

异构携能通信网络中基于人工噪声辅助的鲁棒安全传输方案

张波 黄开枝*

(国家数字交换系统工程技术研究中心 郑州 450002)

摘要: 异构携能通信网络中信道状态信息不准确时, 为保证信息、能量传输的安全性与可靠性, 该文提出一种基于人工噪声辅助的鲁棒安全传输方案。通过联合设计宏基站、微基站的下行信息波束及人工噪声矩阵, 干扰窃听器, 同时提升系统能量接收性能。在基站的发送功率约束、合法用户的信息接收及能量接收中断约束和窃听者的窃听信息中断约束下, 以最大化系统能量接收性能为目标进行建模。针对该问题的非凸性, 首先将其等效转化为一种易于处理的形式; 而后进一步利用Bernstein-type不等式处理其中的中断概率约束, 将其转化为凸的问题进行求解。仿真结果验证了该方案的安全性和鲁棒性。

关键词: 异构网络; 无线携能通信; 物理层安全; 非理想信道状态信息; 凸优化

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0001-08

DOI: 10.11999/JEIT180269

Robust Secure Transmission Scheme Based on Artificial Noise-aided for Heterogeneous Networks with Simultaneous Wireless Information and Power Transfer

ZHANG Bo HUANG Kaizhi

(National Digital Switching System Engineering & Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: When the Channel State Information (CSI) is not accurate in heterogeneous networks with simultaneous wireless information and power transfer, to guarantee the security and reliability of information and energy transfer simultaneously, a robust secure transmission scheme based on Artificial Noise (AN)-aided is proposed. Through jointly designing the downlink information beamforming and AN matrix of macrocell base station and femtocell base stations, the potential eavesdroppers will be jammed, and the energy harvesting performance of system can be improved. To obtain the optimal designs, the problem of maximizing the energy harvesting performance of system is modeled under the base station power limit and the outage probability limits of information transfer, energy transfer and confidential information eavesdropped. This modeled problem is non-convex. To address the problem, it is transformed into an equivalent form, which can be processed easily. Then, the Bernstein-type inequality is utilized to deal with the outage probability limits, and it is transformed into a convex problem. Simulation results validate the security and the robustness of the proposed scheme.

Key words: Heterogeneous network; Simultaneous Wireless Information and Power Transfer (SWIPT); Physical layer security; Imperfect Channel State Information (CSI); Convex optimization

1 引言

在异构网络中, 通过在宏基站(Macrocell Base Station, MBS)覆盖范围内重叠部署小基站可以提升网络容量及频谱利用率, 但同时也带来了各层网络间的互相干扰问题^[1]。就传统通信而言, 这些干

扰百无一用。但随着无线携能通信技术的发展, 有学者提出可将此类干扰作为无线携能通信的一种特殊能量来源^[2,3]。与传统网络相比, 这种异构携能通信网络具有更加开放的网络架构和多样化的节点类型, 导致窃听器(Eavesdropper, Eve)更易接入到网络中, 对信息进行窃听。作为对传统加密算法的补充, 物理层安全技术^[4,5]利用无线信道的物理层特性探索解决通信安全问题, 近年来越来越受到业界的广泛关注。

文献^[6-8]基于完整信道状态信息(Channel State Information, CSI)对携能通信网络中的物理

收稿日期: 2018-03-21; 改回日期: 2018-08-13; 网络出版: 2018-09-04

*通信作者: 黄开枝 zb100403@126.com.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701538, 61601514, 61501516)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701538, 61601514, 61501516)

层安全进行了研究。但在实际网络中,受时延误差等因素的影响,发送端很难获取接收端的完整CSI。针对CSI不完整情形,业界一般用确定误差和随机误差两类模型来描述CSI误差,并相应发展出基于最坏情况性能优化安全设计和基于概率约束的统计性安全设计方法。考虑Eves的CSI存在确定性误差,为最大化系统安全速率,文献[9]对MBS和微基站(Femtocell Base Stations, FBSs)的信息波束、能量波束及人工噪声的联合设计问题进行了研究,结合半定松弛技术(SemiDefinite Relaxation, SDR)和递归估计近似(Successive Convex Approximation, SCA)获取原始问题的解。考虑合法用户的CSI也存在确定误差时,文献[10]对异构携能通信网络中信息波束及人工噪声的联合设计问题做了进一步探讨。需要指出的是,上述基于最坏情况性能优化的安全方法均假设CSI误差是范数有界的,但这可能不符合实际,且过于保守,因为最坏CSI误差情形发生的概率可能很低。

相反地,考虑随机CSI误差,并基于概率约束的设计思想,只保证那些发生概率充分大的CSI误差时的安全性能更加贴近实际网络。基于此,文献[11–13]对单层MISO携能通信网络中的鲁棒安全传输方案进行了探讨。将能量接收用户(Energy Receivers, ERs)视为潜在的Eves,在信息接收用户(Information Receivers, IRs)和ERs的CSI存在随机误差时,文献[11]基于能量接收和安全中断概率约束对发送功率最小化的问题进行了研究,并提出一种低复杂度的基于迭代的2阶锥求解算法。从另一角度,文献[12]基于IRs, ERs的信息接收及能量接收中断概率约束,对最小化发送功率目标下的信息波束和人工噪声的联合设计问题进行了探讨。为最大化系统能量接收性能,文献[13]对IRs, ERs的中断概率约束下的下行信息波束设计问题进行了探究,并利用Bernstein-type不等式将中断约束条件转化为线性矩阵不等式进行求解。与文献[11–13]不同,考虑MIMO携能通信网络中存在随机误差时,为最大化系统能量接收性能,文献[14]研究了目标接收端的预编码矩阵和功率分离系数的联合设计问题。综上分析可知,现有相关研究仅考虑了单层携能通信网络或包含少数通信节点场景,其无法直接适用于异构携能网络节点数目众多、层间干扰复杂的场景。而且,上述文献并未考虑多个Eves之间相互勾结的情形,此时系统安全性将受到更大威胁。

针对上述问题,本文提出一种基于人工噪声辅助的鲁棒安全传输方案。通过在MBS和FBS下行信号中同时注入人工噪声,而后联合优化设计MBS,

FBS的信息波束和人工噪声协方差矩阵。在CSI随机误差下及基站发送功率约束, IRs, ERs的信息传输、能量接收中断约束和Eves的信息窃听中断约束,以最大化系统能量接收性能为目标,对该问题进行建模。建模后问题是非凸的。为求解该问题,首先通过将原始问题等效转化为一种易于处理的形式;而后,进一步利用Bernstein-type不等式对其中的中断约束进行处理,将其转化为一个凸的优化问题,并结合2次等式引理获取秩为1的信息波束成形解。仿真结果验证了该方案的安全性和鲁棒性。

