

DOI: 10.7652/xjtuxb201711016

多发单收窃听信道中人工噪声辅助的鲁棒波束成形设计

徐静, 许思文, 孙黎

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对无线通信物理层安全中合法用户接收的信息易受到非法窃听者窃听的问题,提出了一种人工噪声辅助的鲁棒波束成形(AN-RBF)设计方案。首先,利用信道估计分别获取发射端到合法用户的瞬时非理想信道状态信息(CSI)和发射端到窃听者的统计 CSI;然后,在发射端向合法用户发送的信号中添加人工噪声,通过对有用信号和人工噪声进行联合优化,在满足发射功率控制和中断概率限制的约束条件下实现安全传输速率的最大化。AN-RBF 方案发射端仅需获取窃听者的统计 CSI,且发射端获取的合法用户的瞬时 CSI 是非理想的,系统开销少,另外,人工噪声的添加可以降低窃听者接收端信干噪比,提高多发单收(MISO)窃听信道中的安全传输速率。仿真结果表明,在 20 dB 功率且仿真环境相同的情况下,所提 AN-RBF 方案的安全速率比各态同向人工噪声辅助方案提高了约 $2 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。

关键词: 无线通信;物理层安全;鲁棒波束成形;人工噪声

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0118-06

A Robust Design of Transmit Beam Forming with Artificial Noises in MISO Wiretap Channels

XU Jing, XU Siwen, SUN Li

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A robust beam forming (AN-RBF) scheme with artificial noises is proposed to improve the physical layer for the wireless communication. Firstly, the channel estimation is used to get the imperfect channel state information (CSI) of a legitimate receiver and the statistical CSI of eavesdroppers. Then, the AN-RBF scheme adds artificial noises into transmission signals to maximize the secrecy rate under constraints of the transmit power and the secrecy rate outage probability. The AN-RBF scheme only needs to get the imperfect CSI of the link to the legitimate receiver and the statistical CSI of the link to eavesdroppers, therefore, reduces the system overhead. Adding artificial noise effectively reduces the signal-to-interference-and-noise ratio (SINR) received at eavesdroppers. Thus, the AN-RBF scheme improves the physical layer security performance of multiple-input single-output (MISO) wiretap channels. Simulation results and a comparison with the isotropic AN scheme in the same simulation environment show that the AN-RBF scheme improves the secrecy rate approximately by $2 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$.

Keywords: wireless communication; physical layer security; robust beamforming; artificial noise

收稿日期: 2017-06-05。 作者简介: 徐静(1983—),女,博士,讲师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61431011, 61302068)。

网络出版时间: 2017-08-31 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170831.1712.006.html>

无线通信的广播性和开放性使其极易受到窃听和干扰等安全威胁^[1-5],因此,保证无线通信的安全传输变得尤为重要。相对于传统的加密方法,物理层安全旨在利用无线通信的物理层特性,如噪声、衰落等,以信息论中的理论为基础保证无线通信的安全性。此外,进入 20 世纪末,多输入多输出(MIMO)技术的出现极大地推动了无线通信技术的发展。对于多天线系统,波束成形设计是其研究的热点,而波束成形技术的性能在很大程度上依赖于发射端获取的信道状态信息(CSI)。已有的针对多人单出(MISO)窃听信道波束成形的设计多是在发射端获取理想的主信道和窃听信道 CSI 的基础上进行的^[6],但在实际应用中,由于信道的动态变化和信道估计误差、量化误差、反馈时延等因素的影响,发射端获取的主信道的 CSI 极有可能出现误差^[7-8]。此外,当窃听者不是通信系统的一部分时,发射端很难获取其瞬时 CSI。当窃听者是通信系统中的一部分时,窃听者的 CSI 对于发射端来说不是不可预测的,由于统计 CSI 变化相对缓慢,因此发射端可以比较准确地获取窃听信道的统计 CSI。因此,研究如何利用窃听者的统计 CSI 进行传输方案设计也很有意义。

文献[9]研究了已知窃听者统计 CSI 时的保密通信;文献[10]研究了物理层安全中最差情况的鲁棒波束成形技术,但由于极端情况的发生概率较低,这种设计方法显得较为保守;文献[11]基于中断概率约束优化设计波束成形,考虑了 MISO 窃听信道下多种非理想的合法用户和窃听者信道模型,但是没有考虑添加人工噪声的情况;文献[12]考虑了多种情况下添加人工噪声的安全速率最大化问题,但所考虑主信道是理想的,窃听信道的瞬时 CSI 是非理想的;文献[13]在合法用户和窃听者 CSI 均存在误差的情况下,通过添加人工噪声以最大化安全速率,但其只优化设计了有用信号和人工噪声的协方差矩阵,没有进一步设计一维的波束成形向量。此外,文献[12-13]均没有考虑发射端仅能获取窃听者的统计 CSI 并且发射端获取的合法用户瞬时 CSI 非理想的情况。实际上,相比瞬时 CSI,发射端获取窃听信道的统计 CSI 不仅开销小也更准确。

