



# SWIPT MIMO 全双工系统中的物理层安全通信优化方法

陈可可, 赵 赛, 唐 冬

(广州大学 机械与电气工程学院, 广州 510006)

**摘 要:** 研究多输入多输出通信系统中同时存在无线信息与能量时的安全传输问题。在源端和全双工节点发送端的发送总功率、全双工节点接收端的能量收集限制 2 种约束条件下, 设计人工噪声与全双工节点接收端的能量分配因子, 给出保密速率最大化问题的函数表达式, 并分别提出基于替代函数和泰勒公式展开的 2 种优化方法。仿真结果表明, 所提 2 种方法能有效解决全双工模式中的保密速率最大化问题, 且与半双工模式相比, 全双工模式可以提高系统的保密速率与安全性。

**关键词:** 多输入多输出系统; 全双工模式; 人工噪声; 保密速率; 能量收集

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



**中文引用格式:** 陈可可, 赵赛, 唐冬. SWIPT MIMO 全双工系统中的物理层安全通信优化方法[J]. 计算机工程, 2019, 45(12): 109-113.

**英文引用格式:** CHEN Keke, ZHAO Sai, TANG Dong. Optimization method for physical layer secure communication in SWIPT MIMO full-duplex system[J]. Computer Engineering, 2019, 45(12): 109-113.

## Optimization Method for Physical Layer Secure Communication in SWIPT MIMO Full-Duplex System

CHEN Keke, ZHAO Sai, TANG Dong

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**[Abstract]** This paper studies the security problem in the Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) communication system when the transmission of wireless information and power happens simultaneously. We first design the energy partitioning factors of the artificial noise and the full-duplex node receiver respectively. The design is achieved under two constraints: the total power constraint of the source and the full-duplex transmitter, and the energy collection constraint of the full-duplex receiver. Then we give the functional expression of the maximum secrecy rate problem and two optimization methods, which are based on the substitution function and Taylor formula respectively. Simulation results show that these two methods can effectively solve the maximum secrecy rate problem in full-duplex mode. Besides, compared with the half-duplex mode, the full-duplex mode can improve the secrecy rate and security of the system.

**[Key words]** Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system; full-duplex mode; artificial noise; secrecy rate; energy collection

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0052608

### 0 概述

随着无线通信设备的普及, 用户对通信质量的要求越来越高, 而多天线系统能提高数据传输质量, 因此, 其受到了研究者的广泛关注。近年来, 传统无线节点充电技术在很大程度上限制了无线通信中的节点使用寿命, 为解决该问题, 无线携能通信 (Simultaneous Wireless

Information and Power Transfer, SWIPT) 应运而生, 其能够同时传输信息与能量并进行能量收集, 从而提高了能量转发的效率。

在无线通信系统中, 个人信息可能被非法用户所窃听, 即存在信息泄露的风险。近年来, 物理层 (PHY) 的保密性受到学者们的广泛关注。物理层安全是一种信息理论方法, 其通过信道编码与信号处

**基金项目:** 广东省自然科学基金 (2017A030310639, 2017A030313363); 广东省科技计划项目 (2016A010101032); 广东省教育厅特色创新类项目 (2016KTSCX104); 广州市教育局科技项目 (1201630400)。

**作者简介:** 陈可可 (1997—), 男, 硕士研究生, 主研方向为无线通信、中继传输技术; 赵 赛, 讲师、博士; 唐 冬 (通信作者), 教授、博士。

**收稿日期:** 2018-09-10 **修回日期:** 2018-12-26 **E-mail:** tangdong@gzhu.edu.cn

理技术来实现保密。文献[1]介绍了系统保密能力的基本概念。当发射端有多个天线时,文献[2-4]提出可以避免影响合法接收机而只影响窃听者的方法。在不完美的窃听信道状态信息(Channel State Information, CSI)下,文献[4]解决了人工噪声辅助中断的安全速率最大化问题。