2 系统模型及问题形成

如图1所示, MBS位于宏小区的中心位置, MBS覆盖范围内分布着 N 个FBSs。MBS和每个FBS分别向 M 个宏基站用户(Macrocell User, MU), K 个微基站用户(Femtocell User, FU)传输下行信息。同时,在FBSs覆盖范围内存在 B 个ERs,其可以从FBSs的信号及层间干扰信号中接收能量[10]。然而, ERs可能会对MU的下行信息进行窃听。此时, ERs可视为潜在的Eves[9,10]。假设MBS装备 $N_M > M$ 根天线,总发送功率为 P_M ;每个FBS装备 $N_F > K$ 根天线,发送功率为 P_F ;其余设备装备单天线。为便于分析,下文中分别用 FBS_n , MU_m , FU_{nk} 和 E_b 表示第 n 个FBS,第 m 个MU, FBS_n 的第 k 个FU及第 b 个ER。

假设 MU_1 的下行信息遭受窃听[9],则 MU_m , FU_{nk} 及 E_b 的接收信号分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_m = & \mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_m \mathbf{s}_m + \mathbf{h}_m^H \left(\sum_{p \neq m}^M \mathbf{w}_p \mathbf{s}_p + \mathbf{z}_0 \right) \\ & + \sum_{n=1}^N \mathbf{h}_{n,m}^H \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{nk} \mathbf{s}_{nk} + \mathbf{z}_n \right) + n_m, \\ & m \in [1, M] \end{aligned} \quad (1)$$

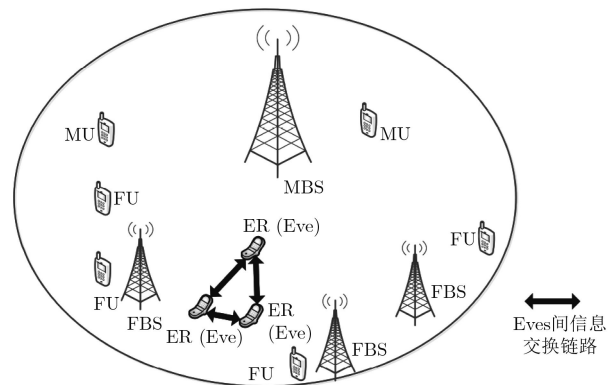


图1 系统模型

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{nk} &= \mathbf{h}_{n,nk}^H \mathbf{w}_{nk} \mathbf{s}_{nk} + \mathbf{h}_{n,nk}^H \left(\sum_{t \neq k}^K \mathbf{w}_{nt} \mathbf{s}_{nt} + \mathbf{z}_n \right) \\ &+ \sum_{a \neq n}^N \mathbf{h}_{a,nk}^H \left(\sum_{t=1}^K \mathbf{w}_{at} \mathbf{s}_{at} + \mathbf{z}_a \right) \\ &+ \mathbf{h}_{nk}^H \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{w}_m \mathbf{s}_m + \mathbf{z}_0 \right) + n_{nk} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{Eb} &= \mathbf{h}_{Eb}^H \mathbf{w}_1 \mathbf{s}_1 + \mathbf{h}_{Eb}^H \left(\sum_{m=2}^M \mathbf{w}_m \mathbf{s}_m + \mathbf{z}_0 \right) \\ &+ \sum_{n=1}^N \mathbf{h}_{n,Eb}^H \left(\sum_{k=1}^K \mathbf{w}_{nk} \mathbf{s}_{nk} + \mathbf{z}_n \right) + n_{Eb}, \\ b &\in [1, B] \end{aligned} \quad (3)$$

其中，式(2)中 $n \in [1, N]$, $k \in [1, K]$; $\mathbf{h}_m \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$, $\mathbf{h}_{n,m} \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$, $\mathbf{h}_{l,nk} \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$ ($l = n, a$), $\mathbf{h}_{nk} \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$, $\mathbf{h}_{Eb} \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$, $\mathbf{h}_{n,Eb} \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$ 分别为MBS和FBS $_n$ 至MU $_m$, FBS $_l$ 至FU $_{nk}$, MBS至FU $_{nk}$, MBS和FBS $_n$ 至E $_b$ 的信道矢量。 $\mathbf{w}_f \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$ ($f = m, p$), $\mathbf{w}_{nj} \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$ ($j = k, t$) 分别为MBS至MU $_f$, FBS $_n$ 至FU $_{nj}$ 的信息波束成形矢量。 \mathbf{s}_i ($i = m, p$), \mathbf{s}_{nj} ($j = k, t$) 分别为MBS至MU $_i$, FBS $_n$ 至FU $_{nj}$ 的信息符号, 且 $E\{|\mathbf{s}_i|^2\} = E\{|\mathbf{s}_{nj}|^2\} = 1$ 。 $\mathbf{z}_0 \in \mathbb{C}^{N_M \times 1}$, $\mathbf{z}_n \in \mathbb{C}^{N_F \times 1}$ 分别为MBS和FBS $_n$ 的人工噪声矢量, $\mathbf{z}_0 \sim CN(0, \mathbf{Z}_0)$, $\mathbf{z}_n \sim CN(0, \mathbf{Z}_n)$, \mathbf{Z}_0 和 \mathbf{Z}_n 分别为相应的人工噪声协方差矩阵。 n_m, n_{nk}, n_{Eb} 分别为MU $_m$, FU $_{nk}$, E $_b$ 处的热噪声, 假设所有的热噪声均服从 $CN(0, \sigma^2)$ 。结合式(1)和式(2), 可知MU $_m$, FU $_{nk}$ 的接收信干噪比(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)为

$$\begin{aligned} \text{SINR}_m &= |\mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_m|^2 / \left(\sum_{p \neq m}^M |\mathbf{h}_m^H \mathbf{w}_p|^2 + |\mathbf{h}_m^H \mathbf{z}_0|^2 \right. \\ &\left. + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K |\mathbf{h}_{n,m}^H \mathbf{w}_{nk}|^2 + \sum_{n=1}^N |\mathbf{h}_{n,m}^H \mathbf{z}_n|^2 + \sigma^2 \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{SINR}_{nk} = \frac{|\mathbf{h}_{n,nk}^H \mathbf{w}_{nk}|^2}{A_{nk}} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} A_{nk} &= \sum_{t \neq k}^K |\mathbf{h}_{n,nk}^H \mathbf{w}_{nt}|^2 + |\mathbf{h}_{n,nk}^H \mathbf{z}_n|^2 + \sum_{a \neq n}^N \sum_{t=1}^K |\mathbf{h}_{a,nk}^H \mathbf{w}_{at}|^2 \\ &+ \sum_{a \neq n}^N (|\mathbf{h}_{a,nk}^H \mathbf{z}_a|^2) + \sum_{m=1}^M (|\mathbf{h}_{nk}^H \mathbf{w}_m|^2 + |\mathbf{h}_{nk}^H \mathbf{z}_0|^2 + \sigma^2) \end{aligned}$$