针对以上研究现状,本文基于 MISO 窃听信道下发射端的合法用户瞬时 CSI 非理想和发射端仅获得窃听者统计 CSI 的信道假设,引入人工噪声,在中断概率约束条件下以最大化安全速率为目标进行人工噪声辅助的鲁棒波束成形设计。

1 系统模型及问题描述

本文研究的 MISO 窃听信道模型如图 1 所示,该模型包括 3 部分:发射端 Alice、合法接收用户 Bob 和 K 个窃听者($Eve_1, \dots, Eve_K$)。Alice 向 Bob 发送信息,而 Eve 则试图窃听该信息。Alice 使用 N_t 根天线发射;Bob 和 Eve 均使用单天线接收。

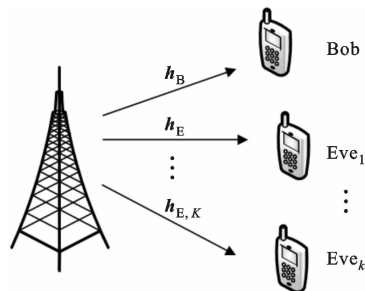


图 1 MISO 窃听信道模型

考虑在发射信号中添加人工噪声,则 Alice 的发送信号向量 $\mathbf{x}$ 可以表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{w}s + \mathbf{z} \quad (1)$$

式中: s 为发射端向合法用户发送的符号, $E\{|s|^2\} = 1$; $\mathbf{w} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 为波束成形向量; $\mathbf{z} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 为添加的人工噪声向量,服从零均值高斯分布,即 $\mathbf{z} \sim \mathcal{CN}(0, \mathbf{Q}_z)$,其中 $\mathbf{Q}_z \succeq \mathbf{0}$ 为噪声的协方差矩阵, $\mathbf{Q}_z = E\{\mathbf{z}\mathbf{z}^H\}$, $\succeq$ 表示半正定矩阵。

合法用户和第 k 个窃听者的接收信号分别为

$$\left. \begin{aligned} y_B &= \mathbf{h}_B^H \mathbf{x} + n_B \\ y_{E,k} &= \mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{x} + n_{E,k} \\ \forall k &\in K \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 为发射端的发射信号; $\mathbf{h}_B^H \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 和 $\mathbf{h}_{E,k} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 分别为合法用户和第 k 个窃听者的信道矩阵;不失一般性, $n_B \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 和 $n_{E,k} \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ 分别为合法用户和第 k 个窃听者处的加性高斯白噪声, $K = \{1, 2, \dots, K\}$ 。

假设发射端获取的合法用户瞬时信道状态信息非理想,并且发射端仅能获取窃听者的统计信道状态信息,则信道模型为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{h}_B &= \hat{\mathbf{h}}_B + \Delta \mathbf{h}_B \\ \mathbf{h}_{E,k} &\sim \mathcal{CN}(0, \alpha_{E,k}^2 \mathbf{I}) \\ \forall k &\in K \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\hat{\mathbf{h}}_B \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 为合法用户信道的估计值; $\Delta \mathbf{h}_B \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_B^2 \mathbf{I})$ 为估计误差; $\alpha_{E,k}^2$ 为窃听信道协方差系数。令 $\mathbf{W} = \mathbf{w}\mathbf{w}^H$, 中断概率和功率约束条件下最大化安全速率的优化问题可以表示为

$$\begin{aligned}
& \max_{\mathbf{w}, \mathbf{Q}_z} R \\
\text{s. t. } & \begin{cases} P_r \left\{ \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{W} \mathbf{h}_B}{1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_B} \right) - \right. \\ \left. \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{W} \mathbf{h}_{E,k}}{1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_{E,k}} \right) \geq R \right\} \geq 1 - p_k, \forall k \in K \\ \text{tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z) \leq P \\ \mathbf{W} \geq \mathbf{0}, \mathbf{Q}_z \geq \mathbf{0} \\ \text{rank}(\mathbf{W}) = 1 \end{cases}
\end{aligned} \quad (4)$$

式中: $P_r \{ \cdot \}$ 表示概率; $\text{tr}(\cdot)$ 表示矩阵的迹; $\text{rank}(\cdot)$ 表示矩阵秩; P 为发送功率; R 为安全速率目标值; $p_k \in (0, 1]$ 为对第 k 个窃听者系统允许的最大中断概率。本文之所以考虑(4)式所示的安全速率最大化问题,是因为在实际应用中不影响用户服务质量的情况下系统允许偶尔的中断事件发生。

2 波束成形优化设计

在上一节描述的基础上,本节着重对波束成形向量 $\mathbf{w}$ 和人工噪声协方差矩阵 $\mathbf{Q}_z$ 进行优化设计。首先,优化问题式(4)很难求解的原因是概率约束条件没有闭式表达,因此可以考虑利用 Bernstein-Type 不等式^[14]将概率约束进行转化。本文考虑中断概率约束近似转化为不确定区域集合的确定性约束^[13]。

