研究与开发

一种基于合作干扰的主窃信道安全传输方法

徐赛，韩帅，孟维晓
（哈尔滨工业大学通信技术研究所，黑龙江 哈尔滨 150001）

摘　要：提出一种基于合作干扰的安全传输方法，用以减少主窃信道之间相关性带来的保密损失，提高通信系统的保密性能。考虑现有的合作干扰方法集中于主窃信道相互独立的情形，因此，当主窃信道相关时，现有的合作干扰方法由于设计的局限性无法获得足够理想的保密性能。鉴于此，提出一种面向相关主窃信道具有针对性的合作干扰方法。基于相关主窃信道的合作干扰模型，对保密中断概率约束下的保密速率最大化问题进行了形式化。通过采用范数边界法和伯恩不等式法将优化问题的概率约束条件转化成近似的确定形式，能够获得波束成形和人工噪声的一组近似解。仿真结果显示，提出的合作干扰方法能够在高相关性的条件下减少通信系统的保密损失。

关键词：物理层安全；相关性；合作干扰；保密中断概率；保密速率
中图分类号：TN914，TN918
文献标识码：A
doi: 10.11959/j.issn.1000−0801.2021121

A secure transmission method based on cooperative jamming for correlated main and wiretap channels

XU Sai, HAN Shuai, MENG Weixiao
The Communications Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

Abstract: A secure transmission method was proposed based on cooperative jamming to reduce the secrecy loss caused by the correlation between main and wiretap channels and to improve the secrecy. Considering that the existing methods of cooperative jamming focused on the case of independent main and wiretap channels, the achievable secrecy performance was not satisfactory. In view of this, a cooperative jamming method for correlated main and wiretap channels was proposed. Based on the model of cooperative jamming under correlated main and wiretap channels, the secrecy rate maximization under secrecy outage constraint was formulated. Then, the norm bounding approach and the Bernstein-type inequality approach were employed to approximately transform the probabilistic constraint into a deterministic form, and a safe approximate solution of beamforming vector and AN covariance matrix was obtained. Simulation results show that the proposed method can reduce the secrecy loss under high correlation.

Key words: physical layer security, correlation, cooperative jamming, secrecy outage probability, secrecy rate

收稿日期：2021−09−01；修回日期：2021−03−16

1 引言

随着越来越多的无线设备接入通信网络中，由设备密集带来的安全问题越来越严重[1]。除了常见的采用密码学的保密方法外，物理层安全技术通过利用物理层传输介质的随机特性并进行合适的编码和信号处理，能够确保只有合法接收者解码保密信息，且解码复杂度较低[2]。与采用密码学的保密方法不同，物理层安全完全可以忽略窃听者的运算能力，而且也可以不考虑中心密钥分发和管理[3]。

在物理层安全中，中继由于可以提供额外的空间自由度，因此常用于加强合法接收者处或/和削弱窃听者处的接收信号质量。用于物理层安全比较常见的中继技术包括合作波束成形[4-6]、合作干扰[7-10]以及中继选择[11-13]。当中继接收到的信号不十分可靠或者其周围可能存在窃听者时，中继通过转发信息并不能获得满意的保密性能[14]。针对这种情况，更合适的做法是将中继用作没有信息转发的纯粹合作干扰者，换句话说，中继仅仅发射人工噪声恶化窃听者的信号接收[15-17]。虽然采用合作干扰的中继技术能够大幅度地提高通信系统的保密性能，但是现有的合作干扰技术几乎都基于合法信道和窃听信道二者相互独立的假定，而这种假定不总符合实际情况。

在无线环境中，主信道（即从发射者到合法接收者的信道）和窃听信道之间有时也可能具有一定的相关性。无线信道之间的相关程度常常与诸如无线电反射体和散射体、天线部署等一些因素有关[18]。在物理层安全研究场景中，当无线接入设备密集较高时，主窃信道存在一定程度相关性的情况时常发生。另外，也存在一种可能的相关主窃信道情况，即窃听者主动靠近合法接收者用以诱导二者无线信道之间的相关性[19]。在主窃信道相关的情况下，参考文献[18]中给出了保密容量的推导过程，并研究了该相关性对系统保密容量的影响。在此基础上，参考文献[20]通过推导，给出了平均保密容量和中断概率的精确表达式。参考文献[21]研究了分集合并与相关信道保密容量的关系，并给出了通过调整分集阶数和平均信道增益比来减小天线影响的方法。在参考文献[22]中，假定发射端采用天线选择方案，在此前提下，通过推导得出保密中断概率的闭合表达式。参考文献[23]提出一种发射天线选择方案，通过选择最合适的中继能够有效地提高通信系统的保密性能。进一步，参考文献[24]分析了与信道相关以及过时中继选择对通信系统安全性能的影响。另一方面，参考文献[25]对与主窃信道相关条件下人工噪声辅助的波束成形进行了研究。与已有的人工噪声辅助的波束成形方案相比，本文把信道的相关性当作一种有用的信息资源，基于该信息资源人工噪声分布得到进一步优化。在参考文献[26]中，合法接收者利用全双工的方式产生人工噪声干扰窃听者的信号接收。通过全双工发射人工噪声这种方式，相关主窃信道下的保密性能得以大幅度的提高。在参考文献[27]中，多个合作干扰者被使用，通过发射人工噪声来干扰窃听者的信号接收，从而降低了主窃信道之间相关性造成的不利影响。

本文研究主窃信道相关情形下，基于相关性的合作干扰保密传输方法，用以提升保密中断概率约束下的保密速率。虽然已有很多参考文献[7-10]对基于合作干扰的保密传输方法进行了研究，但是这些研究并不针对主窃信道相关的情况，因此通信系统的保密性能仍可以通过优化进行提升。本文针对主窃信道相关的情形，优化设计基于相关性的合作干扰辅助的波束成形，旨在最大化保密中断概率约束下的保密速率。

2 相关 MISO 窃听信道下的合作干扰模型

相关多输入单输出（multiple input single output，MISO）窃听信道下采用合作干扰的网络模型如图 1 所示，其中发射端（Alice）配备 N 根

发射天线，合法接收者（Bob）以及 K 个非串通的窃听者（Eve）均配备单根天线，合作干扰者（Jammer）配备 L 根发射天线。为了增强网络的安全性，Jammer 产生人工噪声用以干扰 Eve 处的信号接收，从而达到扩大 Bob 和 Eve 处信号接收质量差距的目的。本模型假定 Alice 能够获得完整的合法信道（从 Alice 或 Jammer 到 Bob 的信道）的信道状态信息（channel state information，CSI），以及 Alice 和 Jammer 二者均能够获得窃听信道（从 Alice 或 Jammer 到 Eve 的信道）的统计 CSI。另外，本模型也假定 Alice 处的发射天线信道相互独立，而合法信道与窃听信道之间存在一定的相关性。换句话说，从 Alice 或 Jammer 处的不同发射天线到单天线接收者（本模型中指 Bob 或 Eve）的子信道相互独立，而从 Alice 或 Jammer 处的同一根发射天线到 Bob 和 Eve 处的任意子信道对之间存在相关性。