在多数已有研究中,终端运行都采用半双工(Half-Duplex, HD)模式,不能同时传输和接收数据。然而,随着电子、天线以及信号处理技术的成熟,使得全双工(Full-Duplex, FD)终端能够在同一时间和同一频带上接收并传输数据,从而大幅提高了通信效率。文献[5-7]分别提出可以降低环路干扰的天线隔离、时间取消和空间预编码方法。文献[8]提出了一种对全双工 MIMO 中继器进行自干扰抑制的技术。文献[9]比较 HD 系统与 FD 系统的功率传输性能。文献[10]研究接收端发送人工噪声、源端配置单根天线的情况。文献[11]通过引入一个辅助设备来提高保密速率。文献[12]基于最小均方误差准则,提出了源和中继波束形成器在其发射功率约束和用户能量收集约束下的联合优化问题。文献[13]提出了一种同时适用于大规模 MIMO 时分双工(TDD)和频分双工(FDD)系统的上下行统一信道估计策略。文献[14]利用线性相关方法找出每一个 D2D 用户可复用的蜂窝用户集合。

本文研究 SWIPT MIMO 全双工系统中的物理层通信状态,分别设计 2 种方法解决在信道状态已知情况下的系统保密速率最大化问题,并对系统的整体安全性能进行分析。

## 1 系统模型

在本文中, $\mathbf{A} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 表示  $M \times N$  维的复数矩阵, $\mathbf{A}$  的共轭转置矩阵用  $\mathbf{A}^+$  表示, $\mathbf{A}$  矩阵的迹用  $\text{Tr}(\mathbf{A})$  表示。 $\mathbf{A} \geq 0$ 、 $\mathbf{A} > 0$  分别表示  $\mathbf{A}$  为正定矩阵、 $\mathbf{A}$  为半正定矩阵。 $CN(0, \mathbf{I})$  表示均值为 0、协方差矩阵为  $\mathbf{I}$  的复高斯白噪声。 $|\mathbf{A}|$  表示矩阵  $\mathbf{A}$  的行列式。

图 1 所示为一个多输入多输出(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)系统,该系统包括:一个源端用来发送信息,配置  $N_s$  个天线,一个合法的全双工接收端,配置  $N_r$  个接收天线与  $N_t$  个发射天线,总天线数目为  $N_r + N_t$ ,一个窃听者,配置  $N_e$  个天线。源端发射信息给全双工接收端,同时窃听者从源端窃听信息,在接收端发送人工噪声去干扰窃听者的信道,同时接收端也会受到自身发送端带来的干扰<sup>[15]</sup>。源端到接收端的信道是  $\mathbf{H}_{sr} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_s}$ ,源端到窃听者的信道是  $\mathbf{H}_{se} \in \mathbb{C}^{N_e \times N_s}$ ,FD 接收端到窃听者的

信道是  $\mathbf{H}_{te} \in \mathbb{C}^{N_e \times N_t}$ ,全双工接收端自身受到的干扰信道是  $\mathbf{H}_{tr} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_r}$ 。在本文中,假设这些信道的状态信息已知,即都为完美信道。

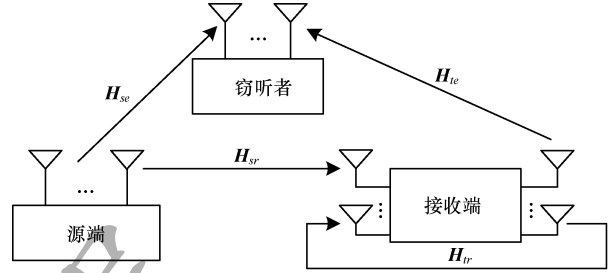


图 1 全双工 MIMO 系统

本文假设系统没有足够的能源供应,在接收端必须采用能量收集方案去收集来自源端的能量并将其传输给窃听者。具体地,合法的 FD 接收器将接收到的能量分成 2 个部分,分别为信号接收(ID)和能量收集(EH),如图 2 所示。

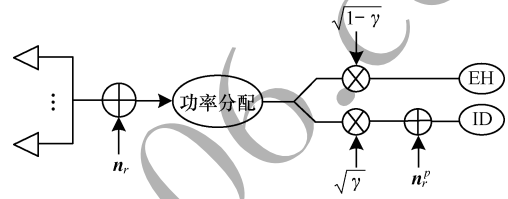


图 2 合法全双工接收机的功率分配示意图

源端发送的信号是  $\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{N_s \times 1}$ ,接收端发送的人工噪声是  $\mathbf{q} \in \mathbb{C}^{N_r \times 1}$ 。进一步假设  $\mathbf{s} \sim CN(0, \mathbf{W})$ ,  $\mathbf{q} \sim CN(0, \mathbf{Q})$ 。在接收端接收到的信号以及在窃听者处窃听到的信号分别为:

$$\mathbf{y}_r = \sqrt{\gamma} (\mathbf{H}_{sr}^+ \mathbf{s} + \mathbf{H}_{tr}^+ \mathbf{q} + \mathbf{n}_r) + \mathbf{n}_r^p \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_e = \mathbf{H}_{se}^+ \mathbf{s} + \mathbf{H}_{te}^+ \mathbf{q} + \mathbf{n}_e \quad (2)$$