由于 $\Delta \mathbf{h}_B$ 和 $\mathbf{h}_{E,k}$ 服从高斯分布,可以将中断概率约束近似转化为不确定区域集合的确定性约束。由文献[15]知, $\Delta \mathbf{h}_B$ 和 $\mathbf{h}_{E,k}$ 的不确定区域集合为 $H_B = \{ \Delta \mathbf{h}_B : \| \Delta \mathbf{h}_B \| \leq r_B \}$, $H_{E,k} = \{ \mathbf{h}_{E,k} : \| \mathbf{h}_{E,k} \| \leq r_{E,k} \}$, 为保证 $\Delta \mathbf{h}_B$ 和 $\mathbf{h}_{E,k}$ 在区域 $H_B, H_{E,k}$ 的概率为 $1 - p_k$, 则不定区域半径的大小可以表示为

$$\begin{cases} r_B = (0.5 \sigma_B^2 \Phi^{-1}(1 - p_k))^{1/2} \\ r_{E,k} = (0.5 \sigma_{B,k}^2 \Phi^{-1}(1 - p_k))^{1/2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Phi^{-1}(x)$ 是自由度为 $2N_t$ 的卡方分布的逆累积密度函数。进一步,如果在 $H_B, H_{E,k}$ 内确保

$$\ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{W} \mathbf{h}_B}{1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_B} \right) - \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{W} \mathbf{h}_{E,k}}{1 + \mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_{E,k}} \right) \geq R \quad (6)$$

那么,在整个 $\Delta \mathbf{h}_B$ 和 $\mathbf{h}_{E,k}$ 的取值区域内,安全速率不小于 R 这一事件发生的概率将大于或等于 $1 - p_k$ 。因此,中断概率约束条件可以近似转化为

$$\begin{aligned}
& \min_{\| \Delta \mathbf{h}_B \| \leq r_B} \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{W} \mathbf{h}_B}{1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_B} \right) - \\
& \max_{\| \mathbf{h}_{E,k} \| \leq r_{E,k}} \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{W} \mathbf{h}_{E,k}}{1 + \mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_{E,k}} \right) \geq R \quad (7)
\end{aligned}$$

引入松弛变量 $\beta \geq 1$, 则速率优化问题可以表示为

$$\begin{aligned}
& R^* = \max_{\beta, \mathbf{W}, \mathbf{Q}_z} R \\
& \text{s. t. } \begin{cases} \beta \geq 1 \\ \min_{\| \Delta \mathbf{h}_B \| \leq r_B} \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{W} \mathbf{h}_B}{1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_B} \right) - \ln \beta \geq R \\ \max_{\| \mathbf{h}_{E,k} \| \leq r_{E,k}} \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{W} \mathbf{g}_k}{1 + \mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{Q}_z \mathbf{g}_k} \right) \leq \ln \beta, \forall k \in K \\ \text{tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z) \leq P \\ \mathbf{W} \geq \mathbf{0}, \mathbf{Q}_z \geq \mathbf{0} \\ \text{rank}(\mathbf{W}) = 1 \end{cases}
\end{aligned} \quad (8)$$

式中: R^* 表示优化问题(8)的最优目标值。这里 $\ln \beta$ 的物理含义为窃听者的最大互信息。式(8)表示的是一个双重优化问题:第一重优化变量为 β , 第二重优化变量为 $\mathbf{W}$ 和 $\mathbf{Q}_z$ 。将固定 β 后式(8)的最优目标值记作 R_β^* , 则固定 $\beta (\beta \geq 1)$ 后式(8)可以转化为一个变形优化问题

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{W}, \mathbf{Q}_z} \text{tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z) \\
& \text{s. t. } \begin{cases} \min_{\| \Delta \mathbf{h}_B \| \leq r_B} \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{W} \mathbf{h}_B}{1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_B} \right) - \ln \beta \geq R_\beta^* \\ \max_{\| \mathbf{h}_{E,k} \| \leq r_{E,k}} \ln \left(1 + \frac{\mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{W} \mathbf{h}_{E,k}}{1 + \mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_{E,k}} \right) \leq \ln \beta, \forall k \in K \\ \mathbf{W} \geq \mathbf{0}, \mathbf{Q}_z \geq \mathbf{0} \\ \text{rank}(\mathbf{W}) = 1 \end{cases}
\end{aligned} \quad (9)$$

