为工程技术人员必备技能。电路原理作为专业基础课程,是学习计算机组成原理的先修课程。操作系统作为计算机专业的核心课程,其先修课程包括高级语言程序设计、数据结构、计算机组成原理等,所以操作系统的课程成绩不仅是对本课程学习情况的概括,也反映了其先修课程的学习情况,而且也是编译原理、数据库原理等课程的重要基础。从计算机专业课程体系来讲,电路原理、操作系统、数据库原理分别作为计算机专业的基础课程、中阶课程和高阶课程^[14],三门课程的成绩是其他课程学习情况的综合反映,是对学生专业知识学习水平的高度概括。而高等数学、英语作为公共基础课程,为计算机专业课程的学习奠定了基础,对学生的整体水平有很大的提升。

4 结束语

为了帮助高校学生有导向的进行学习,打好扎实的就业基础,采用了邻域粗糙集上的一种快速属性约简算法,对预处理后的成绩就业数据进行属性约简,得出了学生在校学习情况与就业的内在联系,即学生应该着重掌握本专业的基础课程、中阶课程和高阶课程,对于当前数据集而言,分别对应着电路原理、操作系统、数据库原理三门课程,同时公共基础课程也要进行全面的学习。属性约简的结果可以提供给在校学生作为参考,为自己的就业目标有选择地进行学习与训练。受制于数据量的影响,得出的结论暂时不能泛化推广,但是对于在校学生还是有理论上的指导意义。对于目前存在的问题,将扩大现有数据集,并做进一步的

研究。

参考文献:

[1] Pawlak Z. Rough sets[J]. International Journal of Computer & Information Sciences,1982,11(5):341-356.

[2] Pawlak Z. Rough sets: theoretical aspects of reasoning about data[M]. Dordrecht; Kluwer Academic Publishers,1991.

[3] Pawlak Z, Slowinski R. Routh set approach to multi-attribute decision analysis, invited review[J]. European Journal of Operational Research,1994,72(3):443-459.

[4] 王国胤,姚一豫,于洪.粗糙集理论与应用研究综述[J].计算机学报,2009,32(7):1229-1246.

[5] 胡清华,于达仁,谢宗霞.基于邻域粒化和粗糙集逼近的数值属性约简[J].软件学报,2008,19(3):640-649.

[6] 胡清华,赵辉,于达仁.基于邻域粗糙集的符号与数值属性快速约简算法[J].模式识别与人工智能,2008,21(6):732-738.

[7] 李墨.粗糙集属性约简算法研究及其在大学生就业系统中的应用[D].广州:华南理工大学,2014.

[8] 计文军,蒋超,王艳华,等.粗糙集在大学生就业问题中的应用[J].内江师范学院学报,2008,23:232-234.

[9] 李彩虹.基于粗糙集理论的大学生创业影响因素研究[J].技术与创新管理,2016,37(1):110-113.

[10] 叶东毅,黄翠微,赵斌.粗糙集中属性约简的一个贪心算法[J].系统工程与电子技术,2000,22(9):63-65.

[11] 崔建国,宋博翰,董世良,等.基于邻域粗糙集的航空发电机健康诊断方法[J].数据采集与处理,2012,27(1):80-84.

[12] Liu Yong, Huang Wenliang, Jiang Yunliang, et al. Quick attribute algorithm for neighborhood rough set model[J]. Information Science,2014,271(7):65-81.

[13] 娄畅,刘遵仁,郭功振.基于块集的邻域粗糙集的快速约简算法[J].计算机科学,2014,41(11A):337-339.

[14] 贺超波,陈启买.高校课程相关性粗糙集分析模型及应用[J].计算机工程与应用,2011,47(27):233-235.

(上接第187页)

[8] Ng D W K, Lo E S, Schober R. Multi-objective resource allocation for secure communication in cognitive radio networks with wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2016,65(5):3166-3184.

[9] Pei Y, Liang Y C, Teh K C, et al. Secure communication in multiantenna cognitive radio networks with imperfect channel state information[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2011,59(4):1683-1693.

[10] Wu W, Zhang X, Wang S, et al. Max-min fair wireless energy transfer for MIMO wiretap channels[J]. IET Communication,2016,10(7):739-744.

[11] Liu L, Zhang R, Chua K C. Secrecy wireless information and

power transfer with MISO beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,62(7):1850-1863.

[12] Zhang R, Ho C K. MIMO broadcasting for simultaneous wireless information and power transfer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication,2013,12(5):1989-2001.

[13] 孟庆民,龚家乐,曾桂根,等.5G多天线系统中毫米波物理层安全设计[J].计算机技术与发展,2016,26(2):91-94.

[14] Wang J, Palomar D P. Worst-case robust MIMO transmission with imperfect channel knowledge[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,57(8):3086-3100.

[15] Huang J, Swindlehurst A L. Robust secure transmission in MISO channels based on worst-case optimization[J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2012,60(4):1696-1707.