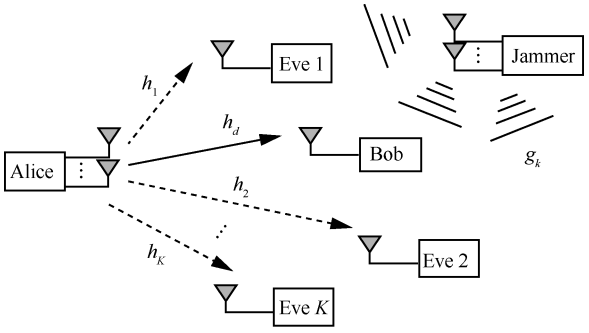


图 1　相关 MISO 窃听信道下的合作干扰模型

$\boldsymbol{h}_d \in \mathbb{C}^{N\times 1}$、$\boldsymbol{h}_k \in \mathbb{C}^{N\times 1}$、$\boldsymbol{g}_d \in \mathbb{C}^{L\times 1}$ 和 $\boldsymbol{g}_k \in \mathbb{C}^{L\times 1}$，$(k \in \mathcal{K} \triangleq \{1,2,\cdots,K\})$，分别指 Alice 到 Bob、Alice 到 Eve、Jammer 到 Bob 和 Jammer 到 Eve 的信道矢量。基于参考文献[28]，可知相关 MISO 窃听信道下的合作干扰模型可以表示为：

$$\boldsymbol{h}_k = \overline{\boldsymbol{h}}_k + \tilde{\boldsymbol{h}}_k \tag{1}$$

$$\boldsymbol{g}_k = \overline{\boldsymbol{g}}_k + \tilde{\boldsymbol{g}}_k \tag{2}$$

其中，

$$\overline{\boldsymbol{h}}_k = \frac{\alpha_k}{\alpha_d}\boldsymbol{P}_k^{1/2}\boldsymbol{\Theta}_k\boldsymbol{h}_d \tag{3}$$

$$\tilde{\boldsymbol{h}}_k = \alpha_k(\boldsymbol{I}_N - \boldsymbol{P}_k)^{1/2}\boldsymbol{z}_{h,k} \tag{4}$$

$$\overline{\boldsymbol{g}}_k = \frac{\beta_k}{\beta_d}\boldsymbol{Q}_k^{1/2}\boldsymbol{\Phi}_k\boldsymbol{g}_d \tag{5}$$

$$\tilde{\boldsymbol{g}}_k = \beta_k(\boldsymbol{I}_L - \boldsymbol{Q}_k)^{1/2}\boldsymbol{z}_{g,k} \tag{6}$$

在式（3）~式（6）中，α_d、α_k、β_d 和 β_k 分别代表 $\boldsymbol{h}_d$、$\boldsymbol{h}_k$、$\boldsymbol{g}_d$ 和 $\boldsymbol{g}_k$ 的信道增益方差。对角矩阵 P_k、$\boldsymbol{\Theta}_k$、$\boldsymbol{Q}_k$ 和 $\boldsymbol{\Phi}_k$ 分别指从 Alice 到 Bob 和 Eve 的信道相关矩阵，从 Alice 到 Bob 和 Eve 的信道相位补偿矩阵，从 Jammer 到 Bob 和 Eve 的信道相关矩阵，以及从 Jammer 到 Bob 和 Eve 的信道相位补偿矩阵。并且，$\boldsymbol{z}_{h,k} \sim \mathcal{CN}(0,\boldsymbol{I}_N)$ 和 $\boldsymbol{z}_{g,k} \sim \mathcal{CN}(0,\boldsymbol{I}_L)$ 分别为高斯白噪声矢量，假定其均值为零，协方差矩阵为单位矩阵。不难发现，$\boldsymbol{h}_k$ 的协方差矩阵为 $\boldsymbol{H}_k = \alpha_k^2(\boldsymbol{I}_N - \boldsymbol{P}_k)$，$\boldsymbol{g}_k$ 的协方差矩阵为 $\boldsymbol{G}_k = \beta_k^2(\boldsymbol{I}_L - \boldsymbol{Q}_k)$。另外，也假定 $\overline{\boldsymbol{h}}_k$ 和 $\overline{\boldsymbol{g}}_k$ 二者也可以通过估计获得。

3　保密速率最大化问题

当 Alice 发射承载保密信息的信号 $\boldsymbol{x} \in \mathbb{C}^{N\times 1}$，且 Jammer 发射人工噪声 $\boldsymbol{v} \in \mathbb{C}^{L\times 1}$ 时，在 Bob 与第 k 个 Eve 处的接收信号分别为：

$$y_d = \boldsymbol{h}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}s + \boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{v} + n_d \tag{7}$$

$$y_k = \boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}s + \boldsymbol{g}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{v} + n_k \tag{8}$$

其中，$n_d \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 和 $n_k \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 分别为 Bob 和第 k 个 Eve 处的零均值单位方差复高斯白噪声。$\boldsymbol{w}$ 指数据符号 $s \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 的波束成形器，$\boldsymbol{V} = E\{\boldsymbol{v}\boldsymbol{v}^{\mathrm{H}}\}$ 为人工噪声矢量的协方差矩阵。因此，在 Bob 和第 k 个 Eve 处的信干噪比为：

$$\gamma_d = \frac{\boldsymbol{h}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_d}{1 + \boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{g}_d} \tag{9}$$

$$\gamma_k = \frac{\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w}\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{h}_k}{1 + \boldsymbol{g}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{g}_k}, k \in \mathcal{K} \tag{10}$$

于是可知通信系统的保密容量为：

$$C_{\mathrm{s}} = \max\{C_m - \max_{k\in\mathcal{K}} C_k, 0\} = \max\left\{\log\left(\frac{1+\gamma_d}{1+\max\limits_{k\in\mathcal{K}}\gamma_k}\right), 0\right\} \tag{11}$$

保密中断概率常用来评估通信系统慢衰落信道的保密性能，其定义为：

$$P_{\text{out}}(R_{\text{s}}) = \Pr\{C_{\text{s}} \leqslant R_{\text{s}}\} \tag{12}$$