可以证明,最小化功率优化问题式(9)的最优解是将固定 β 后最大化安全速率优化问题式(8)的最优解。详细的证明过程见附录 A 证明 1。因此,可以通过求解式(9)来求解优化问题式(8)。利用对数函数的单调性可将问题式(9)的前 $K+1$ 个约束优化条件简化为

$$\begin{aligned}
& \min_{\| \Delta \mathbf{h}_B \| \leq r_B} \frac{1 + \mathbf{h}_B^H (\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z) \mathbf{h}_B}{\beta (1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_B)} \geq 2^{R_\beta^*} \\
& \max_{\| \mathbf{h}_{E,k} \| \leq r_{E,k}} \mathbf{h}_{E,k}^H (\mathbf{W} - (\beta - 1) \mathbf{Q}_z) \mathbf{h}_{E,k} \leq (\beta - 1), \forall k \in K
\end{aligned} \quad (10)$$

然后,利用半定松弛^[16],忽略问题式(9) $\text{rank}(\mathbf{W}) = 1$ 这一非凸约束条件,则问题式(9)进一步可以转化为如下形式

$$\begin{aligned}
& \min_{\mathbf{W}, \mathbf{Q}_z} \text{tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z) \\
& \text{s. t. } \begin{cases} \min_{\| \Delta \mathbf{h}_B \| \leq r_B} \frac{1 + \mathbf{h}_B^H (\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z) \mathbf{h}_B}{\beta (1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_B)} \geq 2^{R_\beta^*} \\ \max_{\| \mathbf{h}_{E,k} \| \leq r_{E,k}} \mathbf{h}_{E,k}^H (\mathbf{W} - (\beta - 1) \mathbf{Q}_z) \mathbf{h}_{E,k} \leq \\ (\beta - 1), \forall k \in K \\ \mathbf{W} \geq \mathbf{0}, \mathbf{Q}_z \geq \mathbf{0} \end{cases}
\end{aligned} \quad (11)$$

可以证明凸优化问题(11)的最优解满足 $\text{rank}(\mathbf{W})=1$ 的条件,详细证明过程见附录 A 证明 2。因此,不难得到结论:波束成形是概率约束条件近似转化后的安全速率最大化问题(8)的最优解。

引入松弛变量 $\xi>0$,定义 $\mathbf{W}=\mathbf{S}/\xi$, $\mathbf{Q}_z=\mathbf{Z}/\xi$,则问题式(11)中的分式条件转化为

$$\min_{\|\Delta \mathbf{h}_B\| \leq r_B} \frac{\xi + \mathbf{h}_B^H (\mathbf{S} + \mathbf{Z}) \mathbf{h}_B}{\beta(\xi + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Z} \mathbf{h}_B)} \geq 2^{R_\beta^*} \quad (12)$$

根据 Charnes-Cooper 变换^[17],原分式条件可进一步等价于下面一组条件

$$\left. \begin{aligned} \min_{\|\Delta \mathbf{h}_B\| \leq r_B} \xi + \mathbf{h}_B^H (\mathbf{S} + \mathbf{Z}) \mathbf{h}_B &\geq 2^{R_\beta^*} \\ \max_{\|\Delta \mathbf{h}_B\| \leq r_B} \beta(\xi + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Z} \mathbf{h}_B) &\leq 1 \\ \xi &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

然后根据 S-procedure^[18]把无限多个约束转化为有限多个约束条件,优化问题(11)等价于

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{S}, \mathbf{Z}} \quad & \text{tr} \left(\frac{\mathbf{S} + \mathbf{Z}}{\xi} \right) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \begin{bmatrix} \lambda_h \mathbf{I} + \mathbf{A} & \mathbf{A} \hat{\mathbf{h}}_B \\ \hat{\mathbf{h}}_B^H \mathbf{A} & \hat{\mathbf{h}}_B^H \mathbf{A} \hat{\mathbf{h}}_B + \xi - 2^{R_\beta^*} - \lambda_h r_B^2 \end{bmatrix} \geq \mathbf{0} \\ \begin{bmatrix} \lambda_m \mathbf{I} - \beta \mathbf{Z} & -\beta \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_B \\ -\beta \hat{\mathbf{h}}_B^H \mathbf{Z} & 1 - \beta \xi - \beta \hat{\mathbf{h}}_B^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_B - \lambda_m r_B^2 \end{bmatrix} \geq \mathbf{0} \\ \begin{bmatrix} \lambda_g \mathbf{I} - \Sigma & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & (\beta - 1)\xi - \lambda_g r_{C,k}^2 \end{bmatrix} \geq \mathbf{0}, \forall k \in K \\ \mathbf{S} \geq \mathbf{0}, \mathbf{Z} \geq \mathbf{0} \\ \xi \geq 0, \lambda_h \geq 0, \lambda_m \geq 0, \lambda_g \geq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{A}=\mathbf{S}+\mathbf{Z}$; $\Sigma=\mathbf{S}-(\beta-1)\mathbf{Z}$; $\xi, \lambda_h, \lambda_m, \lambda_g$ 为松弛变量。