考虑Eves相互勾结的情形, 此时可将其看作一个多天线Eve E $_B$, 则其SINR为

$$\begin{aligned} \text{SINR}_{EB} &= \sum_{b=1}^B |\mathbf{h}_{Eb}^H \mathbf{w}_1|^2 / \left(\xi \left(\sum_{b=1}^B \left(\sum_{m=2}^M |\mathbf{h}_{Eb}^H \mathbf{w}_m|^2 \right. \right. \right. \\ &\left. \left. \left. + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K |\mathbf{h}_{n,Eb}^H \mathbf{w}_{nk}|^2 \right) \right) + \sum_{b=1}^B (|\mathbf{h}_{Eb}^H \mathbf{z}_0|^2 \right. \\ &\left. + \sum_{n=1}^N |\mathbf{h}_{n,Eb}^H \mathbf{z}_n|^2) + \sigma^2 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $\xi \in [0, 1]$ 为干扰消除系数。同时, E $_b$ 接收的能量可表示为

$$\begin{aligned} E_{\text{harvest}}(b) &= \kappa \left(\sum_{m=1}^M |\mathbf{h}_{Eb}^H \mathbf{w}_m|^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K |\mathbf{h}_{n,Eb}^H \mathbf{w}_{nk}|^2 \right. \\ &\left. + \sum_{n=1}^N |\mathbf{h}_{n,Eb}^H \mathbf{z}_n|^2 \right) \end{aligned} \quad (7)$$

其中, $\kappa \in [0, 1]$ 为接收能量转换系数。结合式(7), 可知系统能量接收性能为 $\min_{b \in [1, B]} (E_{\text{harvest}}(b))$ 。

本文考虑CSI存在随机误差的情形, 则式(1)–式(3)中的信道矢量可表示为^[11–14]

$$\mathbf{h} = \hat{\mathbf{h}} + \mathbf{e}, \quad \mathbf{e} = \mathbf{Q}^{1/2} \mathbf{r}, \quad \mathbf{r} \sim CN(0, \mathbf{I}) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{h}, \hat{\mathbf{h}}, \mathbf{e}, \mathbf{Q}$ 形式分别表示实际、估计信道矢量及信道误差矢量和信道误差矢量的协方差矩阵, \mathbf{r} 为 \mathbf{Q} 的相应列向量。本文目标是在基站的总发送功率约束及合法用户、Eves的信息接收、能量接收及信息窃听中断约束下, 联合设计MBS, FBSs的下行波束成形矢量及人工噪声协方差矩阵, 最大化系统能量接收性能。令 $\mathbf{W}_m = \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^H$, $\mathbf{W}_{nk} = \mathbf{w}_{nk} \mathbf{w}_{nk}^H$, 则该问题可表述为

$$\max_{\{\mathbf{W}_m\}, \{\mathbf{Z}_0\}, \{\mathbf{Z}_n\}} \min_{b \in [1, B]} (E_{\text{harvest}}(b)) \quad (9a)$$

s.t.

$$\Pr\{\text{SINR}_m \leq \gamma_m\} \leq \rho_m, \quad m \in [1, M] \quad (9b)$$

$$\Pr\{\text{SINR}_{nk} \leq \gamma_{nk}\} \leq \rho_{nk}, \quad n \in [1, N], k \in [1, K] \quad (9c)$$

$$\Pr\{\text{SINR}_{EB} \geq \gamma_{EB}\} \leq \rho_{EB} \quad (9d)$$

$$\sum_{m=1}^M \text{Trace}(\mathbf{W}_m) + \text{Trace}(\mathbf{Z}_0) \leq P_M \quad (9e)$$

$$\sum_{k=1}^K \text{Trace}(\mathbf{W}_{nk}) + \text{Trace}(\mathbf{Z}_n) \leq P_F, \quad n \in [1, N] \quad (9f)$$

$$\text{rank}(\mathbf{W}_m) = \text{rank}(\mathbf{W}_{nk}) = 1 \quad (9g)$$

其中, $\gamma_m, \gamma_{nk}, \gamma_{EB}$ 分别为MU $_m$, FU $_{nk}$, E $_B$ 的SINR门限值, $\rho_m \in (0, 1]$, $\rho_{nk} \in (0, 1]$, $\rho_{EB} \in (0, 1]$ 分别为相应的中断概率门限值。式(9)问题是非凸的, 无法直接进行求解。

3 基于人工噪声辅助的鲁棒安全传输设计

本节将分两部分处理式(9)问题：首先对式(9)问题进行等效变换，获取其一种等价形式；而后利用Bernstein-type不等式对其中的中断概率约束条件进行处理。

3.1 问题等效变换

引入辅助变量 t ，由ERs信道之间相互独立性，将式(9)问题等效变换为式(10)：

$$\max_{\substack{\{\mathbf{W}_m\}, \mathbf{Z}_0 \\ \{\mathbf{W}_{nk}\}, \{\mathbf{Z}_n\}, t}} t \quad (10a)$$

$$\text{s.t. 式(9b) - 式(9g)} \quad (10b)$$

$$\Pr\{\mathbf{E}_{\text{harvest}}(b) \leq t\} \leq q_{\text{Eb}}, b \in [1, B] \quad (10c)$$

其中， $q_{\text{Eb}} \in (0, 1]$ 为 E_b 的能量接收中断概率门限值。首先对式(9b)进行处理。为便于分析，定义 $\mathbf{h}_{Mm} = \hat{\mathbf{h}}_{Mm} + \mathbf{e}_{Mm}$ ， $\hat{\mathbf{h}}_{Mm} = [(\hat{\mathbf{h}}_m)^{\text{H}}, (\hat{\mathbf{h}}_{1,m})^{\text{H}}, \dots, (\hat{\mathbf{h}}_{N,m})^{\text{H}}]^{\text{H}}$ ， $\mathbf{e}_{Mm} = [(\mathbf{e}_m)^{\text{H}}, (\mathbf{e}_{1,m})^{\text{H}}, \dots, (\mathbf{e}_{N,m})^{\text{H}}]^{\text{H}}$ 及

$$\mathbf{A}_{Mm} = \text{diag} \left(\left(\mathbf{W}_m - \gamma_m \sum_{p \neq m} (\mathbf{W}_p + \mathbf{Z}_0) \right), \right. \\ \left. -\gamma_m ((\mathbf{W}_{1k} + \mathbf{Z}_1), \dots, (\mathbf{W}_{Nk} + \mathbf{Z}_N)) \right) \quad (11)$$

