doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.03.006

多天线半双工中继系统的隐蔽通信

尹黄江，杨　玲，胡久松，贺正芸

（湖南工业大学 轨道交通学院，湖南 株洲 412007）

摘　要：基于译码转发中继探究了多天线半双工中继系统的隐蔽通信，即以装配有多天线的源节点分别在两个阶段中以迫零波束赋形（ZFB）和随机选择干扰（RSJ）的传输方案扰乱 Willie 检测，从而保护隐蔽信息的传输。首先，推导了 Willie 在两个阶段中的最优检测阈值和最小检测错误概率；其次，基于平均最小检测错误概率约束的情况下，推导、分析和优化了第一阶段源节点的发射功率和第二阶段中继节点的转发功率，并获取了各阶段的最大有效隐蔽速率；最后，根据各阶段的隐蔽性能指标，推导了系统总的传输中断概率和最大有效隐蔽速率。实验结果表明，当天线数量 $n \geqslant 3$ 时，系统总的传输中断概率随着天线数量的增加而减小，并且系统总的最大有效隐蔽速率同第二阶段相同。

关键词：迫零波束赋形；随机选择干扰；多天线；传输中断概率；最大有效隐蔽速率

中图分类号：TN918　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9833(2025)03-0039-09

引文格式：尹黄江，杨　玲，胡久松，等. 多天线半双工中继系统的隐蔽通信 [J]. 湖南工业大学学报，2025，39(3)：39-47.

Covert Communication of Multi-Antenna Half-Duplex Relay Systems

YIN Huangjiang，YANG Ling，HU Jiusong，HE Zhengyun

（College of Railway Transportation，Hunan University of Technology，Zhuzhou Hunan 412007，China）

Abstract：An investigation is made of a multi-antenna half-duplex relay covert communication system based on decoding and forwarding relay.By using a source node equipped with multiple antennas, the Willie detection is disrupted in two stages through transmission schemes of zero forcing beamforming (ZFB) and randomized selection jamming (RSJ), respectively, so as to protect the transmission of covert information. Firstly, the optimal detection threshold and minimum detection error probability of Willie in two stages are to be derived. Secondly, based on the constraint of average minimum detection error probability, the transmission power of the source node in the first stage and the forwarding power of the relay node in the second stage are derived, analyzed, and optimized, thus obtaining the maximum effective covert rate of each stage. Finally, based on the steganographic performance metrics of each stage, the total transmission interruption probability and the total maximum effective steganographic rate of the system can be derived. The experimental results show that when the number of antennas is no less than 3, the total transmission interruption probability of the system decreases with the increase in the number of antennas, and the total maximum effective steganographic rate of the system is the same as that of the second stage.

Keywords：zero-forcing beamforming；randomized selection jamming；multiple antennae；transmission outage probability；maximum effective steganographic rate

---

收稿日期：2024-02-26

基金项目：湖南省自然科学基金资助项目（2021JJ50051）

作者简介：尹黄江，男，湖南工业大学硕士生，主要研究方向为隐蔽通信，E-mail：huangjiangyin02@126.com

通信作者：杨　玲，女，湖南工业大学讲师，博士，硕士生导师，主要研究方向为隐蔽通信和物理层安全，E-mail：LingYang0523@126.com

0 引言

随着物联网技术的飞速发展，用户间通信隐私的保护越来越受到重视，然而由于无线通道的广播特性，使得合法通信极易受到攻击 [1]。因此，合法用户希望在军用和民用的通信场景中，使得通信行为不被检测者发现。在这一背景下，许多研究人员在隐蔽通信方面做出了开创性工作，为通信安全提供了更多的可能性。经典的短距离隐蔽通信场景中，B. A. Bash 等 [2] 证明了在加性高斯白噪声信道（additive white gaussian noise，AWGN）中，Alice 在 N 个信道上最多隐蔽可靠地向 Bob 传输 $O\left(\sqrt{N}\right)$ 比特。此外，许多学者通过引入不确定性扰乱 Willie 检测，从而实现通信系统的隐蔽传输。如 S. Lee 等 [3] 通过使用多天线增强噪声不确定性，以实现正隐蔽速率。Xiang W. Y. 等 [4] 证明了当发射机配备一定的天线数量时，系统可以实现正的隐蔽速率，Yang L.[5] 和 O. Shmuel[6] 等从 Willie 是否已知信道状态信息，分析系统的有效隐蔽速率。同时，文献 [7] 和 [8] 利用迫零波束赋形（zero-forcing beamforming，ZFB）的传输方案来实现隐蔽通信。Tao L. W. 等 [9] 进一步分析了不同传输方案下的最大有效隐蔽速率。与此不同的是，Hu J. S. 等 [10] 研究了同时增加合法接收者和检测者的噪声不确定性，发现其并不一定能够提升系统的隐蔽速率。而针对远距离隐蔽通信场景，研究者们考虑通过双跳乃至多跳中继网络来实现隐蔽通信。例如 Gao C. 等 [11] 通过协同干扰和中继选择，探讨了源和中继的最佳发射功率。B. Rankov 等 [12] 分析了两个半双工（half-duplex，HD）交替传输下的隐蔽传输速率。Liu Y. 等 [13] 比较了不同传输模式和转发模式下，不同组合的最大隐蔽速率。