综上,当 β 为定值时,最终将问题式(9)转化为可解的 SDP 问题式(14),然后利用 CVX 工具^[19]方便求解。也就是说,对于概率约束条件近似转化后的最大化安全速率问题式(8)来说,当固定第一重优化变量 β 时,第二重优化问题最终可以转化为式(14)所示的 SDP 问题求解。因此,针对 β 一维搜索,通过解一系列的 SDP 问题,可以求得最优的 $\mathbf{W}^*$ 和 $\mathbf{Q}_z^*$ 。

β 的一维搜索范围如下

$$\beta - 1 \stackrel{(a)}{\leq} \min_{\|\Delta \mathbf{h}_B\| \leq r_B} \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{S} \mathbf{h}_B}{\mathbf{h}_B^H \mathbf{Z} \mathbf{h}_B + \xi} \leq \frac{\hat{\mathbf{h}}_B^H \mathbf{S} \hat{\mathbf{h}}_B}{\hat{\mathbf{h}}_B^H \mathbf{Z} \hat{\mathbf{h}}_B + \xi} \stackrel{(b)}{\leq} P \|\hat{\mathbf{h}}_B\|^2 \quad (15)$$

式(15)的推导过程如下。由保密速率非负可知

$$\min_{\|\Delta \mathbf{h}_B\| \leq r_E} \text{lb} \left(1 + \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{S} \mathbf{h}_B}{\mathbf{h}_B^H \mathbf{Z} \mathbf{h}_B + \xi} \right) \geq \text{lb} \beta, \text{ 因为对数为单调增}$$

函数,所以易知式(15)的(a)不等式成立;若令 $\mathbf{Z}=\mathbf{0}$,则 $\text{tr}(\mathbf{S}) \leq \xi P$,故可知式(15)的(b)不等式成立。此外,由上一小节已知 $\beta \geq 1$,所以 β 的一维搜索范围为 $1 \leq \beta \leq 1 + P \|\hat{\mathbf{h}}_B\|^2$ 。

3 仿真实验和分析

本文以文献[20]中未做鲁棒性设计的 isotropic AN 方案和文献[21]中从最差情况考虑没有人工噪声辅助的鲁棒波束设计方案作为比较对象,对本文方案的优化结果进行分析比较。仿真参数设置如下: $N_t=4$;中断概率 $p_k=p=0.1$;参照文献[13],合法用户信道估计值设置为 $\hat{\mathbf{h}}_B = [-1.030 \ 1 + 0.306 \ 0i, -0.016 \ 2 + 0.561 \ 8i, 0.713 \ 4 - 0.150 \ 4i, 1.048 \ 8 + 0.108 \ 6i]$;另外,归一化后的信道估计误差 $\alpha_b \triangleq \sigma_b / \|\hat{\mathbf{h}}_B\|$ 。仿真结果取 10 000 次独立蒙特卡洛实验的均值。

在 $\alpha_B=0.05, \alpha_{E,k}^2=0.01$ 的条件下,进行了不同波束成形方案的安全速率与发送功率关系的对比实验,结果如图 2 所示。从图 2 可见,本文 AN-RBF 方案的安全速率性能明显优于文献[20]的方案。另外与文献[21]中的设计方案相比,AN-RBF 方案也能提高系统的安全速率,特别是在中高发送功率的情况下。

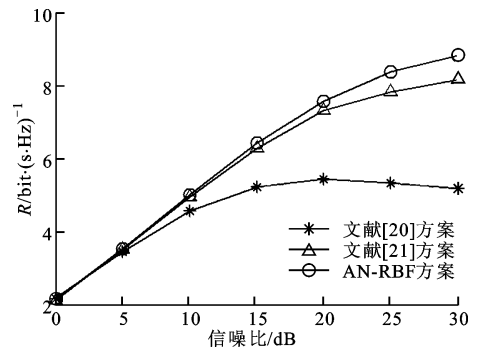


图 2 中断概率约束下各方案的安全速率随信噪比的变化情况

在发送功率为 20 dB、 $\alpha_{E,k}^2=0.01$ 的条件下,进行了中断概率约束下各方案的安全速率随合法用户信道误差的变化情况对比实验,结果如图 3 所示。从图 3 可以看出 m 随着合法用户信道估计误差的增加,文献[20]未做鲁棒性设计的方案,其安全速率明显减小,而本文 AN-RBF 方案的安全速率较为平稳,其受信道估计误差影响较小。这充分表明,本文方案能够对抗信道估计误差的影响,对主信道估计误差具有较好的鲁棒性。在发送功率为 20 dB、 $\alpha_B=0.01$ 的条件下,进行了中断概率约束下各方案的

安全速率随窃听信道分布参数的变化实验,结果如图4所示。由图4可以看出,随着 $\alpha_{E,k}^2$ 的增加,各方案的安全速率均有所降低,但AN-RBF方案的性能要优于其他对比方案。