其中， $\text{diag}(A, B) = \begin{bmatrix} A & 0_{N \times M} \\ 0_{M \times N} & B \end{bmatrix}$ ， $A \in C^{N \times N}$ ， $B \in C^{M \times M}$ 。由式(8)，进一步得出 $\mathbf{e}_{Mm} = \mathbf{Q}_{Mm} \mathbf{r}_{Mm}$ ， $\mathbf{Q}_{Mm} = \text{diag}(\mathbf{Q}_{m,1}^{1/2}, \mathbf{Q}_{m,2}^{1/2}, \dots, \mathbf{Q}_{m,N}^{1/2})$ 及 $\mathbf{r}_{Mm} = [(\mathbf{r}_m)^{\text{H}}, (\mathbf{r}_{1,m})^{\text{H}}, \dots, (\mathbf{r}_{N,m})^{\text{H}}]^{\text{H}}$ 。由信道之间独立性及 $\mathbf{r}_m \sim CN(0, \mathbf{I}_{N_m})$ ， $\mathbf{r}_{n,m} \sim CN(0, \mathbf{I}_{N_f})$ ，可知 $\mathbf{r}_{Mm} \sim CN(0, \mathbf{I}_{(N_m + N \times N_f)})$ 。则式(9b)等效转化为

$$\Pr\{\mathbf{r}_{Mm}^{\text{H}} \mathbf{B}_{Mm} \mathbf{r}_{Mm} + 2 \text{Re}\{\mathbf{r}_{Mm}^{\text{H}} \mathbf{c}_{Mm}\} \leq d_{Mm}\} \leq \rho_m, \\ m \in [1, M] \quad (12)$$

其中， $\mathbf{B}_{Mm} = \mathbf{Q}_{Mm} \mathbf{A}_{Mm} \mathbf{Q}_{Mm}$ ， $\mathbf{c}_{Mm} = \mathbf{Q}_{Mm} \mathbf{A}_{Mm} \hat{\mathbf{h}}_{Mm}$ ， $d_{Mm} = \gamma_m \cdot \sigma^2 - \hat{\mathbf{h}}_{Mm}^{\text{H}} \mathbf{A}_{Mm} \hat{\mathbf{h}}_{Mm}$ 。类似地，分别对

$$\mathbf{Q}_{\text{EEB}} = \text{diag} \left(\underbrace{\mathbf{Q}_{E1}^{1/2}, \dots, \mathbf{Q}_{EB}^{1/2}}_{\text{共}B\text{项}}, \underbrace{\mathbf{Q}_{1,E1}^{1/2}, \dots, \mathbf{Q}_{N,E1}^{1/2}}_{\text{共}N\text{项}}, \underbrace{\mathbf{Q}_{1,E2}^{1/2}, \dots, \mathbf{Q}_{N,E2}^{1/2}}_{\text{共}N\text{项}}, \dots, \underbrace{\mathbf{Q}_{N,EB}^{1/2}}_{(B-2)\text{个}N\text{项}} \right) \\ \mathbf{A}_{\text{EEB}} = \text{diag} \left(\underbrace{\left(\mathbf{W}_1 - \gamma_{\text{EB}} \left(\xi \cdot \sum_{m=2}^M \mathbf{W}_m + \mathbf{Z}_0 \right) \right)}_{\text{表示为a}}, \dots, \underbrace{\left(-\gamma_{\text{EB}} (\xi \mathbf{W}_{1k} + \mathbf{Z}_1), \dots, -\gamma_{\text{EB}} (\xi \mathbf{W}_{Nk} + \mathbf{Z}_N) \right)}_{\text{表示为b}} \right) \\ \hat{\mathbf{h}}_{\text{EEB}} = \left[\underbrace{(\hat{\mathbf{h}}_{E1})^{\text{H}}, \dots, (\hat{\mathbf{h}}_{EB})^{\text{H}}}_{\text{共}B\text{项}}, \underbrace{(\hat{\mathbf{h}}_{1,E1})^{\text{H}}, \dots, (\hat{\mathbf{h}}_{N,E1})^{\text{H}}}_{\text{共}N\text{项}}, \underbrace{(\hat{\mathbf{h}}_{1,E2})^{\text{H}}, \dots, (\hat{\mathbf{h}}_{N,E2})^{\text{H}}}_{\text{共}N\text{项}}, \dots, \underbrace{(\hat{\mathbf{h}}_{N,EB})^{\text{H}}}_{(B-2)\text{个}N\text{项}} \right]^{\text{H}} \quad (17)$$

式(9c)，式(9d)，式(11c)进行处理，可以将其等效转化为式(13)–式(15)

$$\Pr\{\mathbf{r}_{Fuk}^{\text{H}} \mathbf{B}_{Fuk} \mathbf{r}_{Fuk} + 2 \text{Re}\{\mathbf{r}_{Fuk}^{\text{H}} \mathbf{c}_{Fuk}\} \leq d_{Fuk}\} \leq \rho_{nk}, \\ n \in [1, M], k \in [1, K] \quad (13)$$

$$\Pr\{\mathbf{r}_{\text{EEB}}^{\text{H}} \mathbf{B}_{\text{EEB}} \mathbf{r}_{\text{EEB}} + \text{Re}\{\mathbf{r}_{\text{EEB}}^{\text{H}} \mathbf{c}_{\text{EB}}\} \geq d_{\text{EEB}}\} \\ \leq \rho_{\text{EB}} \quad (14)$$

$$\Pr\{\mathbf{r}_{\text{CEB}}^{\text{H}} \mathbf{B}_{\text{CEB}} \mathbf{r}_{\text{CEB}} + 2 \text{Re}\{\mathbf{r}_{\text{CEB}}^{\text{H}} \mathbf{c}_{\text{CEB}}\} \\ \leq d_{\text{CEB}}\} \leq q_{\text{Eb}}, b \in [1, B] \quad (15)$$