上述研究聚焦于多天线、HD 和译码转发中继等隐蔽通信场景，且通过引入随机干扰以实现隐蔽通信。然而利用多天线、HD、协同技术实现远距离隐蔽通信仍然有待于进一步研究，具体表现在：

1）如何在远距离通信中，设计多天线隐蔽通信协同传输方案，以增加检测链路的不确定性？

2）在多天线半双工的隐蔽通信系统中，如何控制和优化隐蔽消息发送功率的大小，使其在检测者的检测错误概率和合法用户的吞吐量间达到折中？

因此，如何充分考虑隐蔽通信结合多天线、半双工和协同技术，从多角度支撑高可靠的隐蔽通信方法至关重要。

本课题主要研究了基于多天线协同人工干扰的隐蔽通信方法及其性能，构建了多天线半双工中继系统的无线通信模型，以寻求不同传输方案下最优的隐蔽消息传输功率，实现系统隐蔽性能与检测性能的平衡，从而增强系统的隐蔽能力。本文的主要工作和贡献如下：

1）在检测者 Willie 已知与自身相关链路的信道状态信息时，为确保多天线半双工中继系统的隐蔽性，提出了利用源节点分别采用 ZFB 和随机选择干扰（randomized selection jammer，RSJ）的传输方案，为系统的两个阶段引入干扰，从而降低 Willie 的检测性能。同时，对比了 Alice 配备双天线且采用随机干扰的传输方案下系统的隐蔽性能，为类似研究工作提供有效参考模型。

2）首先，分别推导并且分析了两个阶段 Willie 的平均最小检测错误概率。其次，为了探究系统的隐蔽性能，推导了两个阶段的传输中断概率、最大有效隐蔽速率的表达式，并优化了 Alice 的发送功率和 Relay 的转发功率。最后，基于前面两个阶段的结论，进一步推导、分析系统总的传输中断概率和最大有效隐蔽速率。理论推导和系统仿真结果表明，系统总的最大有效隐蔽速率随着单根天线最大人工干扰功率的增大而增大，且同第二阶段的最大有效隐蔽速率相同。

1 系统模型

1.1 场景与假设

本文考虑的多天线半双工中继系统的隐蔽通信模型如图 1 所示，系统由一个发送者（Alice）、一个接收者（Bob）、一个 HD 中继（Relay）和一个 Willie 组成，此外，Alice 配备多根天线，其余节点均配备单天线。图中 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}$ 和 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{ar}}$ 分别为 Alice 与 Willie 和 Relay 间的信道，h_{rw} 和 h_{rb} 分别为 Relay 与 Willie 和 Bob 间的信道。由于距离因素，Alice 需要由中继 Relay 节点译码转发隐蔽消息给 Bob，而 Willie 为了避免被 Bob 发现，会远离 Bob 来检测 Alice 和 Relay 是否传输消息。即 Alice 尝试在 Relay 的辅助下将消息传输给 Bob，而 Willie 尝试检测 Alice 是否传输隐蔽消息给 Bob。

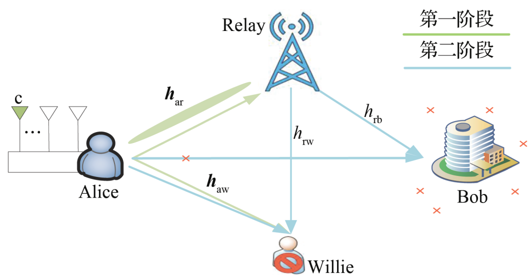


图 1 多天线半双工中继系统模型

Fig. 1 Multi-antenna half-duplex relay system model

要确保整个通信过程的隐蔽性，必须保证通信的两个阶段都没有被 Willie 检测到，才能说明实现了隐蔽传输，即确保 Alice-Relay 和 Relay-Bob 间的通信都不被 Willie 检测到。Alice 的第 m 根天线和 Relay 之间的信道用 $h_{\mathrm{a}_m\mathrm{r}}$ 表示，其中，m=1, 2, ⋯, n。考虑较坏情况，假设 Willie 知道 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}=\left[h_{\mathrm{a_1w}},\ h_{\mathrm{a_2w}},\ \cdots,\ h_{\mathrm{a}_n\mathrm{w}}\right]^{\mathrm{T}}$ 和 h_{rw}，Relay 知道 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{ar}}=\left[h_{\mathrm{a_1r}},\ h_{\mathrm{a_2r}},\ \cdots,\ h_{\mathrm{a}_n\mathrm{r}}\right]^{\mathrm{T}}$，Bob 知道 h_{rb}。但是由于 Relay 和 Bob 不知道 Willie 的存在信息，因此假设 Relay 和 Bob 不知道 $\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}$、$h_{\mathrm{rw}}$。此外，$\lambda_{\mathrm{ar}}$、$\lambda_{\mathrm{aw}}$、$\lambda_{\mathrm{rw}}$ 和 λ_{rb} 分别为两个用户间信道小尺度衰落均值。假设无线信道经历独立的准静态瑞利衰落，且信道在一个时隙内随机且独立。