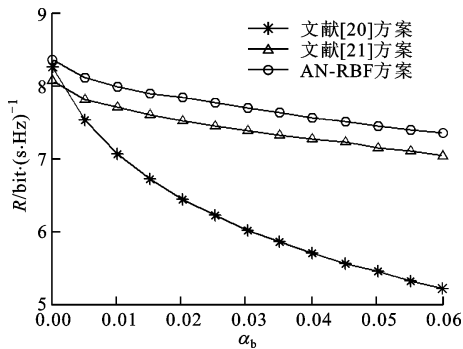


图3 中断概率约束下各方案的安全速率随合法用户信达估计误差的变化情况

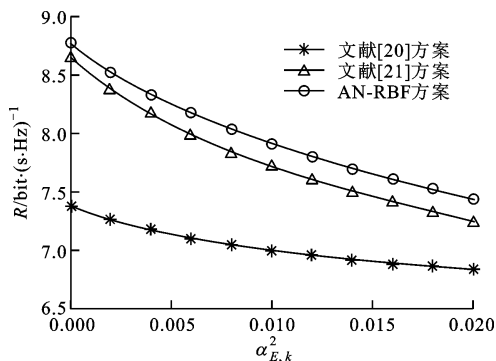


图4 中断概率约束下各方案的安全速率随窃听信道分布参数的变化情况

在发送功率为 20 dB、 $\alpha_B = 0.05$ 、 $\alpha_{E,k}^2 = 0.01$ 、安全速率目标值 $R = 5 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 的条件下,进行了不同方案安全速率的经验累积分布函数对比,结果如图5所示。文献[20]的方案由于没有将主信道的信道估计误差考虑在内,约70%的安全速率是大于等于 $5 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 的。然而,AN-RBF方案则几乎确保了所有的安全速率大于或等于目标安全速率 $5 \text{ bit} \cdot (\text{s} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 。

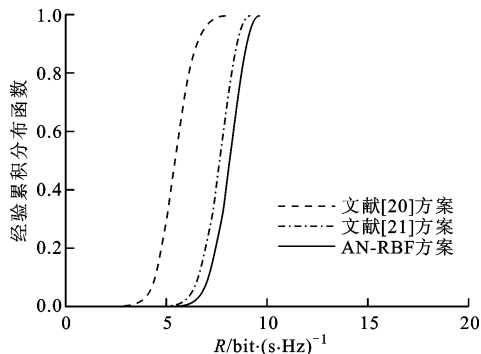


图5 不同方案经验累积分布函数

4 结 语

本文在假设发射端可获取窃听者统计 CSI 以及合法用户瞬时非理想 CSI 情况下,研究如何在中断概率和功率约束下,优化设计没有特定结构人工噪声辅助的鲁棒波束成形,以最大化安全速率,提出一种多发单收窃听信道中人工噪声辅助的鲁棒波束成形设计方案——AN-RBF 方案。仿真结果表明,本文所提 AN-RBF 方案比其他几种同类方案具有显著的有效性和优越性。此外,当设计 OFDM 符号每个子载波上的传输方案时,本文基于窄带的发送设计方案也可以比较容易地推广到频率选择性衰落信道。

参考文献:

- [1] ZHANG R, ZHONG Z, ZHAO J, et al. Channel measurement and packet-level modeling for V2I spatial multiplexing uplinks using massive MIMO [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(10): 7831-7843.
- [2] CUI T, GAO F, HO T, et al. Distributed space-time coding for two-way wireless relay networks [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(2): 658-671.
- [3] 孙黎, 张太镭. 译码转发系统中一种半分布式用户选择策略 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(12): 115-119.
- [4] 孙黎, 徐洪斌. 协作式终端直通系统中星座旋转辅助的干扰避免策略 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 6-11.
- [5] SUN Li, ZHANG Taiyi. Semi-distributed user selection scheme in decode-and forward system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(12): 115-119.
- [6] 孙黎, 徐洪斌. 协作式终端直通系统中星座旋转辅助的干扰避免策略 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(12): 6-11.
- [7] SUN Li, XU Hongbin. A scheme to avoid interference via constellation rotation for cooperative device-to-device systems [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(12): 6-11.
- [8] 任品毅, 权良辉. 多输入多输出系统中基于多级维纳滤波的均衡算法 [J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(2): 218-221.
- [9] REN Pinyi, QUAN Lianghui. Adaptive reduced-rank linear equalization of multiple input multiple output frequency selective channels based on multistage wiener filter [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(2): 218-221.
- [10] ZHENG C, CUMANAN K, DING Z, et al. Secrecy rate optimizations for a MIMO secrecy channel with a