其中，R_{s} 指目标保密速率。不难看出，保密中断概率描述了相干时间间隔内保密容量小于目标保密速率的概率。本文的目标是在保密中断概率约束下最大化目标保密速率，该问题可以表述为如下数学表达式：

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{w},\boldsymbol{V}} \quad & R_{\text{s}}, \\ \text{s.t.} \quad & p_{\text{out}}(R_{\text{s}}) \leqslant \varepsilon, \\ & \boldsymbol{w}^{\text{H}}\boldsymbol{w} \leqslant P_{\text{s}}, \\ & \text{Tr}(\boldsymbol{V}) \leqslant P_{\text{j}}, \boldsymbol{V} \succeq 0 \end{aligned} \tag{13}$$

其中，P_{s} 代表 Alice 的发射功率，P_{j} 代表 Jammer 的发射功率，$\varepsilon \in (0,1)$ 为通信系统所设定的保密中断概率。

4 保密速率最大化问题求解

为了获得非凸优化问题（13）的可行解，本文使用半正定松弛方法将该问题提升到更高维度。具体地，定义 $\boldsymbol{W} \triangleq \boldsymbol{w}\boldsymbol{w}^{\text{H}}$。因为 $\text{rank}(\boldsymbol{W}) = 1, \boldsymbol{W} \succeq 0$ 等价于 $\boldsymbol{W} = \boldsymbol{w}\boldsymbol{w}^{\text{H}}$，所以非凸优化问题（13）转化为：

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{V}} \quad & R_{\text{s}}, \\ \text{s.t.} \quad & p_{\text{out}}(R_{\text{s}}) \leqslant \varepsilon, \\ & \text{Tr}(\boldsymbol{W}) \leqslant P_{\text{s}}, \boldsymbol{W} \succeq 0, \\ & \text{rank}(\boldsymbol{W}) = 1, \\ & \text{Tr}(\boldsymbol{V}) \leqslant P_{\text{j}}, \boldsymbol{V} \succeq 0 \end{aligned} \tag{14}$$

忽略秩约束条件 $\text{rank}(\boldsymbol{W}) = 1$，该优化问题可以松弛为：

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{V}} \quad & R_{\text{s}}, \\ \text{s.t.} \quad & p_{\text{out}}(R_{\text{s}}) \leqslant \varepsilon, \\ & \text{Tr}(\boldsymbol{W}) \leqslant P_{\text{s}}, \boldsymbol{W} \succeq 0, \\ & \text{Tr}(\boldsymbol{V}) \leqslant P_{\text{j}}, \boldsymbol{V} \succeq 0 \end{aligned} \tag{15}$$

该优化问题的难点在于概率约束条件，为了求解该问题，需要将其转换成确定的形式。具体地，该概率约束条件可以重写为：

$$\Pr\{C_m - \max_{k \in \mathcal{K}} C_k \geqslant R_{\text{s}}\} \geqslant 1 - \varepsilon \tag{16}$$

令 $\varepsilon_k = 1 - (1-\varepsilon)^{1/K}$。由于：

$$\begin{aligned} & \Pr\{C_m - \max_{k \in \mathcal{K}} C_k \geqslant R_{\text{s}}\} \geqslant 1 - \varepsilon, \\ \Leftrightarrow & \prod_{k=1}^{K} \Pr\{C_m - C_k \geqslant R_{\text{s}}\} \geqslant 1 - \varepsilon, \\ \Leftrightarrow & \Pr\{C_m - C_k \geqslant R_{\text{s}}\} \geqslant 1 - \varepsilon_k, k \in \mathcal{K} \end{aligned} \tag{17}$$

关系式成立，所以可以通过求解如下优化问题（18）来获得优化问题（15）的可行解。

$$\begin{aligned} \max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{V}} \quad & R_{\text{s}}, \\ \text{s.t.} \quad & \Pr\{C_m - C_k \geqslant R_{\text{s}}\} \geqslant 1 - \varepsilon_k, \\ & k \in \mathcal{K}, \\ & \text{Tr}(\boldsymbol{W}) \leqslant P_{\text{s}}, \boldsymbol{W} \succeq 0, \\ & \text{Tr}(\boldsymbol{V}) \leqslant P_{\text{j}}, \boldsymbol{V} \succeq 0 \end{aligned} \tag{18}$$

不难发现，满足优化问题（18）的解一定是优化问题（15）的解。也就是说，通过求解优化问题（18）可以获得优化问题（15）的一组次优解。尽管很难获得优化问题（18）概率约束条件的闭合表达式，但是使用两种方法，即范数边界法和伯恩不等式法，能够将其近似地转化成确定的形式，进而获得该优化问题的一组近似解。

4.1 范数边界法

范数边界法的主要思想是，将涉及高斯信道不确定的概率约束条件转化为具有范数边界的约束条件，从而形成一个有界变量的优化问题求解。根据本文中相关 MISO 窃听信道下的合作干扰模型，$\tilde{\boldsymbol{h}}_k$ 作为 $\boldsymbol{h}_k$ 随机部分是一个均值为零的复高斯矢量，其协方差矩阵为 $\boldsymbol{H}_k = \alpha_k(\boldsymbol{I}_N - \boldsymbol{P}_k)$。所以，$\tilde{\boldsymbol{h}}_k$ 位于具有 $2N$ 维度椭球 $\mathcal{H}_k = \{\tilde{\boldsymbol{h}}_k : \tilde{\boldsymbol{h}}_k^H \boldsymbol{H}_k^{-1} \tilde{\boldsymbol{h}}_k \leqslant h_k^2\}$ 内的概率为：

$$\Pr\{\tilde{\boldsymbol{h}}_k \in \mathcal{H}_k\} = 1 - \varepsilon_k \tag{19}$$

其中：

$$h_k = \sqrt{\frac{\Phi_N^{-1}(1-\varepsilon_k)}{2}} \tag{20}$$

h_k 代表椭球不确定区域的大小。Φ_N^{-1} 是具有

$2N$ 自由度标准差为 1 的 χ^2 随机分布的累积概率密度的反函数。采用类似方法也可知，$\tilde{\boldsymbol{g}}_k$ 位于具有 $2L$ 维度椭球 $\mathcal{G}_k=\{\tilde{\boldsymbol{g}}_k:\tilde{\boldsymbol{g}}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{G}_k^{-1}\tilde{\boldsymbol{g}}_k\leqslant g_k^2\}$ 内的概率为：

$$\Pr\{\tilde{\boldsymbol{g}}_k\in\mathcal{G}_k\}=\sqrt{1-\varepsilon_k} \tag{21}$$