为了降低 Willie 的检测质量，在第一个阶段中，Alice 选择一根最优天线向 Relay 发送隐蔽消息，假设 Alice 所选用的最优天线为 c，即 $c=\arg\max\left|h_{\mathrm{a}_m\mathrm{r}}\right|^2$，$c\in[1, n]$。此外，Alice 利用剩余的 n−1 根天线进行波束赋形发送干扰，则 Relay 接收的信号为

$$Y_{\mathrm{r}}[k]=\sqrt{P_{\mathrm{a}_c}}\,h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}x_{\mathrm{a}}[k]+n_{\mathrm{r}}[k]\text{。} \tag{1}$$

式中：P_{a_c} 为 Bob 和 Willie 已知的 Alice 所选择的最优天线 c 的发射功率，且 P_{a_c} 的值是固定且已知的；$x_{\mathrm{a}}[k]$ 为 Alice 发送的隐蔽信号，其满足 $E\left[x_{\mathrm{a}}[k]x_{\mathrm{a}}^{\dagger}[k]\right]=1,\ k=1,\ 2,\ \cdots,\ M$，$M$ 为使用的信道总量；$n_{\mathrm{r}}[k]$ 为中继处方差为σ_{r}^2的 AWGN。

Relay 处的信噪比（signal-noise ratio，SNR）为

$$\gamma_{\mathrm{r}}=\left(P_{\mathrm{a}_c}\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}\right|^2\right)\Big/\sigma_{\mathrm{r}}^2\text{。} \tag{2}$$

在第二个阶段中，Relay 将接收的信号译码转发给 Bob。此外，Alice 从 n 根天线中随机选择一根天线向 Willie 发送干扰，使用 q 来表示所选择的天线，q=1, 2, ⋯, n。由于 Bob 接收不到 Alice 发送的干扰。因此，Bob 接收的信号为

$$Y_{\mathrm{b}}[s]=\sqrt{P_{\mathrm{r}}}\,h_{\mathrm{rb}}x_{\mathrm{r}}[s]+n_{\mathrm{b}}[s]\text{。} \tag{3}$$

式中：P_{r} 为中继译码转发隐蔽信息的功率；$x_{\mathrm{r}}[s]$ 为中继转发信号，其满足$E\left[x_{\mathrm{r}}[s]x_{\mathrm{r}}^{\dagger}[s]\right]=1$，$s$=1, 2, ⋯, M；$n_{\mathrm{b}}[s]$ 为 Bob 处的 AWGN。

Bob 处的 SNR 可表示为

$$\gamma_{\mathrm{b}}=\left(P_{\mathrm{r}}\left|h_{\mathrm{rb}}\right|^2\right)\Big/\sigma_{\mathrm{b}}^2\text{。} \tag{4}$$

1.2　Willie 检测

为了确保第一个阶段的通信不被 Willie 检测，Alice 选择一根最优天线发送隐蔽消息，剩余的 n−1 根天线进行迫零波束赋形。迫零波束赋形算法 [8] 可表示为

$$\max_{\mathrm{w}_{ZF}}\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|,\quad \mathrm{s.t.}\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{ar}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|=0\,\&\left\|\boldsymbol{W}_{\kappa}\right\|_F=1\text{。} \tag{5}$$

式中：† 和 $\|\cdot\|_F$ 分别表示向量的共轭转置和 Frobenius 范数；$\boldsymbol{W}_{\kappa}$ 为 ZFB 的向量。

式（5）中优化问题的解为

$$\boldsymbol{W}_{\kappa}=\left(\boldsymbol{\varUpsilon}^{\perp}\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}\right)\Big/\left(\left\|\boldsymbol{\varUpsilon}^{\perp}\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}\right\|\right)\text{。} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{\varUpsilon}^{\perp}=\boldsymbol{I}-\boldsymbol{h}_{\mathrm{ar}}\left(\boldsymbol{h}_{\mathrm{ar}}^{\dagger}\boldsymbol{h}_{\mathrm{ar}}\right)^{-1}\boldsymbol{h}_{\mathrm{ar}}$，其中 $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵 。

定义 $Z_1\triangleq P_Z\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|^2\Big/\sigma_{\mathrm{w}}^2$，令 $Z\triangleq P_Z\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|^2$，可得其概率密度函数（probability density function，PDF）f、累积分布函数（cumulative distribution function，CDF）F 分别如下：

$$f_{Z_1}(Z)=\frac{Z^{n-3}\exp\left(-\left(\sigma_{\mathrm{w}}^2Z\right)\Big/\left(P_Z\lambda_{\mathrm{aw}}\right)\right)}{(n-3)!\left(P_Z\lambda_{\mathrm{aw}}/\sigma_{\mathrm{w}}^2\right)^{n-2}},\ n\geqslant3,\ Z\geqslant0; \tag{7}$$

$$F_{Z_1}(Z)=1-\exp\left(-\frac{Z\sigma_{\mathrm{w}}^2}{P_Z\lambda_{\mathrm{aw}}}\right)\sum_{m=0}^{n-3}\frac{1}{m!}\left(\frac{Z\sigma_{\mathrm{w}}^2}{P_Z\lambda_{\mathrm{aw}}}\right)^m,\ Z\geqslant0\text{。} \tag{8}$$