- cooperative jammer [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(5): 1833-1847.
- [7] GAO F, CUI T, NALLANATHAN A. On channel estimation and optimal training design for amplify and forward relay networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(5): 1907-1916.
- [8] GAO F, ZHANG R, LIANG Y C. Optimal channel estimation and training design for two-way relay networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2009, 57(10): 3024-3033.
- [9] XIONG J, WONG K K, MA D, et al. A closed-form power allocation for minimizing secrecy outage probability for MISO wiretap channels via masked beamforming [J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(9): 1496-1499.
- [10] 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.
- [11] MA S, HONG M, SONG E, et al. Outage constrained robust secure transmission for MISO wiretap channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 13(10): 5558-5570.
- [12] 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.
- [13] TANG Y, XIONG J, MA D, et al. Robust artificial noise aided transmit design for MISO wiretap channels with channel uncertainty [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(11): 2096-2099.
- [14] WANG K Y, SO M C, CHANG T H, et al. Outage constrained robust transmit optimization for multiuser MISO downlinks: tractable approximations by conic optimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 62(21): 5690-5705.
- [15] PASCUAL-ISERTE A, PALOMAR D P, PEREZ-NEIRA A I, et al. A robust maximin approach for MIMO communications with imperfect channel state information based on convex optimization [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(1): 346-360.
- [16] LUO Z Q, MA W K, SO M C, et al. Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2010, 27(3): 20-34.
- [17] CHARNES A, COOPER W W. Programming with linear fractional functionals [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 2010, 9(3/4): 181-186.
- [18] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004: 103-105.
- [19] GRANT M, BOYD S P. CVX: MATLAB software disciplined convex programming [EB/OL]. [2017-04-16]. <http://cvxr.com/cvx/>.
- [20] ZHOU X, MCKAY M R. Secure transmission with artificial noise over fading channels: achievable rate and optimal power allocation [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 3831-3842.
- [21] LI Qiang, MA Wing-Kin. Optimal and robust transmit designs for MISO channel secrecy by semidefinite programming [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(8): 3799-3812.

附录 A

证明 1 首先,将问题式(9)合并外部的变量 β 的整体优化问题等价表示为

$$\begin{aligned} & \min_{\mathbf{W}, \mathbf{Q}_z} \text{tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z) \\ & \text{s. t.} \quad \begin{cases} R'_s(\mathbf{W}, \mathbf{Q}_z) \geq R^* \\ \mathbf{W} \geq \mathbf{0}, \mathbf{Q}_z \geq \mathbf{0} \\ \text{rank}(\mathbf{W}) = 1 \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} R'_s(\mathbf{W}, \mathbf{Q}_z) = & \min_{\|\Delta \mathbf{h}_B\| \leq r_B} \text{lb} \left(1 + \frac{\mathbf{h}_B^H \mathbf{W} \mathbf{h}_B}{1 + \mathbf{h}_B^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_B} \right) - \\ & \max_{\|\mathbf{h}_{E,k}\| \leq r_{E,k}} \text{lb} \left(1 + \frac{\mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{W} \mathbf{h}_{E,k}}{1 + \mathbf{h}_{E,k}^H \mathbf{Q}_z \mathbf{h}_{E,k}} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

然后,令 $(\mathbf{W}', \mathbf{Q}'_z)$ 和 $(\mathbf{W}^*, \mathbf{Q}^*_z)$ 分别为优化问题式(8)和式(16)的最优解。很明显, $(\mathbf{W}', \mathbf{Q}'_z)$ 同样满足问题式(16)的约束条件,因此 $(\mathbf{W}', \mathbf{Q}'_z)$ 也是问题式(16)的可行解。可得 $\text{tr}(\mathbf{W}^* + \mathbf{Q}^*_z) \leq \text{tr}(\mathbf{W}' + \mathbf{Q}'_z) \leq P$, 进一步可知, $(\mathbf{W}^*, \mathbf{Q}^*_z)$ 同样满足优化问题式(8)的限制条件,因此 $(\mathbf{W}^*, \mathbf{Q}^*_z)$ 也是优化问题式(8)的可行解,所以 $R'_s(\mathbf{W}^*, \mathbf{Q}^*_z) \leq R^*$ 。另外,由问题式(16)的约束条件可知 $R'_s(\mathbf{W}^*, \mathbf{Q}^*_z) \geq R^*$, 因此 $R'_s(\mathbf{W}^*, \mathbf{Q}^*_z) = R^*$ 。也就是说, $(\mathbf{W}^*, \mathbf{Q}^*_z)$ 同样是优化问题式(8)的最优解,定理 1 得证。

证明 2 为证明凸优化问题式(11)的最优解秩为 1, 本文验证其 Karush-Kuhn-Tucker(KKT)最优性条件。首先,令求得优化问题(11)最优解时合法用户信道和窃听者信道分别为 $\mathbf{h}_{B,m}$ 和 $\mathbf{h}_{E,m,k}$; 然后,可以将优化问题(11)中相应的无穷多条件转化为一个条件,从而将优化问题(11)转化为

$$\min_{\mathbf{W}, \mathbf{Q}_z} \text{tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} (1-2^{R_\beta^*}\beta) + \mathbf{h}_{B,m}^H(\mathbf{W} + (1-2^{R_\beta^*}\beta)\mathbf{Q}_z)\mathbf{h}_{B,m} \geq 0 \\ (\beta-1)(1 + \mathbf{h}_{E,m,k}^H\mathbf{Q}_z\mathbf{h}_{E,m,k}) - \mathbf{h}_{E,m,k}^H\mathbf{W}\mathbf{h}_{E,m,k} \geq 0, \forall k \in K \\ \mathbf{W} \geq \mathbf{0}, \mathbf{Q}_z \geq \mathbf{0} \end{cases} \quad (18)$$