其中，式(13)中 $\mathbf{r}_{Fuk} = [(\mathbf{r}_{n,nk})^{\text{H}}, (\mathbf{r}_{nk})^{\text{H}}, \dots, (\mathbf{r}_{n-1,nk})^{\text{H}}, (\mathbf{r}_{n+1,nk})^{\text{H}}, \dots]^{\text{H}}$ ， $\mathbf{B}_{Fuk} = \mathbf{Q}_{Fuk} \mathbf{A}_{Fuk} \mathbf{Q}_{Fuk}$ ， $\mathbf{c}_{Fuk} = \mathbf{Q}_{Fuk} \cdot \mathbf{A}_{Fuk} \hat{\mathbf{h}}_{Fuk}$ ， $d_{Fuk} = \gamma_{nk} \cdot \sigma^2 - \hat{\mathbf{h}}_{Fuk}^{\text{H}} \mathbf{A}_{Fuk} \hat{\mathbf{h}}_{Fuk}$ 及

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_{Fuk} &= \text{diag} \left(\mathbf{W}_{nk} - \gamma_{nk} \left(\sum_{t=1, t \neq k}^K \mathbf{W}_{nt} + \mathbf{Z}_n \right) \right), \\ &\left(-\gamma_{nk} \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m + \mathbf{Z}_0 \right) \right), \\ &-\gamma_{nk} (\dots, (\mathbf{W}_{(n+1)t} + \mathbf{Z}_{n+1}), \dots) \\ \mathbf{Q}_{Fuk} &= \text{diag} \left(\mathbf{Q}_{n,nk}^{1/2}, \mathbf{Q}_{nk}^{1/2}, \dots, \mathbf{Q}_{n-1,nk}^{1/2}, \right. \\ &\left. \mathbf{Q}_{n+1,nk}^{1/2}, \dots \right) \\ \hat{\mathbf{h}}_{Fuk} &= \left[(\hat{\mathbf{h}}_{n,nk})^{\text{H}}, (\hat{\mathbf{h}}_{nk})^{\text{H}}, \dots, (\hat{\mathbf{h}}_{n-1,nk})^{\text{H}}, \right. \\ &\left. (\hat{\mathbf{h}}_{n+1,nk})^{\text{H}}, \dots \right]^{\text{H}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(14)中，

$$\mathbf{r}_{\text{EEB}} = \left[\underbrace{(\mathbf{r}_{E1})^{\text{H}}, \dots, (\mathbf{r}_{EB})^{\text{H}}}_{\text{共}B\text{项}}, \underbrace{(\mathbf{r}_{1,E1})^{\text{H}}, \dots, (\mathbf{r}_{N,E1})^{\text{H}}}_{\text{共}N\text{项}}, \right. \\ \left. \underbrace{(\mathbf{r}_{1,E2})^{\text{H}}, \dots, (\mathbf{r}_{N,E2})^{\text{H}}}_{\text{共}N\text{项}}, \dots, \underbrace{(\mathbf{r}_{N,EB})^{\text{H}}}_{(B-2)\text{个}N\text{项}} \right]^{\text{H}},$$

$$\mathbf{B}_{\text{EEB}} = \mathbf{Q}_{\text{EEB}} \mathbf{A}_{\text{EEB}} \mathbf{Q}_{\text{EEB}}, \mathbf{c}_{\text{EEB}} = \mathbf{Q}_{\text{EEB}} \mathbf{A}_{\text{EEB}} \hat{\mathbf{h}}_{\text{EEB}}, \\ d_{\text{EEB}} = \gamma_{\text{EB}} \cdot \sigma^2 - \hat{\mathbf{h}}_{\text{EEB}}^{\text{H}} \mathbf{A}_{\text{EEB}} \hat{\mathbf{h}}_{\text{EEB}} \text{ 及}$$

式(15)中, $\mathbf{r}_{\text{CEb}} = [(\mathbf{r}_{\text{Eb}})^{\text{H}}, (\mathbf{r}_{1,\text{Eb}})^{\text{H}}, \dots, (\mathbf{r}_{N,\text{Eb}})^{\text{H}}]^{\text{H}}$, $\mathbf{B}_{\text{CEb}} = \mathbf{Q}_{\text{CEb}} \mathbf{A}_{\text{CEb}} \mathbf{Q}_{\text{CEb}}$, $\mathbf{c}_{\text{CEb}} = \mathbf{Q}_{\text{CEb}} \mathbf{A}_{\text{CEb}} \hat{\mathbf{h}}_{\text{CEb}}$, $d_{\text{CEb}} = (t/\kappa) \cdot \sigma^2 - \hat{\mathbf{h}}_{\text{CEb}}^{\text{H}} \mathbf{A}_{\text{CEb}} \hat{\mathbf{h}}_{\text{CEb}}$ 及

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Q}_{\text{CEb}} &= \text{diag} \left(\mathbf{Q}_{\text{Eb}}^{1/2}, \mathbf{Q}_{1,\text{Eb}}^{1/2}, \dots, \mathbf{Q}_{N,\text{Eb}}^{1/2} \right) \\ \mathbf{A}_{\text{CEb}} &= \text{diag} \left(\sum_{m=1}^M \mathbf{W}_m, (\mathbf{W}_{1k} + \mathbf{Z}_1) \dots \right. \\ &\quad \left. (\mathbf{W}_{Nk} + \mathbf{Z}_N) \right) \\ \hat{\mathbf{h}}_{\text{CEb}} &= \left[(\hat{\mathbf{h}}_{\text{Eb}})^{\text{H}}, (\hat{\mathbf{h}}_{1,\text{Eb}})^{\text{H}}, \dots, (\hat{\mathbf{h}}_{N,\text{Eb}})^{\text{H}} \right]^{\text{H}} \end{aligned} \right\} (18)$$

其中, $\mathbf{r}_{Fnk} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I}_{(N_M+N \times N_F)})$, $\mathbf{r}_{\text{EEB}} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I}_{B \cdot (N_M+N \times N_F)})$; $\mathbf{r}_{\text{CEb}} \sim \text{CN}(0, \mathbf{I}_{(N_M+N \times N_F)})$ 。