式（7）（8）中：P_Z 为 Alice 发送人工干扰的功率；σ_{w}^2为 Willie 的噪声方差。

在第一阶段的一个通信时隙内，Willie 尝试检测 Alice 是否发送隐蔽消息给 Relay。因此，Willie 面临一个二元假设检验问题，即零假设 Q_0 表示 Alice 没有给 Relay 传输信息，备择假设 Q_1 表示 Alice 正在与 Relay 通信。由上述假设可以得知，Willie 接收到的信号可以表示如下：

$$Y_{\mathrm{w}_1}[k]=\begin{cases}\sqrt{P_Z}\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|V_{\mathrm{a}}[k]+n_{\mathrm{w}}[k],\ Q_0;\\ \sqrt{P_{\mathrm{a}_c}}\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}\right|x_{\mathrm{a}}[k]+\sqrt{P_Z}\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|V_{\mathrm{a}}[k]+n_{\mathrm{w}}[k],\ Q_1\text{。}\end{cases} \tag{9}$$

式中：$n_{\mathrm{w}}[k]$ 是 Willie 处方差为σ_{w}^2的 AWGN；$V_{\mathrm{a}}[k]$ 为 Alice 发送的干扰信号。

假设 Alice 的最大功率为 P_{a}，且 Alice 的各天线间均匀分配功率，令$P_{\mathrm{a}_q}^{\max}=P_{\mathrm{a}}/n$，在时隙中 Willie 不知道 P_Z，且 P_Z 服从连续均匀分布，其 PDF 为

$$f_{P_Z}(x)=\begin{cases}P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\Big/(n-1),\quad 0\leqslant x\leqslant P_{\mathrm{a}_q}^{\max};\\ 0,\ \text{otherwise}\text{。}\end{cases} \tag{10}$$

同第一阶段类似，在第二阶段的一个通信时隙内，Willie 试图检测 Relay 和 Bob 之间的通信是否发生。此时，Willie 再次面临一个二元假设检验问题。Willie 接收到的信号可表示为

$$Y_{\mathrm{w}_2}[s]=\begin{cases}\sqrt{P_{\mathrm{a}_q}}\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|v_{\mathrm{a}}[s]+n_{\mathrm{w}}[s],\ Q_0;\\ \sqrt{P_{\mathrm{r}}}\left|h_{\mathrm{rw}}\right|x_{\mathrm{r}}[s]+\sqrt{P_{\mathrm{a}_q}}\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|v_{\mathrm{a}}[s]+n_{\mathrm{w}}[s],\ Q_1\text{。}\end{cases} \tag{11}$$

式中：P_{a_q} 为 Alice 发送的干扰功率；$\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|$和$\left|h_{\mathrm{rw}}\right|$分别

为 Alice 的第 q 根天线和 Relay 与 Willie 间的信道系数；$v_a[s]$ 为 Alice 发送的干扰信号。

为了降低 Willie 的检测概率，Alice 发送的干扰信号的功率P_{a_q}在时隙间随机变化，并在区间$\left[0,\ P_{a_q}^{\max}\right]$内连续均匀分布，其 PDF 为

$$f_{P_{a_q}}(x)=\begin{cases}1\big/P_{a_q}^{\max},\ 0\leqslant x\leqslant P_{a_q}^{\max};\\ 0,\ \text{otherwise}。\end{cases} \tag{12}$$

考虑无限数量的信道使用，即 $M\to\infty$。根据辐射计的检测原理来决定合法节点间是否存在通信。Willie 最小化检测错误的决策规则为

$$T\triangleq\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left|Y_w[i]\right|^2\underset{G_0}{\overset{G_1}{\gtrless}}\tau_1(\tau_2)。 \tag{13}$$

式中：i 为时隙；τ_1、τ_2 分别为两个阶段预定义的 Willie 检测阈值；G_0 和 G_1 分别为二元决策，用于推断 Alice 和 Relay 是否发送隐蔽消息。

假设两个阶段的 Q_0 和 Q_1 的先验概率相等，可以用 Willie 的检测错误概率 ξ 来衡量 Willie 的检测性能，定义如下：

$$\xi\triangleq\mathbb{P}_{\mathrm{FA}}+\mathbb{P}_{\mathrm{MD}}, \tag{14}$$

式中：$\mathbb{P}_{\mathrm{FA}}$为虚警概率，定义为 $\Pr(G_1|G_0)$；$\mathbb{P}_{\mathrm{MD}}$为漏检概率，定义为 $\Pr(G_0|G_1)$。