其中,  $0 \leq \gamma \leq 1$  表示能量分配因子,  $\mathbf{n}_r \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I})$ 、 $\mathbf{n}_e \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I})$  分别表示接收端和窃听者处的复高斯白噪声信号,  $\mathbf{n}_r^p \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I})$  表示在信号接收过程中额外产生的复高斯白噪声,本文中均设定噪声方差  $\sigma^2 = 1$ 。

本文系统可实现的保密速率为:

$$R = R_r - R_e \quad (3)$$

其中:

$$R_r = \ln |\mathbf{I} + (\gamma(\mathbf{Q}\mathbf{H}_{tr}) + \mathbf{I})^{-1} \gamma \mathbf{H}_{sr}^+ \mathbf{W} \mathbf{H}_{sr}| \quad (4)$$

$$R_e = \ln |\mathbf{I} + (\mathbf{I} + \mathbf{H}_{te}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{te})^{-1} \mathbf{H}_{se}^+ \mathbf{W} \mathbf{H}_{se}| \quad (5)$$

在接收端收集到的能量  $E$  表示为:

$$E = (1 - \gamma) \text{Tr}(\boldsymbol{\omega}) \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{H}_{tr}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{tr} + \mathbf{H}_{sr}^+ \mathbf{W} \mathbf{H}_{sr} \quad (7)$$

本文系统的目标是在源端和全双工节点发送端的

发送总功率以及全双工节点接收端的能量收集 2 种约束下, 最大化保密速率, 此处的优化问题可以表示为:

$$\begin{aligned} & \max_{W \geq 0, Q \geq 0, 0 \leq \gamma \leq 1} R \\ & \text{s. t.} \\ & \text{Tr}(W + Q) \leq P \\ & E \geq D \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $P$  表示总功率约束,  $D$  是接收端的能量收集限制。对于式 (8), 需要通过凸优化方法求出其最优解。

## 2 优化问题求解

本文针对保密速率优化问题提出 2 种求解方法。

**方法 1** 式 (8) 显然是一个非凸问题, 本文引入一个松弛变量  $\alpha = 1/\gamma$ , 重写  $R_r$ 、 $R_e$  分别为:

$$R_r = \ln |(\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr} + H_{sr}^+ WH_{sr}| - \ln |(\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr}| \quad (9)$$

$$R_e = \ln |I + H_{te}^+ QH_{te} + H_{se}^+ WH_{se}| - \ln |I + H_{te}^+ QH_{te}| \quad (10)$$

本文目标是将优化问题进行合理重构, 使其转变为适合交替迭代优化的形式。首先引入以下引理:

**引理 1**  $B \in \mathbb{C}^{N \times N}$  是一个任意的半正定矩阵, 考虑函数:

$$f(S) = -\text{Tr}(SB) + \ln(S) + N \quad (11)$$

可得:

$$\ln(B^{-1}) = \max_{S \in \mathbb{C}^{N \times N}, S \geq 0} f(S) \quad (12)$$

因为  $f(S)$  是凹的, 所以可以用  $\partial f(S)/\partial(S) = 0$  得到式 (12) 右面的最优解是  $S^* = B^{-1}$ 。

引入引理 1 的目的是重新塑造目标函数。将引理 1 应用到  $R_r$ ,  $-\ln |(\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr}|$  可改写为:

$$f(S_r) = -\text{Tr}(S_r((\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr})) + \ln(S_r) + N_r \quad (13)$$

可以得到:

$$-\ln |(\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr}| = \max_{S_r \in \mathbb{C}^{N_r \times N_r}, S_r \geq 0} f(S_r) \quad (14)$$

将引理 1 引入  $R_e$ ,  $-\ln |I + H_{te}^+ QH_{te} + H_{se}^+ WH_{se}|$  可改写为:

$$f(S_e) = -\text{Tr}(S_e(I + H_{te}^+ QH_{te} + H_{se}^+ WH_{se})) + \ln(S_e) + N_e \quad (15)$$