其中：

$$g_k=\sqrt{\frac{\Phi_L^{-1}(1-\varepsilon_k)}{2}} \tag{22}$$

g_k 指椭球不确定区域的大小。Φ_L^{-1} 是具有 $2L$ 自由度标准差为 1 的 χ^2 随机分布的累积概率密度的反函数。基于此，可得：

$$\begin{aligned}&C_m-C_k\geqslant R_s,\forall\tilde{\boldsymbol{h}}_k\in\mathcal{H}_k,\forall\tilde{\boldsymbol{g}}_k\in\mathcal{G}_k,\\&\forall k\in\mathcal{K}\Rightarrow\Pr\{C_m-C_k\geqslant R_{\mathrm{s}}\}\geqslant 1-\varepsilon_k,\forall k\in\mathcal{K}\end{aligned} \tag{23}$$

于是，优化问题（18）可以转化为：

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{V}}\quad & R_{\mathrm{s}},\\ \text{s.t.}\quad & C_m-C_k\geqslant R_{\mathrm{s}},\forall\tilde{\boldsymbol{h}}_k\in\mathcal{H}_k,\forall\tilde{\boldsymbol{g}}_k\in\mathcal{G}_k,\\ & \forall k\in\mathcal{K},\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{W})\leqslant P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{W}\succeq 0,\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{V})\leqslant P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{V}\succeq 0\end{aligned} \tag{24}$$

引入松弛变量 β，可得：

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{V}}\quad & \log\left(1+\frac{\boldsymbol{h}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{h}_d}{1+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{g}_d}\right)-\log\beta,\\ \text{s.t.}\quad & \max_{\tilde{\boldsymbol{h}}_k\in\mathcal{H}_k,\tilde{\boldsymbol{g}}_k\in\mathcal{G}_k}\frac{\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{h}_k}{1+\boldsymbol{g}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{V}\boldsymbol{g}_k}\leqslant\beta-1,\\ & \forall k\in\mathcal{K},\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{W})\leqslant P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{W}\succeq 0,\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{V})\leqslant P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{V}\succeq 0\end{aligned} \tag{25}$$

令 $\boldsymbol{W}=\boldsymbol{Q}/\xi,\boldsymbol{V}=\boldsymbol{S}/\xi,\xi>0$，于是可得：

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{Q},\boldsymbol{S}}\quad & \log\left(\frac{\xi+\boldsymbol{h}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{h}_d+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d}{\beta(\xi+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d)}\right),\\ \text{s.t.}\quad & \max_{\tilde{\boldsymbol{h}}_k\in\mathcal{H}_k,\tilde{\boldsymbol{g}}_k\in\mathcal{G}_k}\frac{\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{h}_k}{\xi+\boldsymbol{g}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_k}\leqslant\beta-1,\\ & \forall k\in\mathcal{K},\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{Q})\leqslant\xi P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{Q}\succeq 0,\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{S})\leqslant\xi P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{S}\succeq 0,\xi\geqslant 0\end{aligned} \tag{26}$$

注意在优化问题（26）中，约束条件 $\xi>0$ 被替换成了 $\xi\geqslant 0$。需要指出的是，这种替换不会影响问题的求解结果。这是因为，变量 ξ 在该优化问题中一定为正（否则 $\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{S}=0$）。由于 log 函数是一个单调增函数，因此可得：

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{Q},\boldsymbol{S}}\quad & \log\left(\frac{\xi+\boldsymbol{h}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{h}_d+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d}{\beta(\xi+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d)}\right),\\ \text{s.t.}\quad & \max_{\tilde{\boldsymbol{h}}_k\in\mathcal{H}_k,\tilde{\boldsymbol{g}}_k\in\mathcal{G}_k}\frac{\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{h}_k}{\xi+\boldsymbol{g}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_k}\leqslant\beta-1,\\ & \forall k\in\mathcal{K},\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{Q})\leqslant\xi P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{Q}\succeq 0,\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{S})\leqslant\xi P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{S}\succeq 0,\xi\geqslant 0\end{aligned} \tag{27}$$

其中，$\Sigma_d=\boldsymbol{Q}-(\beta-1)\boldsymbol{S}$。进行 Charnes-Cooper 变换[29]，可得：

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{Q},\boldsymbol{S}}\quad & \xi+\boldsymbol{h}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{h}_d+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d,\\ \text{s.t.}\quad & \beta(\xi+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d)\leqslant 1,\\ & \max_{\tilde{\boldsymbol{h}}_k\in\mathcal{H}_k}\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{h}_k\leqslant a_k,\\ & \min_{\tilde{\boldsymbol{g}}_k\in\mathcal{G}_k}\xi+\boldsymbol{g}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_k\geqslant b_k,\\ & a_k\leqslant b_k(\beta-1),\forall k\in\mathcal{K},\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{Q})\leqslant\xi P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{Q}\succeq 0,\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{S})\leqslant\xi P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{S}\succeq 0,\xi\geqslant 0\end{aligned} \tag{28}$$

应用 S-procedure[30]，可得

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{Q},\boldsymbol{S}}\quad & \xi+\boldsymbol{h}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{h}_d+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d,\\ \text{s.t.}\quad & \beta(\xi+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d)\leqslant 1,\\ & \begin{bmatrix}\lambda_i\boldsymbol{H}_k^{-1}-\boldsymbol{Q} & -\boldsymbol{Q}\bar{\boldsymbol{h}}_k\\ -\bar{\boldsymbol{h}}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q} & a_k-\bar{\boldsymbol{h}}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\bar{\boldsymbol{h}}_k-\lambda_i h_k^2\end{bmatrix}\succeq 0,\\ & \begin{bmatrix}\lambda_r\boldsymbol{G}_k^{-1}+\boldsymbol{S} & \boldsymbol{S}\bar{\boldsymbol{g}}_k\\ \bar{\boldsymbol{g}}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S} & \bar{\boldsymbol{g}}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\bar{\boldsymbol{g}}_k-b_k+\xi-\lambda_r g_k^2\end{bmatrix}\succeq 0,\\ & a_k\leqslant b_k(\beta-1),a_k\geqslant 0,b_k\geqslant 0,\forall k\in\mathcal{K}\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{Q})\leqslant\xi P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{Q}\succeq 0,\\ & \mathrm{Tr}(\boldsymbol{S})\leqslant\xi P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{S}\succeq 0,\\ & \xi\geqslant 0,\lambda_i\geqslant 0,\lambda_r\geqslant 0,i,r\in\mathcal{K}\end{aligned} \tag{29}$$

其中，$\lambda_i\geqslant 0,\lambda_r\geqslant 0,i,r\in\mathcal{K}$ 是松弛变量。当 β 固定时，该优化问题是一个半正定规划问题。因此，