问题(18)的拉格朗日函数表示为

$$\begin{aligned} L(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \lambda, \mu_k) = & \text{tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}_z) - \lambda(1-2^{R_\beta^*}\beta) - \\ & \lambda \mathbf{h}_{B,m}^H(\mathbf{W} + (1-2^{R_\beta^*}\beta)\mathbf{Q}_z)\mathbf{h}_{B,m} - \\ & \sum_{k=1}^K \mu_k ((\beta-1)(1 + \mathbf{h}_{E,m,k}^H\mathbf{Q}_z\mathbf{h}_{E,m,k}) - \\ & \mathbf{h}_{E,m,k}^H\mathbf{W}\mathbf{h}_{E,m,k}) - \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{W}) - \text{tr}(\mathbf{B}\mathbf{Q}_z) \end{aligned} \quad (19)$$

式中: $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \lambda, \mu_k$ 为对偶变量。故, KKT 条件为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I} - \lambda \mathbf{h}_{B,m} \mathbf{h}_{B,m}^H + \sum_{k=1}^K \mu_k \mathbf{h}_{E,m,k} \mathbf{h}_{E,m,k}^H - \mathbf{A} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{A}\mathbf{W} &= \mathbf{0} \\ \mathbf{W} &\geq \mathbf{0} \\ \mu_k &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

对式(20)第一个等式的两边右乘一个矩阵 $\mathbf{W}$ 可得

$$(\mathbf{I} + \sum_{k=1}^K \mu_k \mathbf{h}_{E,m,k} \mathbf{h}_{E,m,k}^H) \mathbf{W} = \lambda \mathbf{h}_{B,m} \mathbf{h}_{B,m}^H \mathbf{W} \quad (21)$$

因为 $\mathbf{I} + \sum_{k=1}^K \mu_k \mathbf{h}_{E,m,k} \mathbf{h}_{E,m,k}^H \geq \mathbf{0}$, 所以

$$\begin{aligned} \text{rank}(\mathbf{W}) &= \text{rank}((\mathbf{I} + \sum_{k=1}^K \mu_k \mathbf{h}_{E,m,k} \mathbf{h}_{E,m,k}^H) \mathbf{W}) = \\ &= \text{rank}(\lambda \mathbf{h}_{B,m} \mathbf{h}_{B,m}^H \mathbf{W}) \leq 1 \end{aligned} \quad (22)$$

当 $\text{rank}(\mathbf{W})=0$ 时, 意味着 $\mathbf{W}=\mathbf{0}$, 这种情况是没有意义的, 因此凸优化问题(11)存在最优解时, $\text{rank}(\mathbf{W})=1$ 是成立的, 定理 2 得证。

(编辑 刘杨)

(上接第 86 页)

SONG Youlian. Calculation method of valve pressure drop of proportional valve and valve diameter selection [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2007, 35(5): 50-53.

[8] 韩伟. 大流量换向阀的设计与流体动力学仿真 [J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 420-424.

HAN Wei. Design and hydrodynamic simulation of large flow directional valve [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(3): 420-424.

[9] 杨忠炯, 包捷, 周立强. 随机振动下电磁换向阀的动态特性研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 13-17.

YANG Zhongjiong, BAO Jie, ZHOU Liqiang. Study on dynamic characteristics of electromagnetic directional valve under random vibration [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(6): 13-17.

[10] 胥景, 杨忠炯, 周立强, 等. TBM 掘进机电磁换向阀动态特性仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32(1): 248-253.

XU Jing, YANG Zhongjiong, ZHOU Liqiang, et al. Study on dynamic characteristics of TBM electromagnetic directional valve [J]. Computer Simulation, 2015, 32(1): 248-253.

[11] 叶奇昉, 严诗杰, 陈江平, 等. 气动先导式电磁阀的自激振动 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(1): 115-121.

YE Qifang, YAN Shijie, CHEN Jiangping, et al. Self-excited vibration of pneumatic pilot-operated solenoid valve [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(1): 115-121.

[12] VARDY A E, BROWN J M B. Transient turbulent friction in smooth pipe flows [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 259(5): 1011-1036.

[13] ZHAO Ming, GHIDAOU M S. Efficient quasi-two-dimensional model for water hammer problems [J]. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 129: 1007-1013.

(编辑 苗凌)