可以得到:

$$-\ln |I + H_{te}^+ QH_{te} + H_{se}^+ WH_{se}| = \max_{S_e \in \mathbb{C}^{N_e \times N_e}, S_e \geq 0} f(S_e) \quad (16)$$

综上,  $R_r$ 、 $R_e$  可改写为:

$$R'_r = \max_{S_r \in \mathbb{C}^{N_r \times N_r}, S_r \geq 0} \ln |(\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr} + H_{sr}^+ WH_{sr}| + f(S_r) \quad (17)$$

$$R'_e = \max_{S_e \in \mathbb{C}^{N_e \times N_e}, S_e \geq 0} -\ln |I + H_{te}^+ QH_{te}| - f(S_e) \quad (18)$$

式 (8) 则可以写成如下形式:

$$R = R'_r - R'_e \quad (19)$$

$$\begin{aligned} & \max_{W \geq 0, Q \geq 0, 0 \leq \gamma \leq 1} R \\ & \text{s. t.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Tr}(W + Q) \leq P, \alpha \geq 1 \\ & \text{Tr}(\omega) \geq (1 + 1/(\alpha - 1))D \end{aligned} \quad (20)$$

将  $\text{Tr}(\omega) \geq (1 + 1/(\alpha - 1))D$  用线性矩阵不等式 (Linear Matrix Inequalities, LMI) 表示为:

$$\begin{pmatrix} \text{Tr}(\omega) - D & \sqrt{D} \\ \sqrt{D} & \alpha - 1 \end{pmatrix} \geq 0 \quad (21)$$

可以看出, 式 (21) 依旧不是凸问题, 不能通过 CVX (Convex programming) 进行求解, 但是给定  $S_r$ 、 $S_e$  的初始值后, 式 (21) 可以变成凸问题, 可通过交替迭代算法<sup>[16]</sup>进行求解。首先给定  $S_r^{(0)}$ 、 $S_e^{(0)}$ , 将它们当做已知, 式 (21) 可以写成如下形式:

$$\begin{aligned} R^* &= \ln |(\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr} + H_{sr}^+ WH_{sr}| - \\ & \text{Tr}(S_r^{(0)}((\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr})) + \\ & \ln(S_r^{(0)}) + N_r + \ln |I + H_{te}^+ QH_{te}| - \\ & \text{Tr}(S_e^{(0)}(I + H_{te}^+ QH_{te} + H_{se}^+ WH_{se})) + \\ & \ln(S_e^{(0)}) + N_e \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & \max_{W \geq 0, Q \geq 0, 0 \leq \gamma \leq 1} R^* \\ & \text{s. t.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Tr}(W + Q) \leq P, \alpha \geq 1 \\ & \begin{pmatrix} \text{Tr}(\omega) - D & \sqrt{D} \\ \sqrt{D} & \alpha - 1 \end{pmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (23)$$

对于式 (23), 可以使用凸优化求解器 CVX 求其最优解。通过式 (23) 可以求解得到  $W$ 、 $Q$  及  $\alpha$ , 然后利用如下公式计算  $S_r$ 、 $S_e$ :

$$\begin{aligned} S_r &= ((\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr})^{-1} \\ S_e &= (I + H_{te}^+ QH_{te} + H_{se}^+ WH_{se})^{-1} \end{aligned}$$

上述方法过程总结如下:

1) 初始化  $(S_r^{(n)}, S_e^{(n)})$ ,  $n = 0$

2) 重复:

$$(S_r^{(n)}, S_e^{(n)}) = (S_r^{(n-1)}, S_e^{(n-1)})$$

通过求解式 (23) 得到  $(W, Q, \alpha)$

3) 计算如下公式直至收敛:

$$S_r^{n+1} = ((\alpha + 1)I + H_{tr}^+ QH_{tr})^{-1}$$

$$S_e^{n+1} = (I + H_{te}^+ QH_{te} + H_{se}^+ WH_{se})^{-1}$$

$n = n + 1$

方法2 引入松弛变量  $\theta_1$  与  $\theta_2$ , 式(8)改写如下:

$$\begin{aligned} & \max_{W \geq 0, Q \geq 0, \theta_1, \theta_2} (\theta_1 - \theta_2) \\ & \text{s. t.} \\ & R_r \geq \theta_1, R_e \leq \theta_2, \text{Tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}) \leq P, \alpha \geq 1 \\ & \begin{pmatrix} \text{Tr}(\boldsymbol{\omega}) - D & \sqrt{D} \\ \sqrt{D} & \alpha - 1 \end{pmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (24)$$