该优化问题的最佳解 $\boldsymbol{Q}^*$ 和 $\boldsymbol{S}^*$ 能够通过联合使用半正定规划和对 β 的一维线性搜索求出。基于参考文献[31]，β 的线性搜索的区间为 $[1,1+P_{\mathrm{s}}\|\boldsymbol{h}_d\|^2]$。于是，优化问题（18）的一组次最优解可以通过 $\boldsymbol{W}^*=\boldsymbol{Q}^*/\xi$ 和 $\boldsymbol{V}^*=\boldsymbol{S}^*/\xi$ 求出。

4.2 伯恩不等式法

伯恩不等式法也能够将优化问题（18）中的概率约束条件转化成确定的形式。具体地，该优化问题的概率约束条件通过引入中间变量 Γ_e，可得：

$$\Pr\left\{\frac{\boldsymbol{h}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{W}\boldsymbol{h}_k}{1+\boldsymbol{g}_k^{H}\boldsymbol{V}\boldsymbol{g}_k}\leqslant\Gamma_e\right\}\geqslant 1-\varepsilon_k,\forall k\in\mathcal{K} \tag{30}$$

其中：

$$\Gamma_e\leqslant\frac{1+\gamma_d}{2^{R_{\mathrm{s}}}}-1 \tag{31}$$

根据本文建立的相关 MISO 窃听信道下的合作干扰模型，窃听信道 $\boldsymbol{h}_k$ 由两部分组成：确定的部分 $\bar{\boldsymbol{h}}_k$ 和统计的部分 $\tilde{\boldsymbol{h}}_k$。同时，窃听信道 $\boldsymbol{g}_k$ 也由确定的部分 $\bar{\boldsymbol{g}}_k$ 和统计的部分 $\tilde{\boldsymbol{g}}_k$ 组成。于是可得：

$$\begin{aligned}&\Pr\left\{\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{h}}_k\\ \tilde{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix}^{\mathrm{H}}\mathrm{diag}\{\boldsymbol{W},-\Gamma_e\boldsymbol{V}\}\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{h}}_k\\ \tilde{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix}+2\mathrm{Re}\left(\begin{bmatrix}\tilde{\boldsymbol{h}}_k\\ \tilde{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix}^{\mathrm{H}}\right.\right.\\&\left.\left.\mathrm{diag}\{\boldsymbol{W},-\Gamma_e\boldsymbol{V}\}\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{h}}_k\\ \bar{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix}\right)+\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{h}}_k\\ \bar{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix}^{\mathrm{H}}\right.\\&\left.\mathrm{diag}\{\boldsymbol{W},-\Gamma_e\boldsymbol{V}\}\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{h}}_k\\ \bar{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix}\right\}\geqslant 1-\varepsilon_k\end{aligned} \tag{32}$$

令：

$$\Lambda_k=\mathrm{diag}\{\boldsymbol{H}_k^{1/2}\boldsymbol{W}\boldsymbol{H}_k^{1/2},-\Gamma_e\boldsymbol{G}_k^{1/2}\boldsymbol{V}\boldsymbol{G}_k^{1/2}\} \tag{33}$$

$$\boldsymbol{a}_k=\mathrm{diag}\{\boldsymbol{H}_k^{1/2}\boldsymbol{W},-\Gamma_e\boldsymbol{G}_k^{1/2}\boldsymbol{V}\}\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{h}}_k\\ \bar{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix} \tag{34}$$

$$\boldsymbol{x}_k\sim\mathcal{CN}(\boldsymbol{0},\boldsymbol{I}_{N+L}) \tag{35}$$

$$c_k=\Gamma_e-\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{h}}_k\\ \bar{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix}^{\mathrm{H}}\mathrm{diag}\{\boldsymbol{W},-\Gamma_e\boldsymbol{V}\}\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{h}}_k\\ \bar{\boldsymbol{g}}_k\end{bmatrix} \tag{36}$$

于是，式（32）可以简化为：

$$\Pr\{\boldsymbol{x}_k^{\mathrm{H}}\Lambda_k\boldsymbol{x}_k+\boldsymbol{x}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}_k\geqslant c_k\}\leqslant\varepsilon_k \tag{37}$$

根据参考文献[32]，涉及矩阵高斯变量二次型的概率不等式能够得到其尾部概率的边界。基于此，概率约束条件（37）可以转化为：

$$\begin{aligned}&\mathrm{Tr}(\Lambda_k)+\sqrt{2\sigma_k}\sqrt{\|\mathrm{vec}(\Lambda_k)\|^2+2\|\boldsymbol{a}_k\|^2}+\\&\sigma_k s^{+}(\Lambda_k)\leqslant c_k,\forall k\in\mathcal{K}\end{aligned} \tag{38}$$

其中，$\sigma_k=-\ln(\varepsilon_k)$。换句话说，如果式（38）成立，那么概率约束条件式（37）也一定成立。于是，优化问题（18）可以保守地转化为：

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{V}}\quad&R_{\mathrm{s}},\\ \text{s.t.}\quad&(38),\\&\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W})\leqslant P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{W}\succeq 0,\\&\mathrm{Tr}(\boldsymbol{V})\leqslant P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{V}\succeq 0\end{aligned} \tag{39}$$

该优化问题等价于：

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{W},\boldsymbol{V}}\quad&R_{\mathrm{s}},\\ \text{s.t.}\quad&\mathrm{Tr}(\Lambda_k)+\sqrt{2\sigma_k}\mu_k+\sigma_k\nu_k\leqslant c_k,\\&\left\|\begin{matrix}\mathrm{vec}(\Lambda_k)\\ \sqrt{2}\boldsymbol{a}_k\end{matrix}\right\|\leqslant\mu_k,\forall k\in\mathcal{K},\\&\nu_k\boldsymbol{I}_{N+L}-\Lambda_k\succeq 0,\nu_k\geqslant 0,\\&\forall k\in\mathcal{K},\\&\mathrm{Tr}(\boldsymbol{W})\leqslant P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{W}\succeq 0,\\&\mathrm{Tr}(\boldsymbol{V})\leqslant P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{V}\succeq 0\end{aligned} \tag{40}$$