3.2 基于Bernstein-type不等式的保守约束

借助于Bernstein-type不等式^[14], 分别对式(12)–式(15)进行处理, 可将其转化为

$$\left. \begin{aligned} \text{Trace}(\mathbf{B}_{Mm}) - u_{Mm} \sqrt{2\lambda_{Mm}} - \lambda_{Mm} v_{Mm} &\geq d_{Mm} \\ \left\| \begin{array}{c} \text{vec}(\mathbf{B}_{Mm}) \\ \sqrt{2} \mathbf{c}_{Mm} \end{array} \right\| &\leq u_{Mm} \\ v_{Mm} \mathbf{I}_{N_M+N \times N_F} + \mathbf{B}_{Mm} &\geq 0 \end{aligned} \right\} (19)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Trace}(\mathbf{B}_{Fnk}) - u_{Fnk} \sqrt{2\lambda_{Fnk}} - \lambda_{Fnk} v_{Fnk} &\geq d_{Fnk} \\ \left\| \begin{array}{c} \text{vec}(\mathbf{B}_{Fnk}) \\ \sqrt{2} \mathbf{c}_{Fnk} \end{array} \right\| &\leq u_{Fnk} \\ v_{Fnk} \mathbf{I}_{N_M+N \times N_F} + \mathbf{B}_{Fnk} &\geq 0 \end{aligned} \right\} (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Trace}(\mathbf{B}_{\text{EEB}}) + u_{\text{EEB}} \sqrt{2\lambda_{\text{EEB}}} + \lambda_{\text{EEB}} v_{\text{EEB}} &\leq d_{\text{EEB}} \\ \left\| \begin{array}{c} \text{vec}(\mathbf{B}_{\text{EEB}}) \\ \sqrt{2} \mathbf{c}_{\text{EEB}} \end{array} \right\| &\leq u_{\text{EEB}} \\ v_{\text{EEB}} \mathbf{I}_{B \cdot (N_M+N \times N_F)} - \mathbf{B}_{\text{EEB}} &\geq 0 \end{aligned} \right\} (21)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{Trace}(\mathbf{B}_{\text{CEb}}) - u_{\text{CEb}} \sqrt{2\lambda_{\text{CEb}}} - \lambda_{\text{CEb}} v_{\text{CEb}} &\geq d_{\text{CEb}} \\ \left\| \begin{array}{c} \text{vec}(\mathbf{B}_{\text{CEb}}) \\ \sqrt{2} \mathbf{c}_{\text{CEb}} \end{array} \right\| &\leq u_{\text{CEb}} \\ v_{\text{CEb}} \mathbf{I}_{N \times N_F} + \mathbf{B}_{\text{CEb}} &\geq 0 \end{aligned} \right\} (22)$$

其中, $\lambda_{Mm} = -\ln(\rho_m)$, $\lambda_{Fnk} = -\ln(\rho_{nk})$, $\lambda_{\text{EEB}} = -\ln(\rho_{\text{EB}})$, $\lambda_{\text{CEb}} = -\ln(q_{\text{Eb}})$ 。 u_{Mm} , $v_{Mm} \geq 0$, u_{Fnk} , $v_{Fnk} \geq 0$, $v_{\text{EEB}} \geq 0$, u_{CEb} , $v_{\text{CEb}} \geq 0$ 为引入的松弛变量。此时, 式(19)–式(22)均为凸约束条件。为处理式(9g), 重新将式(9g)表述为式(23)所示的2次等式限制形式。

$$\mathbf{W}_m = \mathbf{w}_m \mathbf{w}_m^{\text{H}}, \mathbf{W}_{nk} = \mathbf{w}_{nk} \mathbf{w}_{nk}^{\text{H}} \quad (23)$$

可借助2次等式引理^[15]对其进行处理, 则此时式

(9)问题可转化为

$$\max_{\{\mathbf{W}_m\}, \{\mathbf{w}_m\}, \mathbf{Z}_0, \{\mathbf{W}_{nk}\}, \{\mathbf{w}_{nk}\}, \{\mathbf{Z}_n\}, t} t \quad (24a)$$

$$\text{s.t. 式(19), 式(20), 式(21), 式(22), 式(9e), 式(9f)} \quad (24b)$$

$$\left. \begin{aligned} \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{BS1}m} & \mathbf{W}_m & \mathbf{w}_m \\ \mathbf{W}_m^{\text{H}} & \mathbf{A}_{\text{BS2}m} & \mathbf{w}_m \\ \mathbf{w}_m^{\text{H}} & \mathbf{w}_m^{\text{H}} & 1 \end{bmatrix} \right\| &\geq 0 \\ \text{Trace} \left(\tilde{\mathbf{w}}_m(j) \tilde{\mathbf{w}}_m(j)^{\text{H}} \right) &+ 2\text{Re} \left\{ \text{Trace} \left(\mathbf{w}_m - \tilde{\mathbf{w}}_m(j) \right) \tilde{\mathbf{w}}_m(j)^{\text{H}} \right\} \\ &\geq \text{Trace}(\mathbf{A}_{\text{BS1}m}) \end{aligned} \right\} (24c)$$

$$\left. \begin{aligned} \left\| \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\text{BS1}nk} & \mathbf{W}_{nk} & \mathbf{w}_{nk} \\ \mathbf{W}_{nk}^{\text{H}} & \mathbf{A}_{\text{BS2}nk} & \mathbf{w}_{nk} \\ \mathbf{w}_{nk}^{\text{H}} & \mathbf{w}_{nk}^{\text{H}} & 1 \end{bmatrix} \right\| &\geq 0 \\ \text{Trace} \left(\tilde{\mathbf{w}}_{nk}(j) \tilde{\mathbf{w}}_{nk}(j)^{\text{H}} \right) &+ 2\text{Re} \left\{ \text{Trace} \left(\mathbf{w}_{nk} - \tilde{\mathbf{w}}_{nk}(j) \right) \tilde{\mathbf{w}}_{nk}(j)^{\text{H}} \right\} \\ &\geq \text{Trace}(\mathbf{A}_{\text{BS1}nk}) \end{aligned} \right\} (24d)$$

式(24)问题是一个凸的优化问题。其中, $\mathbf{A}_{\text{BS1}m} \in \mathcal{C}^{N_M \times N_M}$, $\mathbf{A}_{\text{BS2}m} \in \mathcal{C}^{N_M \times N_M}$, $\mathbf{A}_{\text{BS2}nk} \in \mathcal{C}^{N_F \times N_F}$ 为引入的相应松弛矩阵, $\tilde{\mathbf{w}}_m(j)$, $\tilde{\mathbf{w}}_{nk}(j)$ 为利用1阶泰勒近似时第 j 次迭代时的变量, 初始值 $\tilde{\mathbf{w}}_m(0)$, $\tilde{\mathbf{w}}_{nk}(0)$ 可以随机生成直至满足式(24)问题的约束条件。

3.3 算法描述

本小节总结该方案的整体算法, 具体过程如表1所示。

表1 基于人工噪声辅助的鲁棒安全传输算法

初始化: 设置 $j=0$, 最大迭代次数 g , 并随机生成可以满足式(24)问题可行解约束的 $\tilde{\mathbf{w}}_m(j)$, $\tilde{\mathbf{w}}_{nk}(j)$;

循环:

步骤1 将 $\tilde{\mathbf{w}}_m(j)$, $\tilde{\mathbf{w}}_{nk}(j)$ 代入式(24)问题中求解, 获得相应的解 \mathbf{w}_m^* , \mathbf{w}_{nk}^* ;

步骤2 更新: $j = j + 1$;