运用泰勒展开式处理式(24), 给定  $(\mathbf{W}', \alpha')$ ,  $R_r$  可以写成:

$$\begin{aligned} R_r &= \ln |(\alpha + 1)\mathbf{I} + \mathbf{H}_{tr}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{tr} + \mathbf{H}_{sr}^+ \mathbf{W} \mathbf{H}_{sr}| - \\ & \ln |(\alpha + 1)\mathbf{I} + \mathbf{H}_{tr}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{tr}| \approx R_{r1} \end{aligned} \quad (25)$$

此处  $R_{r1}$  是给定  $(\mathbf{W}', \alpha')$  的泰勒展开式形式, 满足:

$$\begin{aligned} R_{r1} &= \ln |(\alpha + 1)\mathbf{I} + \mathbf{H}_{tr}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{tr} + \mathbf{H}_{sr}^+ \mathbf{W} \mathbf{H}_{sr}| - \\ & \ln |(\alpha' + 1)\mathbf{I} + \mathbf{H}_{tr}^+ \mathbf{Q}' \mathbf{H}_{tr}| - \\ & \text{Tr}\{((\alpha' + 1)\mathbf{I} + \mathbf{Q}' \mathbf{H}_{tr})^{-1} (\mathbf{H}_{tr}^+ (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}') \mathbf{H}_{tr} + \\ & (\alpha - \alpha')\mathbf{I})\} \end{aligned} \quad (26)$$

在式(25)中, 对于  $(\mathbf{Q}, \alpha)$ ,  $-\ln |(\alpha + 1)\mathbf{Q} \mathbf{H}_{tr} + \mathbf{H}_{tr}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{tr}|$  是一个凸函数, 根据反向 log-determinant 函数的凸性质可以得到:

$$R_r \geq R_{r1} \quad (27)$$

因此, 限制条件  $R_r \geq \theta_1$  可以近似表示成:

$$R_{r1} \geq \theta_1 \quad (28)$$

同样, 给定  $(\mathbf{W}', \mathbf{Q}')$ ,  $R_e$  可以写成:

$$\begin{aligned} R_e &= \ln |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{te}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{te} + \mathbf{H}_{se}^+ \mathbf{W} \mathbf{H}_{se}| - \\ & \ln |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{te}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{te}| \approx R_{e1} \end{aligned} \quad (29)$$

此处  $R_{e1}$  是泰勒展开式的形式, 满足:

$$\begin{aligned} R_{e1} &= \ln |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{te}^+ \mathbf{Q}' \mathbf{H}_{te} + \mathbf{H}_{se}^+ \mathbf{W}' \mathbf{H}_{se}| - \\ & \ln |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{te}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{te}| + \\ & \text{Tr}\{(\mathbf{I} + \mathbf{Q}' \mathbf{H}_{te} + \mathbf{W}' \mathbf{H}_{se})^{-1} \cdot \\ & (\mathbf{H}_{te}^+ (\mathbf{Q} - \mathbf{Q}') \mathbf{H}_{te} + \mathbf{H}_{se}^+ (\mathbf{W} - \mathbf{W}') \mathbf{H}_{se})\} \end{aligned} \quad (30)$$

在式(29)中, 对于  $(\mathbf{W}, \mathbf{Q})$ ,  $\ln |\mathbf{I} + \mathbf{H}_{te}^+ \mathbf{Q} \mathbf{H}_{te} + \mathbf{H}_{se}^+ \mathbf{W} \mathbf{H}_{se}|$  是凹的, 根据 log-determinant 函数的凹性质, 可以得到:

$$R_e \leq R_{e1} \quad (31)$$

因此,  $R_e \leq \theta_2$  可以近似写成:

$$R_{e1} \leq \theta_2 \quad (32)$$

利用凸近似性质, 式(24)即可以写成:

$$\begin{aligned} & \max_{W \geq 0, Q \geq 0, \theta_1, \theta_2} (\theta_1 - \theta_2) \\ & \text{s. t.} \\ & R_{r1} \geq \theta_1, R_{e1} \leq \theta_2, \text{Tr}(\mathbf{W} + \mathbf{Q}) \leq P, \alpha \geq 1 \\ & \begin{pmatrix} \text{Tr}(\boldsymbol{\omega}) - D & \sqrt{D} \\ \sqrt{D} & \alpha - 1 \end{pmatrix} \geq 0 \end{aligned} \quad (33)$$