其中，μ_k 和 ν_k 为松弛变量。由于 c_k 与变量 Γ_e 有关，所以该优化问题是非凸的。幸运地是，该优化问题可以通过 Charnes-Cooper 变换和变量替换转化成一个半正定规划问题[29]。具体地，令 $\Lambda_k=\bar{\Lambda}_k/\xi$，$\mu_k=\bar{\mu}_k/\xi$，$\nu_k=\bar{\nu}_k/\xi$，$c_k=\bar{c}_k/\xi$，$\xi>0$，$\eta=2^{R_{\mathrm{s}}}$，以及 $\boldsymbol{W}=\boldsymbol{Q}/\xi,\boldsymbol{V}=\boldsymbol{S}/\xi$，并考虑到 $\Gamma_e\leqslant(1+\gamma_d)/2^{R_{\mathrm{s}}}-1$，可得：

$$\begin{aligned}\max_{\boldsymbol{Q},\boldsymbol{S}}\quad&\eta,\\ \text{s.t.}\quad&\mathrm{Tr}(\bar{\Lambda}_k)+\sqrt{2\sigma_k}\bar{\mu}_k+\sigma_k\bar{\nu}_k\leqslant\bar{c}_k,\\&\left\|\begin{matrix}\mathrm{vec}(\bar{\Lambda}_k)\\ \sqrt{2}\bar{\boldsymbol{a}}_k\end{matrix}\right\|\leqslant\bar{\mu}_k,\forall k\in\mathcal{K},\\&\bar{\nu}_k\boldsymbol{I}_{N+L}-\bar{\Lambda}_k\succeq 0,\bar{\nu}_k\geqslant 0,\forall k\in\mathcal{K},\\&\boldsymbol{h}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{Q}\boldsymbol{h}_d\geqslant(\Gamma_e+1)\eta-1,\\&\xi+\boldsymbol{g}_d^{\mathrm{H}}\boldsymbol{S}\boldsymbol{g}_d\leqslant 1,\xi\geqslant 0,\\&\mathrm{Tr}(\boldsymbol{Q})\leqslant\xi P_{\mathrm{s}},\boldsymbol{Q}\succeq 0,\\&\mathrm{Tr}(\boldsymbol{S})\leqslant\xi P_{\mathrm{j}},\boldsymbol{S}\succeq 0\end{aligned} \tag{41}$$

尽管该优化问题仍然是一个非凸的问题，但是当 Γ_e 固定时，该问题确实是一个半正定规划问题。因此，该优化问题能够通过联合使用半正定规划和对 Γ_e 的一维线性搜索求出。基于参考文献 [33]，对 Γ_e 的一维线性搜索的区间是 $[0, P_s \| \boldsymbol{h}_d \|^2]$。注意：在该优化问题中，约束条件 $\xi > 0$ 被替换成了 $\xi \geqslant 0$，并且这种替换不影响其结果。这是因为，变量 ξ 在该优化问题中一定为正，否则 $\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{S} = 0$。基于优化问题（41）的解 $\boldsymbol{Q}^*$ 和 $\boldsymbol{S}^*$，可得优化问题（18）的次优解 $\boldsymbol{W}^*$ 和 $\boldsymbol{V}^*$。

5　波束成形矢量的恢复

通过上述的范数边界法和伯恩不等式法，能够求出优化问题(18)的一组次最优解 $\boldsymbol{W}^*$ 和 $\boldsymbol{V}^*$。由于求解过程进行了秩松弛，所以不能确保获得的 $\boldsymbol{W}^*$ 是秩为 1 的复厄密特矩阵。如果矩阵 $\boldsymbol{W}^*$ 是秩为 1 的复厄密特矩阵，则能够通过奇异值分解求出波束成形矢量 $\boldsymbol{w}^*$，作为原始优化问题（13）的近似解。如果 $\boldsymbol{W}^*$ 不是秩为 1 的复厄密特矩阵，则能够通过随机高斯方法[33]，从 $\boldsymbol{W}^*$ 恢复一个近似的波束成形矢量 $\boldsymbol{w}^*$。

6　复杂度分析

当采用范数边界法通过内点法对优化问题（29）进行求解时，对于固定的 β，在精度为 ϵ_1 限制下，需要的迭代次数的阶数为 $C_1 = \ln(1/\epsilon_1) \cdot \sqrt{2KN + 2KL + 9K + 2N + 2L + 4}$，每次迭代的计算复杂度阶数为 $C_2 = 8nK(N+1)^3 + 4n^2K(N+1)^2 + 8nK(L+1)^3 + 4n^2K(L+1)^2 + 8nN^3 + 4n^2N^2 + 8nL^3 + 4n^2L^2 + (n^2+n) \times (5K+4)\big]$，其中，$n = \mathcal{O}(8N^2)$。另外，对 β 的一维线性搜索的复杂度为 $C_3 = P_s \| \boldsymbol{h}_d \|^2 / \epsilon_2$，其中，$\epsilon_2$ 指搜索精度。综上，优化问题（29）求解的总复杂度为 $\mathcal{O}_w = C_1 \times C_2 \times C_3$。

当采用伯恩不等式法通过内点法对优化问题（41）进行求解时，对于固定的 Γ_e，在精度为 ϵ_3 限制下，需要的迭代次数的阶数为 $C_4 = \ln(1/\epsilon_3) \cdot \sqrt{2K(N+L) + 3K + 2N + +2L + 4}$，每次迭代的计算复杂度阶数为 $C_5 = 8nK(N+L)^3 + 4n^2K(N+L)^2 + 8nN^3 + 4n^2N^2 + 8nL^3 + 4n^2L^2 + (n^2+n)(K+4) + nK[2(N+L)^2 + 2(N+L) + 1]^2$，其中 $n = \mathcal{O}(8N^2)$。另外，对 β 的一维线性搜索的复杂度为 $C_6 = P_s \| \boldsymbol{h}_d \|^2 / \epsilon_4$，其中，$\epsilon_4$ 指搜索精度。综上，优化问题（41）求解的总复杂度为 $\mathcal{O}_b = C_4 \times C_5 \times C_6$。

7　仿真结果与分析

本节通过仿真评估采用的基于相关性的合作干扰方案获得保密性能，包括信道功率相关系数期望值、保密中断概率、信源和合作干扰节点的发射功率以及窃听节点数量对保密性能影响。为了更加容易地看出性能增益，本节也对传统的合作干扰方法（波束成形矢量与主信道方向一致，人工噪声均匀散布在从 Jammer 到 Bob 信道的零空间）进行了仿真。本文使用 ρ 表示合法信道与窃听信道的功率相关系数的期望值，同时假设合法信道和窃听信道的各对子信道之间的功率相关系数服从均匀分布且从 $[\rho - 0.1, \rho + 0.1]$ 中抽样产生。另外，主信道的增益方差 α_d^2 设置为 1。由于从 Alice 到各个 Eve 的距离不同，同时考虑到 Eve 潜伏在 Bob 附近，因此，假定窃听信道方差为 α_k^2，$k \in \mathcal{K}$，且 α_k 服从均匀分布并从 $[\alpha_d - 0.05, \alpha_d + 0.05]$ 中抽样产生。合法干扰信道增益方差 β_d^2 设置为 2。由于从 Jammer 到各个 Eve 的距离不同，同时考虑到 Eve 潜伏在 Bob 附近，因此，假定窃听信道方差为 $\beta_k^2, k \in \mathcal{K}$，且 β_k 服从均匀分布并从 $[\beta_d - 0.1, \beta_d + 0.1]$ 中抽样产生。本文在仿真途中使用“传统、范数和伯恩”分别指传统波束成形方法、范数边界法、伯恩不等式法；N 和 M 分别指 Alice 和 Eve 配有的天线数。