由于本文将传输过程分为两个阶段，为了区分，将第一、二阶段的虚警概率和漏检概率分别表示为$\mathbb{P}_{\mathrm{FA}}^1$、$\mathbb{P}_{\mathrm{MD}}^1$和$\mathbb{P}_{\mathrm{FA}}^2$、$\mathbb{P}_{\mathrm{MD}}^2$。

2 Willie 检测性能分析

本节中，推导了两个阶段的虚警概率和漏检概率表达式，并根据检测错误概率的定义，推导并分析了 Willie 的最小检测错误概率、最优检测阈值。

2.1 第一阶段 Willie 检测性能

2.1.1 虚警概率与漏警概率

根据虚警概率和漏检概率的定义，第一阶段 Willie 的虚警概率、漏检概率表达式如下：

$$\mathbb{P}_{\mathrm{FA}}^1=\Pr\left[P_Z\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2>\tau_1\middle|Q_0\right]=1-\Pr\left[P_Z\leqslant\frac{\tau_1-\sigma_{\mathrm{w}}^2}{\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|^2}\right]=$$
$$\begin{cases}1,\ \tau_1\leqslant\sigma_{\mathrm{w}}^2;\\ x_1Ei(-x_1)+\exp(-x_1),\ \tau_1>\sigma_{\mathrm{w}}^2,\ n=3;\\ \exp(-x_1),\ \tau_1>\sigma_{\mathrm{w}}^2,\ n=4;\\ \left\{1+\sum\limits_{m=2}^{n-3}\left[\frac{1}{m(m-1)}\sum\limits_{k=0}^{m-2}\frac{x_1^{k+1}}{k!}\right]\right\}\exp(-x_1),\ \tau_1>\sigma_{\mathrm{w}}^2,\ n\geqslant5。\end{cases} \tag{15}$$

$$\mathbb{P}_{\mathrm{MD}}^1=\Pr\left[P_{a_c}\left|h_{a_c\mathrm{r}}\right|^2+P_Z\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2<\tau_1\mid Q_1\right]=\Pr\left[P_Z<\frac{\tau_1-\sigma_{\mathrm{w}}^2-P_{a_c}\left|h_{a_c\mathrm{r}}\right|^2}{\left|\boldsymbol{h}_{\mathrm{aw}}^{\dagger}\boldsymbol{W}_{\kappa}\right|^2}\right]=$$
$$\begin{cases}0,\ \tau_1\leqslant x_3;\\ 1-\left[x_2Ei(-x_2)+\exp(-x_2)\right],\ \tau_1>x_3,\ n=3;\\ 1-\exp(-x_2),\ \tau_1>x_3,\ n=4;\\ 1-\left\{1+\sum\limits_{m=2}^{n-3}\left[\frac{1}{m(m-1)}\sum\limits_{k=0}^{m-2}\frac{x_2^{k+1}}{k!}\right]\right\}\times\exp(-x_2),\ \tau_1>x_3,\ n\geqslant5。\end{cases} \tag{16}$$

式（15）（16）中：

$Ei(\mu)=\int_{-\infty}^{\mu}\mathrm{e}^x/x\mathrm{d}x$；$x_1=\left(\tau_1-\sigma_{\mathrm{w}}^2\right)\big/\left[(n-1)P_{a_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}\right]$；$x_2=\left(\tau_1-\sigma_{\mathrm{w}}^2-P_{a_c}\left|h_{a_c\mathrm{w}}\right|^2\right)\big/\left[(n-1)P_{a_c}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}\right]$；$x_3=\sigma_{\mathrm{w}}^2+P_{a_c}\left|h_{a_c\mathrm{w}}\right|^2$；$P_{a_q}^{\max}$为 Alice 单根天线发送的最大干扰功率。

证明 结合式（7）和式（10）可证。证毕。

2.1.2 最优检测阈值及最小检测错误概率

由式（14）知检测错误概率为虚警概率与漏检概率之和，分析可得最优检测阈值及其最小检测错误概率。Willie 的最优检测阈值可表示为

$$\tau_1^*=P_{a_c}\left|h_{a_c\mathrm{w}}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2, \tag{17}$$

其相应的最小检测错误概率 ξ_1^* 可表示为

$$\xi_1^*=\begin{cases}x^*Ei(-x^*)+\exp(-x^*),\ n=3;\\ \exp(-x^*),\ n=4;\\ \left\{1+\sum\limits_{m=2}^{n-3}\left[\frac{1}{(m-1)}\sum\limits_{k=0}^{m-2}\left[\left(x^*\right)^{k+1}\big/k!\right]\right]\right\}\exp(-x^*),\ n\geqslant5。\end{cases} \tag{18}$$

式中：$x^*=P_{a_c}\left|h_{a_c\mathrm{w}}\right|^2\big/\left[(n-1)P_{a_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}\right]$。

证明 首先，根据式（14）（16），可得检测错误概率，然后求导分析，得出在不同天线数量下，当$\tau_1^*=P_{a_c}\left|h_{a_c\mathrm{w}}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2$时，检测错误概率取最小值。证毕。