至此, 即可以用凸优化求解器 CVX 对优化问题进行求解。

上述方法过程总结如下:

1) 初始化  $(\mathbf{W}^{(n)}, \mathbf{Q}^{(n)}, \alpha^{(n)})$ ,  $n = 0$

2) 重复下列循环直至收敛:

$$(\mathbf{W}', \mathbf{Q}', \alpha') = (\mathbf{W}^{(n)}, \mathbf{Q}^{(n)}, \alpha^{(n)})$$

解式(33)得到  $(\mathbf{W}, \mathbf{Q}, \alpha)$

$$\text{令} (\mathbf{W}^{(n+1)}, \mathbf{Q}^{(n+1)}, \alpha^{(n+1)}) = (\mathbf{W}, \mathbf{Q}, \alpha)$$

$$n = n + 1$$

### 3 实验结果与分析

本文在完美信道环境下, 通过 Matlab 仿真来评估上述2种优化问题求解方法的性能。仿真次数设置为1000, 以保证结果的准确性。信道矩阵由均值为0、具有单位方差的复高斯随机变量生成, 所有噪声功率都归一化为1。能量收集约束设置成  $D = 0.5P$ 。将源端的天线数目、接收端的发射天线数目、接收端的接收天线数目、窃听者的天线数目均设置为4, 即  $N_s = N_t = N_r = N_e = 4$ 。本文对比全双工与半双工2种模式的保密速率, 结果如图3所示。其中, 半双工模式中源端发送信号到接收端, 接收端的所有天线都是接收天线, 即8根接收天线, 窃听者从中窃听信息。从图3可以看出, 半双工模式的保密速率随着发射功率的增大而逐渐饱和, 全双工模式的保密速率随着发射功率的增加而不断增加, 但不会达到上限, 且在发射功率较大时, 全双工模式的保密速率优于半双工模式。

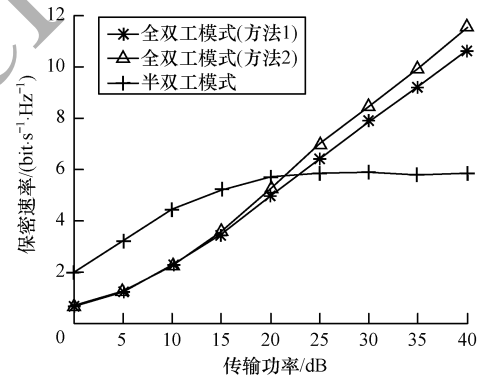


图3 半双工与全双工的保密速率对比结果1

改变天线的数目, 将源端天线、全双工模式接收端天线、全双工模式发送端天线、窃听者天线的数目均设置为2, 即  $N_s = N_t = N_r = N_e = 2$ , 半双工模式的接收端接收天线数目设为4, 其他参数设置同图3, 对比全双工与半双工2种模式的保密速率, 结果如图4所示。从图4可以看出, 在改变天线数目后, 系统的保密速率趋势同图3, 即全双工模式相对半双工模式提高了系统的整体保密速率。

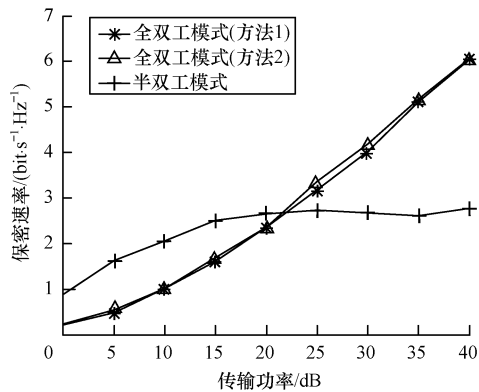


图4 半双工与全双工的保密速率对比结果2

将全双工接收端天线、全双工发送端天线、窃听者天线的数目均设置为4,其他参数设置同图3,比较源端天线数目为4、源端是单天线2种情况下的系统性能,结果如图5所示。从图5可以看出,本文提出的MIMO系统具有良好的性能,相比单输入多输出系统,其保密速率有显著提升。