功率相关系数期望值与可实现的保密速率的

关系如图 2 所示，本文对功率相关系数期望值 ρ 和可实现的保密速率 R_s 的关系进行了仿真。仿真中，一些参数设置如下：$\varepsilon = 0.15$，$P_s = 15$ dBW，$P_j = 10$ dBW，$L = 4$，$K = 2$。图 2 显示 R_s 的变化依赖于 ρ。可以看出，传统波束成形方法的 R_s 随 ρ 的增加迅速下降。这主要是因为，主窃信道之间的相关性会损害通信系统的保密性。在仿真图中，范数边界法和伯恩不等式法的 R_s 随 ρ 的增加而提高，并且 ρ 较大时 R_s 增长速度更快。其原因是，当 ρ 较低时，窃听信道的随机部分所占部分过大，这导致从概率约束条件到其确定形式的转化不够保守。图 2 也显示相比传统波束成形方法，当 ρ 较高时范数边界法和伯恩不等式法实现了更高的 R_s。这是因为，主窃信道之间的高相关性暗示了更多窃听信道的信道状态信息，这使得优化合作干扰设计更加有效。同时也看到，当 Alice 具有更多发射天线时，R_s 增长十分明显。其原因是，通过提升空间自由度，能够有效地扩大 Bob 和 Eve 处接收信号的质量差距。通过比较，可以发现，当 Alice 具有更多发射天线时，范数边界法和伯恩不等式法的优势相比传统波束成形方法更加明显。

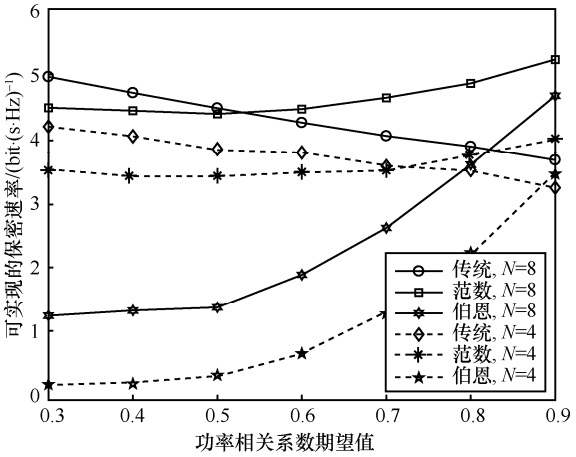


图 2　功率相关系数期望值与可实现的保密速率的关系

保密中断概率与可实现的保密速率的关系如图 3 所示，呈现了保密中断概率 ε 与可实现的保密速率 R_s 的仿真关系。仿真中，一些参数设置如下：$\rho = 0.7$，$P_s = 15$ dBW，$P_j = 10$ dBW，$L = 4$，$K = 2$。图 3 显示 ε 的增加会引起 R_s 的增加，这与已有的通信知识一致。另外，图 3 与图 2 所得的结论一致，当 Alice 具有更多发射天线时，范数边界法和伯恩不等式法能够取得更好的性能。

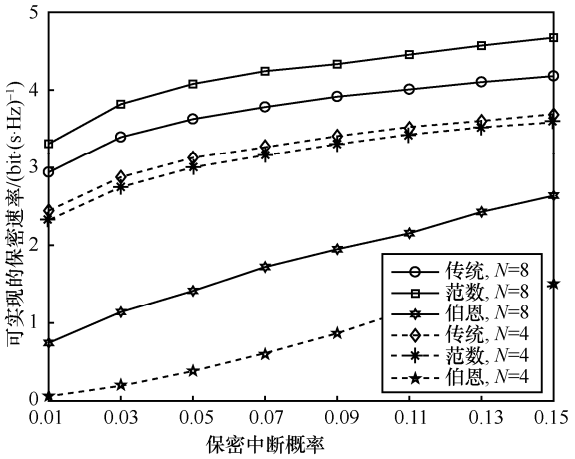


图 3　保密中断概率与可实现的保密速率的关系

Eve 的数量 K 与可实现的保密速率 R_s 的仿真关系如图 4 所示。仿真中，一些参数设置如下：$\rho = 0.7$，$P_s = 15$ dBW，$P_j = 10$ dBW，$L = 4$，$\varepsilon = 0.15$。从图 4 中，很容易发现对于所有曲线，K 的增加会导致 R_s 快速下降，但下降速度会逐渐变慢。图 4 的仿真结果显示 Eve 的数量 K 的增加会有损通信的保密性能。其原因是，随着 Eve 的数量 K 的增加，有一个较好条件的窃听信道概率会增加。另外，图 4 的仿真结果再次证实，Alice 具有更多发射天线对于范数边界法和伯恩不等式法而言更加有利。

综合来看图 2 至图 4，范数边界法一般要优于伯恩不等式法和传统的合作干扰方法。并且，这些方法获得的性能增益取决于功率相关系数期望值、保密中断概率和 Eve 数量的具体取值。究其原因是，范数边界法和伯恩不等式法是通过近似手段将概率约束条件转化成确定形式的，而其近似程度与上述变量的取值密切相关。

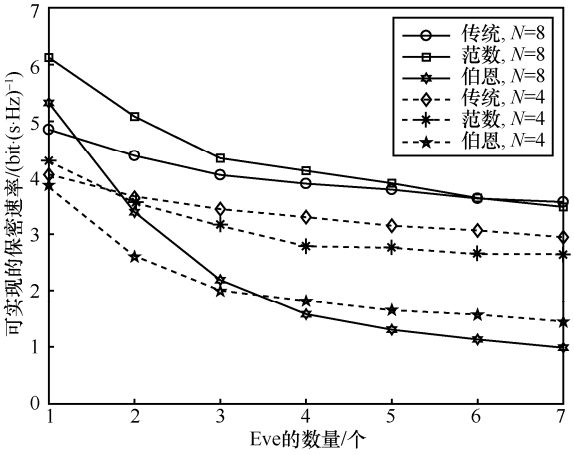


图 4　Eve 的数量与可实现的保密速率的关系

8　结束语

本文针对采用合作干扰的相关 MISO 窃听信道，提出了一种基于相关性的合作干扰方案，能够在一定条件下提升在保密中断概率约束下的保密速率。首先，建立了相关 MISO 窃听信道下的合作干扰模型，并形成一个在保密中断概率约束下的保密速率最大化问题。为了求解该问题，采用范数边界法和伯恩不等式法将概率约束条件近似保守地转化成确定的形式，进而将该优化问题转化为一个凸优化问题并获得了波束成形矢量和人工噪声协方差的一组近似解。根据仿真结果，在主窃信道相关性较高时，提出的基于相关性的合作干扰方案相比传统方案，能够获得较高保密速率增益。并且，提出的合作干扰方案在发射者具有更多天线时优势更加明显。

参考文献：

[1] SUN W, LIU J, YUE Y, et al. Double auction-based resource allocation for mobile edge computing in industrial internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics , 2018, 14(10): 4692-4701.