2.2 第二阶段 Willie 检测性能

2.2.1 虚警概率与漏警概率

当 Willie 知道信道信息$h_{a_q\mathrm{w}}$时，虚警概率、漏检概率表达式如下：

$$\mathbb{P}_{\mathrm{FA}}^2=\Pr\left[P_{a_q}\left|h_{a_q\mathrm{w}}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2>\tau_2\mid Q_0\right]=1-\Pr\left[P_{a_q}\leqslant\frac{\tau_2-\sigma_{\mathrm{w}}^2}{\left|h_{a_q\mathrm{w}}\right|^2}\right]=$$
$$\begin{cases}0,\ \tau_2<\sigma_{\mathrm{w}}^2;\\ 1-\frac{\tau_2-P_{\mathrm{r}}\left|h_{\mathrm{rw}}\right|^2-\sigma_{\mathrm{r}}^2}{P_{a_q}^{\max}\left|h_{a_q\mathrm{w}}\right|^2},\quad \sigma_{\mathrm{w}}^2\leqslant\tau_2\leqslant M_1;\\ 1,\ \tau_2>M_1。\end{cases} \tag{19}$$

$$\mathbb{P}_{\mathrm{MD}}^2=\Pr\left[P_{\mathrm{r}}\left|h_{\mathrm{rw}}\right|^2+P_{\mathrm{a}_q}\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2<\tau_2 \mid Q_1\right]=$$

$$\Pr\left[P_{\mathrm{a}_q}<\left(\tau_2-P_{\mathrm{r}}\left|h_{\mathrm{rw}}\right|^2-\sigma_{\mathrm{w}}^2\right)\Big/\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2\right]=$$

$$\begin{cases}0,\ \tau_2<M_2;\\ \left(\tau_2-P_{\mathrm{r}}\left|h_{\mathrm{rw}}\right|^2-\sigma_{\mathrm{w}}^2\right)\Big/\left(P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2\right),\ M_2\leqslant\tau_2\leqslant M_3;\\ 1,\ \tau_2>M_3。\end{cases}\quad(20)$$

式（19）（20）中：$M_1=P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2$；

$M_2=P_{\mathrm{r}}\left|h_{\mathrm{rw}}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2$；$M_3=P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2+P_{\mathrm{r}}\left|h_{\mathrm{rw}}\right|^2+\sigma_{\mathrm{w}}^2$。

2.2.2　最优检测阈值及最小检测错误概率

当 Willie 已知信道 $h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}$ 的 CSI（channel state information）时，根据文献 [14] 可得其最优检测阈值为

$$\tau_2^*=\begin{cases}\left[M_1,\ M_2\right],\ M_1<M_2;\\ \left[M_2,\ M_1\right],\ M_1\geqslant M_2。\end{cases}\quad(21)$$

相应的，最小检测错误概率为

$$\xi_2^*=\begin{cases}0,\ M_1<M_2;\\ 1-P_{\mathrm{r}}\left|h_{\mathrm{rw}}\right|^2\Big/\left(P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2\right),\ M_1\geqslant M_2。\end{cases}\quad(22)$$

由于合法用户 Relay 和 Bob 不知道信道 $\left|h_{\mathrm{rw}}\right|^2$ 和 $\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2$，也不知道 Alice 的瞬时信道信息，因此，将最小检测错误概率的平均值作为衡量系统的隐蔽性能。$\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2$ 的 PDF 可以表示为

$$f_{\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2}(z)=\frac{1}{\lambda_{\mathrm{aw}}}\mathrm{e}^{-z/\lambda_{\mathrm{aw}}},\quad(23)$$

式中 $\left|h_{\mathrm{a}_q\mathrm{w}}\right|^2=z$ 为变量代换。

3　隐蔽性能分析

在本节中，首先分析了两个阶段的平均最小检测错误概率、传输中断概率，然后基于所得结论，进一步优化 Alice 发送隐蔽信息的功率 $P_{\mathrm{a}_c}^*$ 和 Relay 的译码转发功率 P_{r}，从而使有效隐蔽速率最大化。

3.1　第一阶段隐蔽性能

3.1.1　平均最小检测错误概率

引理 1　第一阶段，平均最小检测错误概率为

$$\overline{\xi_1^*}=\begin{cases}1-\dfrac{P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}}{(n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}\ln\left(1+\dfrac{(n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}{P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}}\right),\ n=3;\\ (n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}\left[P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}+(n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}\right],\ n=4;\\ \dfrac{(n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}{P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}+(n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}\left\{1+\displaystyle\sum_{m=2}^{n-3}\frac{1}{m(m-1)}\times\right.\\ \left.\displaystyle\sum_{k=0}^{m-2}(k+1)\left[\frac{P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}}{P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}+(n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}\right]^{k+1}\right\},\ n\geqslant5。\end{cases}$$

（24）

证明　结合 $\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}\right|^2$ 的 PDF 和式（18），可得第一阶段平均最小检测错误概率如下：