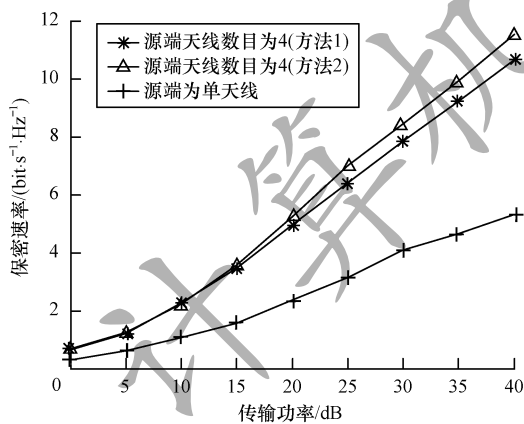


图5 源端天线数目不同时的保密速率对比结果

#### 4 结束语

本文研究全双工MIMO无线携能通信系统中的安全传输问题,在源端和全双工发送端的发送总功率约束以及全双工接收端的能量收集限制下,分别提出2种方法解决保密速率优化问题。仿真结果表明,在发射功率较大时,上述2种方法的保密速率高于半双工模式下的保密速率,在同时传输信息与能量的系统中添加能量收集系统,可以有效降低资源消耗并提高通信质量。下一步将在不完美信道环境下考虑鲁棒性因素,实现系统的保密速率优化。

#### 参考文献

- [1] WYNER A D. The wire-tap channel [J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1355-1387.
- [2] GOEL S, NEGI R. Guaranteeing secrecy using artificial noise [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008, 7(6): 2180-2189.
- [3] SWINDLEHURST A L. Fixed SINR solutions for the MIMO wiretap channel [C]//Proceedings of IEEE International

- Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2009: 2437-2440.
- [4] LI Ma. Safe convex approximation to outage-based MISO secrecy rate optimization under imperfect CSI and with artificial noise [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Signals, Systems and Computers. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2012: 207-211.
- [5] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. Mitigation of loopback self-interference in full-duplex MIMO relays [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(12): 5983-5993.
- [6] DAY B P, MARGETTS A R, BLISS D W, et al. Full-duplex MIMO relaying: achievable rates under limited dynamic range [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(8): 1541-1553.
- [7] DUARTE M, SABHARWAL A, AGGARWAL V, et al. Design and characterization of a full-duplex multi-antenna system for WiFi networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 63(3): 1160-1177.
- [8] LIOLIOU P, VIBERG M, COLDREY M, et al. Self-interference suppression in full-duplex MIMO relays [C]//Proceedings of the 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2010: 658-662.
- [9] RIIHONEN T, WERNER S, WICHMAN R. Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(9): 3074-3085.
- [10] ZHENG G, KRIKIDIS I, LI Jiangyuan, et al. Improving physical layer secrecy using full-duplex jamming receivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(20): 4962-4974.
- [11] NIU Hehao, ZHANG Bangning, GUO Daoxing, et al. Secrecy rate maximization for MIMO wiretap channels with a cooperative jammer using alternating optimization [C]//Proceedings of the 1st International Conference on Electronics Instrumentation and Information Systems. Washington D. C., USA; IEEE Press, 2017: 265-275.
- [12] WEN Zhigang, LIU Xiaoqing, BEAULIEU N C, et al. Joint source and relay beamforming design for full-duplex MIMO AF relay SWIPT systems [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(2): 320-323.
- [13] HEN Yulong. Spectrum sharing performance analysis and channel selection strategy research in cognitive radio network [D]. Chongqing: Chongqing University, 2013. (in Chinese)
- [14] ZHAO Jiale, ZHAO Lingxiao, MA Dan, et al. Schemes of joint mode selection and resource allocation in D2D communication [J]. Modern Electronics Technique, 2019, 42(13): 33-37. (in Chinese)
- [15] ZHANG Erwei, HUANG Liang. A robust active false-target discrimination method suitable for diversity MIMO radar [J]. Modern Radar, 2017, 39(10): 21-24. (in Chinese)
- [16] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex optimization [M]. Cambridge, UK; Cambridge University Press, 2004.

编辑 吴云芳