[2] JAMEEL F, WYNE S, KADDOUM G, et al. A comprehensive survey on cooperative relaying and jamming strategies for physical layer security[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2734-2771.

[3] LIU Y, CHEN H, WANG L. Physical layer security for next generation wireless networks: theories, technologies, and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 347-376.

[4] LV L, ZHOU F, CHEN J, et al. Secure cooperative communications with an untrusted relay: a NOMA-inspired jamming and relaying approach[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2019, 14(12): 3191–3205.

[5] NG K, LO E, SCHOBER R. Secure resource allocation and scheduling for OFDMA decode-and-forward relay networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(10): 3528-3540.

[6] DING Z, LEUNG K, GOECKEL D, et al. On the application of cooperative transmission to secrecy communications[J]. IEEE Journal On Selected Areas in Communications, 2012, 30(2): 359-368.

[7] YAN S, YANG N, LAND I, et al. Three artificial-noise-aided secure transmission schemes in wiretap channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(4): 3669-3673.

[8] ZHANG H, XING H, CHENG J, et al. Secure resource allocation for OFDMA two-way relay wireless sensor networks without and with cooperative jamming[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2016 12(5): 1714-1725.

[9] DENG H, WANG H, GUO W, et al. Secrecy transmission with a helper: to relay or to jam[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2015, 10(2): 293–307.

[10] JIANG X, LIN H, ZHONG C, et al. Proactive eavesdropping in relaying systems[J]. IEEE Signal Processing Letter, 2017, 24(6): 917-921.

[11] ZOU Y L, WANG X B, SHEN W M, et al. Security versus reliability analysis of opportunistic relaying[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(6): 2653-2661.

[12] LIU J, LIU Z, ZENG Y, et al. Cooperative jammer placement for physical layer security enhancement[J]. IEEE Network, 2016, 30(6): 56-61.

[13] YANG L, CHEN J, JIANG H, et al. Optimal relay selection for secure cooperative communications with an adaptive eavesdropper[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(1): 26-42.

[14] CHEN X, ZHONG C, YUEN C, et al. Multi-antenna relay aided wireless physical layer security[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53 (12): 40-46.

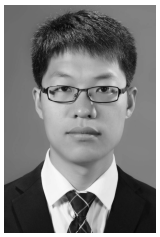
[15] LIU Y W, WANG L F, DUY T T, et al. Relay selection for security enhancement in cognitive relay networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2015, 4(1): 46-49.

[16] PEI M Y, SWINDLEHURST A L, MA D T, et al. Adaptive limited feedback for MISO wiretap channels with cooperative jamming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(4): 993-1004.

[17] LIU Y, LI L, ALEXANDROPOULOS G, et al. Securing relay networks with artificial noise: an error performance-based approach[J]. Entropy, 2017, 19(8): 384.

[18] CUMANAN K, ALEXANDROPOULOS G, KARAGIANNIDIS. Secure communications with cooperative jamming: optimal power allocation and secrecy outage analysis[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 7495-7505.
[19] FAN L, LEI X, DUONG T Q, et al. Secure multiuser communications in multiple amplify-and-forward relay networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(9): 3299-3310.
[20] JEON H, KIM N, CHOI J, et al. Bounds on secrecy capacity over correlated ergodic fading channels at high SNR[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(4): 1975-1983.
[21] SUN X J, WANG J H, XU W, et al. Performance of secure communications over correlated fading channels[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(8): 479-482.
[22] FERDINAND N S, DA COSTA D B, DE ALMEIDA A L F, et al. Physical layer secrecy performance of TAS wiretap channels with correlated main and eavesdropper channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(1): 86-89.
[23] FAN L S, ZHAO R, GONG F K, et al. Secure multiple amplify-and-forward relaying over correlated fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 65(7): 2811-2820.
[24] FAN L, LEI X, YANG N, et al. Secrecy cooperative networks with outdated relay selection over correlated fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 7599-7603.
[25] XU S, HAN S, DU Y, et al. AN-aided secure beamforming design for correlated MISO wiretap channels[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(4): 628-631.
[26] ZHENG G, KRIKIDIS I, LI J Y, et al. Improving physical layer secrecy using full-duplex jamming receivers[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(20): 4962-4974.
[27] XU S, HAN S, MENG W X, et al. Multiple-jammer-aided secure transmission with receiver-side correlation[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(6): 3093-3103.
[28] XU S, HAN S, MENG W X, et al. Correlation-based secure transmission for correlated MISO wiretap channels[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(3): 302-305.
[29] CHARNES A, COOPER W W. Programming with linear fractional functionals[J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1962, 9(3/4): 181-186.
[30] BOYD S, VANDENBERGHE L. Convex Optimization[M]. UK: Cambridge University Press, 2004.
[31] TANG Y Q, XIONG J, MA D T, et al. Robust artificial noise aided transmit design for MISO wiretap channels with channel uncertainty[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(11): 2096-2099.
[32] MA S, HONG M Y, SONG E B, et al. Outage constrained robust secure transmission for MISO wiretap channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(10): 5558-5570.
[33] WANG K Y, SO A 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, 2014, 62(21): 5690-5705.

[作者简介]



徐赛（1987− ），男，博士，哈尔滨工业大学副教授，主要研究方向为物理层安全、移动通信技术和空天通信技术。

韩帅（1981− ），男，博士，哈尔滨工业大学教授，主要研究方向为无线信号处理、MIMO、非正交多址接入和卫星定位导航及对抗等。

孟维晓（1968− ），男，博士，哈尔滨工业大学电子与信息工程学院副院长、长聘教授、博士生导师，主要研究方向为无线通信与网络、空天地信息传输、精确定位与无缝导航。