步骤3 令 $\tilde{\mathbf{w}}_m(j) = \mathbf{w}_m^*$, $\tilde{\mathbf{w}}_{nk}(j) = \mathbf{w}_{nk}^*$;

终止: 直至收敛或达到最大迭代次数 g ;

输出: 最优的 \mathbf{w}_m^* , \mathbf{w}_{nk}^* , \mathbf{Z}_0^* , \mathbf{Z}_n^* , 及系统能量接收性能值 t 。

4 仿真分析

将本文方案与以下方案进行仿真对比: (1)对比方案1: 基于完整CSI的设计方案, 即将获取的估计CSI视为准确CSI。(2)对比方案2: 利用S-引理对联合设计问题进行处理。(3)对比方案3: 与对比

方案2不同, 该方案分别将人工噪声限定在合法信道零空间, 基于S-引理对联合优化设计问题进行求解^[16]。考虑简化的大尺度路径损耗与小尺度衰落模型, 小尺度衰落为瑞利衰落^[9]。系统参数设置为: $N = 1, M = 2, K = 1, \xi = 0.5, \kappa = 0.5; N_M = 5, N_F = 4$ 。为简化分析, 除非特别说明, $\gamma_m = \gamma_{nk} = \gamma_U = 10$ dB, $\rho_m = \rho_{nk} = \rho_U = 0.1, \forall m, n, k; \gamma_{EB} = -5$ dB, $\rho_{EB} = 0.1; q_{Eb} = q = 0.1, \forall b$; 所有信道误差具有相同误差值 ε , 即 $\mathbf{Q}_m = \mathbf{Q}_{nk} = \varepsilon \mathbf{I}_{N_M}, \mathbf{Q}_{n,m} = \mathbf{Q}_{l,nk} = \varepsilon \mathbf{I}_{N_F}, \mathbf{Q}_{Eb} = \varepsilon \mathbf{I}_{N_M}, \mathbf{Q}_{n,Eb} = \varepsilon \mathbf{I}_{N_F}, \forall m, n, k, l, b$ 。

从图2可以看出, 随着 P_M 的增大, 系统能量接收性能均逐渐增长, 因为此时ERs可以从层间干扰信号中接收更多的能量。同时注意到, 对比方案1具有最好的性能, 因为其忽略了CSI误差的存在, 是一种理想的情形。换言之, 对比方案1的性能是鲁棒设计方案在相同参数条件下所能获取的性能上界。相较于对比方案2和方案3, 本文方案表现出了更加优越的性能。这表明, 采用基于Bernstein-type不等式的保守约束比基于S-引理的保守约束更加贴近实际的概率要求, 即基于S-引理的方案比基于Bernstein-type不等式的方案更加保守。此外, 我们还发现, 对比方案2能量接收性能要优于对比方案3。这说明, 本文采用的未限定人工噪声结构方案能够更有效地实现系统能量传输。类似地, 图3给出了系统能量接收性能随 P_F 增大时的变化情况。由图3可知, 随着 P_F 增大, 系统能量接收性能也随之增长, 因为ER可以从FBS的下行信息信号及人工噪声信号中获取更多能量。4种方案中的性能对比与图2相同, 具体分析亦与图2中类似, 就不再赘述。

从图4可以看出, 对比方案1不受 ε 的变化影响。实际上, 其余3种方案与对比方案1的性能差距分别代表对应鲁棒方案为保证鲁棒性所需要的额外消耗功率。如图4所示, 3种鲁棒方案的能量接收性

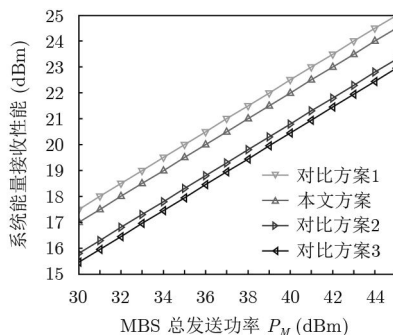


图2 不同 P_M 时的系统能量接收性能

能分别随 ε 增大而逐渐减小, 与对比方案1之间的性能差距逐渐增大。这意味着 ε 增大会导致鲁棒方案为抵抗CSI误差造成的额外功率消耗逐渐增多, 造成系统能量接收性能下降。同时注意到, 3种鲁棒方案之间的能量接收性能对比与图2相同。此外还发现, ER数目增多时各方案的能量接收性能均出现了下降现象。这一方面是因为, ER数目增多意味着有更多的ER需要进行能量传输, 但由于MBS, FBS总发送功率受限, 且同时需要满足其他用户的信息接收中断概率约束限制, 此时系统能量接收性能会降低。另一方面, ER数目增多, 相当于 E_B 的天线数增多, 此时其窃听能力将会变强。为使 E_B 的SINR在预设的中断概率约束限制内, MBS需要分配更多的噪声功率来干扰 E_B , 但MBS的噪声功率并不能为ER所利用, 造成系统能量接收性能下降。

如图5所示, 对比方案1始终具有最优的可行解性能。在3种鲁棒设计方案中, 本文方案显示出了最好的性能。一方面是因为采用Bernstein-type不等式方案更加贴近实际的概率要求, 而采用S-引理方案则过于保守; 另一方面, 采用未限定人工噪声结构方案能够更有效地对 E_B 进行干扰和满足对ER的能量传输要求。同时注意到, 图5能够在反映3种鲁

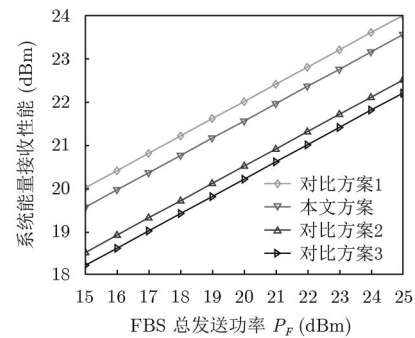


图3 不同 P_F 时的系统能量接收性能

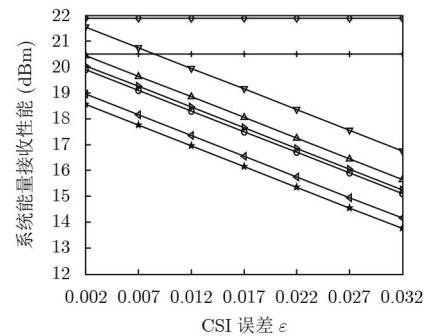
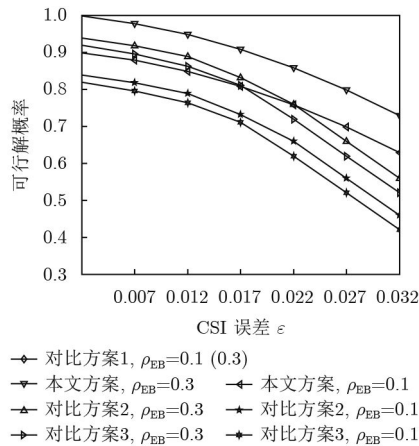