当 $n=3$ 时，设 $\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}\right|^2=x$，作变量代换，可得：

$$\overline{\xi_1^*}=\int_0^{+\infty}\left(x^*Ei\left(-x^*\right)+\exp\left(-x^*\right)\right)f_{\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}\right|^2}(x)\,\mathrm{d}x\overset{\Omega}{=}$$

$$1+\frac{P_{\mathrm{a}_c}}{P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}\left[\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}Ei\left(-\frac{\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}P_{\mathrm{a}_c}+P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}{\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}x\right)-\right.$$

$$\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}Ei\left(-\frac{P_{\mathrm{a}_c}}{P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}x\right)\exp\left(-\frac{x}{\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}}\right)-$$

$$\left.xEi\left(-\frac{P_{\mathrm{a}_c}}{P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}x\right)\exp\left(-\frac{x}{\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}}\right)\right]\Bigg|_0^{+\infty}=$$

$$1-\frac{P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}}{(n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}\ln\left(1+\frac{(n-1)P_{\mathrm{a}_q}^{\max}\lambda_{\mathrm{aw}}}{P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{w}}}\right),\quad(25)$$

式中，步骤 Ω 利用文献 [15] 中公式 (5.221.5.*) 导出。

同理可证，n=4、$n\geqslant5$ 时的平均最小检测错误概率。证毕。

3.1.2　传输中断概率

假设传输速率 R 固定且已知，由于 $\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}\right|^2$ 为随机变量，根据传输中断的概念，当 $C<R$ 时，可导致信息传输中断。

由于无线信道服从独立的准静态瑞利衰落，$\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}\right|^2$ 的 CDF 为 $F_{\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}\right|^2}(x)=\left(1-\mathrm{e}^{-x/\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}}\right)^n$，则其 PDF 为

$$f_{\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}\right|^2}(x)=\frac{n}{\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}}\left(1-\mathrm{e}^{-x/\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}}\right)^{n-1}\mathrm{e}^{-x/\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}}。\quad(26)$$

引理 2　在第一阶段中，Alice 到 Relay 的传输中断概率为

$$\delta_1=\left[1-\exp\left(-\frac{\left(2^{2R}-1\right)\sigma_R^2}{P_{\mathrm{a}_c}\lambda_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}}\right)\right]^n。\quad(27)$$

证明　由香农定律可知，Alice 到 Relay 的信道容量可表示为

$$C_{\mathrm{ar}}=\frac{1}{2}\log_2\left(1+\gamma_{\mathrm{ar}}\right)。\quad(28)$$

结合式（2）和传输中断概率的定义有

$$\delta_1=\Pr\left\{\frac{P_{\mathrm{a}_c}\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}\right|^2}{\sigma_{\mathrm{r}}^2}<2^{2R}-1\right\}=\Pr\left\{\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}\right|^2<\frac{\left(2^{2R}-1\right)\sigma_{\mathrm{r}}^2}{P_{\mathrm{a}_c}}\right\}。$$

（29）

将式（26）$\left|h_{\mathrm{a}_c\mathrm{r}}\right|^2$ 的 PDF 代入，可得第一阶段的传输中断概率。证毕。

3.1.3　最大有效隐蔽速率

假设系统第一阶段的隐蔽阈值为 ε，根据上述分

析可知，平均最小检测错误概率$\overline{\xi_1^*}$和传输中断概率δ_1是关于发送功率P_{a_c}的函数。因此，将最大有效隐蔽速率定义为在满足隐蔽性要求下可达到的有效隐蔽速率，可表示为

$$\max_{P_{a_q}} \overline{R_C} \triangleq R\left(1-\delta_1\right),\ \text{s.t.}\ \overline{\xi_1^*} \geqslant 1-\varepsilon。\quad (30)$$

在给定传输速率 R 和满足隐蔽约束条件 ε 的情况下，Alice 发送隐蔽消息的最优功率如下：

$$P_{a_c}^*=\begin{cases}(n-1)P_{a_q}^{\max}\Big/\left(\lambda_{aw}I_{\varepsilon_1}\right),\ n=3;\\(n-1)\varepsilon P_{a_q}^{\max}\Big/\left[\lambda_{aw}(1-\varepsilon)\right],\ n=4;\\(n-1)P_{a_q}^{\max}\Big/\left(\lambda_{aw}I_{\varepsilon_2}\right),\ n\geqslant 5。\end{cases}\quad (31)$$

式中：I_{ε_1}为式$\overline{\xi_1^*}=1-\ln(1+I)/I=1-\varepsilon$的解；$I_{\varepsilon_2}$为式（32）的解。

$$\frac{x}{1+x}\left\{1+\sum_{m=2}^{n-3}\frac{1}{m(m-1)}\sum_{k=0}^{m-2}\frac{(k+1)}{(1+x)^{k+1}}\right\}=1-\varepsilon。\quad (32)$$