图4 不同 ε 及 B 时的系统能量接收性能

图5 不同 ε 及 ρ_{EB} 时的可行解概率

棒设计方案的安全性对比情况。仿真中 $\gamma_1 = 10$ dB, $\gamma_{EB} = -5$ dB, 可知此时系统能获取高于零的安全速率, 从而验证了本文方案的安全性。在提供相同安全速率及相同 ρ_{EB} 下, 本文方案相对于另2种鲁棒方案始终具有最好的可行解性能, 意味着在实际情形中本文方案能够更加可靠的保证系统安全性。此外, 还可以看出, ρ_{EB} 增大, 3种鲁棒设计方案的可行解性能均会有所提升。因为 ρ_{EB} 增大意味着对系统安全性的概率约束程度降低, 此时对系统进行综合性设计的约束得到了松弛, 在相同条件下获取最优性联合设计的概率也相应地有所提升。

5 结束语

考虑异构携能通信网络中CSI存在随机误差的场景, 为避免多个相互勾结的ERs对MU的下行信息进行窃听, 本文提出一种基于人工噪声辅助的鲁棒安全传输方案。通过联合设计MBS, FBS的下行信息波束和人工噪声协方差矩阵, 最大化系统能量接收性能。在发送功率约束, IRs的信息接收中断概率约束, Eves的信息窃听中断约束及能量接收中断概率约束下, 该能量接收性能最大化问题是非凸的。为求解该问题, 首先通过等效变换获取原始问题的等价形式; 而后利用Bernstein-type不等式处理其中的中断概率约束, 将其转化为可以直接进行求解的线性矩阵不等式。仿真结果验证了该方案的安全性和鲁棒性。

参考文献

- [1] ZHANG Haijun, DU Jiali, and CHENG Juliang. Incomplete CSI based resource optimization in SWIPT-enabled heterogeneous networks: A non-cooperative game theoretic approach[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(3): 1882–1892. doi: [10.1109/TWC.2017.2786255](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2786255).
- [2] AKBAR S and DENG Yansha. Simultaneous wireless information and power transfer in K-tier heterogeneous cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(8): 5804–5818. doi: [10.1109/TWC.2016.2570209](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2570209).
- [3] SHENG Ming, WANG Liang, and WANG Xijun. Energy efficient beamforming in MISO heterogeneous cellular networks with wireless information and power transfer[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, 34(4): 954–968. doi: [10.1109/JSAC.2016.2544538](https://doi.org/10.1109/JSAC.2016.2544538).
- [4] LIU Yiliang, CHEN Hsiaohwa, and WANG Liangmin. Physical layer security for next generation wireless networks: theories, technologies, and challenges[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2017, 19(1): 347–376. doi: [10.1109/COMST.2016.2598968](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2598968).
- [5] SUN Li and DU Qinghe. Physical layer security with its applications in 5G networks: A review[J]. *China Communications*, 2017, 14(12): 1–14. doi: [10.1109/CC.2017.8246328](https://doi.org/10.1109/CC.2017.8246328).
- [6] CHU Zheng, NQUYEN H X, and CAIRE G. Game theory-based resource allocation for secure WPCN multi-antenna multicasting systems[J]. *IEEE Transactions on Information Forensics & Security*, 2018, 13(4): 926–939. doi: [10.1109/TIFS.2017.2774441](https://doi.org/10.1109/TIFS.2017.2774441).
- [7] ALEXANDER A O, MUHAMMAD R A K, WONG K K, et al. Secure full-duplex two-way relaying for SWIPT[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(3): 336–339. doi: [10.1109/LWC.2017.2776928](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2776928).
- [8] LI Quanzhong, ZHANG Qi, and QIN Jiayin. Secure relay beamforming for SWIPT in amplify-and-forward two-way relay networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016, 65(11): 9006–9019. doi: [10.1109/TVT.2016.2519339](https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2519339).
- [9] REN Yuan, LÜ Tiejun, GAO Hui, et al. Secure wireless information and power transfer in heterogeneous networks[J]. *IEEE Access*, 2017, 99(5): 4967–4979. doi: [10.1109/ACCESS.2017.2682277](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2682277).
- [10] LI Bin, FEI Zesong, CHU Zheng, et al. Secure transmission for heterogeneous cellular networks with wireless information and power transfer[J]. *IEEE Systems Journal, Early Access*, 2017. doi: [10.1109/JSYST.2017.2713881](https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2713881).
- [11] ZHU Zhengyu and CHU Zheng. Outage constrained robust beamforming for secure broadcasting systems with energy harvesting[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communica-*

- tions, 2016, 15(11): 7610–7620. doi: [10.1109/TWC.2016.2605102](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2605102).
- [12] LE T A and VIEN Q T. Robust chance-constrained optimization for power-efficient and secure SWIPT systems[J]. *IEEE Transactions on Green Communications & Networking*, 2017, 1(3): 333–346. doi: [10.1109/TGCN.2017.2706063](https://doi.org/10.1109/TGCN.2017.2706063).
- [13] LI Bin and FEI Zesong. Probabilistic-constrained robust secure transmission for energy harvesting over MISO channels[J]. *Science China Information Sciences*, 2018, 61(2): 1–12. doi: [10.1007/s11432-016-9040-x](https://doi.org/10.1007/s11432-016-9040-x).
- [14] NIU Hehao and GUO Daoxin. Outage constrained robust energy harvesting maximization for secure MIMO SWIPT Systems[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2017, 6(5): 614–617. doi: [10.1109/LWC.2017.2722415](https://doi.org/10.1109/LWC.2017.2722415).
- [15] RASHID U, TUAN H, KHA H, *et al.* Joint optimization of source precoding and relay beamforming in wireless MIMO relay networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2014, 62(2): 488–499. doi: [10.1109/TCOMM.2013.122013.130239](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2013.122013.130239).
- [16] ZHANG Lijian and JIN Liang. Robust secure transmission for multiuser MISO systems with probabilistic QoS constraints[J]. *Science China Information Sciences*, 2016, 59(2): 1–13. doi: [10.1007/s11432-015-5342-6](https://doi.org/10.1007/s11432-015-5342-6).
- 张 波: 男, 1993年生, 博士生, 研究方向为移动通信安全.
黄开枝: 女, 1973年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为移动通信网络及信息安全.