证明 由式（24），易知当天线数量 $n \geqslant 3$ 时，平均最小检测错误概率$\overline{\xi_1^*}$是关于 Alice 的发送功率P_{a_c}的单调递减函数。因此，Alice 发送隐蔽消息的最优功率由$\overline{\xi_1^*}=1-\varepsilon$确定，可得：

$$\overline{\xi^*}=\begin{cases}1-\dfrac{\ln(1+I)}{I}=1-\varepsilon,\ n=3;\\\exp(-I)=1-\varepsilon,\ n=4;\\\dfrac{I}{1+I}\left\{1+\displaystyle\sum_{m=2}^{n-3}\frac{1}{m(m-1)}\sum_{k=0}^{m-2}\frac{(k+1)}{(1+I)^{k+1}}\right\}=1-\varepsilon,\ n\geqslant 5。\end{cases}\quad (33)$$

式中 $I=(n-1)P_{a_q}^{\max}\lambda_{aw}\Big/\left(P_{a_c}\lambda_{ar}\right)$。

由式（33）可以得出最优 I^*，随后以P_{a_c}为未知量进行求解，可以得到 Alice 发送隐蔽消息的最优功率$P_{a_c}^*$。同理可证，n=4、$n \geqslant 5$ 时，Alice 的最优发射功率。证毕。

引理 3 联立式（27）和（30）可得，第一阶段最大有效隐蔽速率为

$$\overline{R_{C_1}^*}=R\left(1-\delta_1\right)=R-R\left\{1-\exp\left[-\left(2^{2R}-1\right)\sigma_r^2\Big/\left(P_{a_c}^*\lambda_{a_cr}\right)\right]\right\}^n。\quad (34)$$

3.2 第二阶段隐蔽性能

3.2.1 平均最小检测错误概率

引理 4 第二阶段，平均最小检测错误概率为

$$\overline{\xi_2^*}=1-\ln\left(\theta\lambda_{aw}+1\right)/\left(\theta\lambda_{aw}\right),\quad (35)$$

式中，$\theta=P_{a_q}^{\max}\Big/\left(P_r\lambda_{rw}\right)$。

证明 令$\theta'\triangleq P_{a_q}^{\max}/P_r$，根据式（22）可得：

$$\xi_2^*=\begin{cases}0,\ \theta'\left|h_{a_qw}\right|^2<\left|h_{rw}\right|^2;\\1-\left|h_{rw}\right|^2\Big/\left(\theta'\left|h_{a_qw}\right|^2\right),\ \theta'\left|h_{a_qw}\right|^2\geqslant\left|h_{rw}\right|^2。\end{cases}\quad (36)$$

设置$\left|h_{rw}\right|^2=y$作等效替换，根据$\left|h_{rw}\right|^2$、$\left|h_{a_qw}\right|^2$的 PDF 和平均最小检测错误概率的定义可得：

$$\overline{\xi_2^*}=\int_0^{\infty}\int_0^{\theta' x}\left(1-\frac{\left|h_{rw}\right|^2}{\theta' x}\right)f_{\left|h_{rw}\right|^2}(y)\,\mathrm{d}(y)\,f_{\left|h_{a_qw}\right|^2}(z)\,\mathrm{d}z=\int_0^{\infty}\left(1-\frac{1}{\theta z}+\frac{\exp(-\theta z)}{\theta z}\right)\frac{1}{\lambda_{aw}}\mathrm{e}^{-\frac{z}{\lambda_{aw}}}\mathrm{d}z\overset{\psi}{=}1-\frac{\ln\left(\theta\lambda_{aw}+1\right)}{\theta\lambda_{aw}},\quad (37)$$

式中：步骤 ψ 利用文献 [15] 中式（3.351.3）导出。

证毕。

3.2.2 传输中断概率

由于传输速率 R 已知，并且 $|h_{rb}|^2$ 为随机变量，故根据传输中断的概念，当 $C<R$ 时，会使得信息传输中断。

引理 5 在第二阶段中，Relay 到 Bob 的传输中断概率为

$$\delta_2=1-\exp\left(-\left(2^{2R}-1\right)\sigma_b^2\Big/\left(P_r\lambda_{rb}\right)\right)。\quad (38)$$

证明 由香农定律可知，Relay 到 Bob 的信道容量公式为

$$C_{rb}=\frac{1}{2}\log_2\left(1+\gamma_b\right)。\quad (39)$$

结合式（3）、（39）和传输中断概率定义有

$$\delta_2=\Pr\left\{\frac{P_r\left|h_{rb}\right|^2}{\sigma_b^2}<2^{2R}-1\right\}=\Pr\left\{\left|h_{rb}\right|^2<\frac{\left(2^{2R}-1\right)\sigma_b^2}{P_r}\right\}。\quad (40)$$

将 $|h_{rb}|^2$ 的 PDF 代入，可得出第二阶段的传输中断概率。证毕。

3.2.3 最大有效隐蔽速率

同第一阶段类似，假设第二阶段隐蔽约束条件的阈值为 ε，而有效隐蔽速率是关于平均最小检测概率$\overline{\xi_2^*}$和传输中断概率 δ_2 的函数。因此，最大有效隐蔽速率可表示为

$$\max_{P_r}\overline{R_{C_2}}\triangleq R\left(1-\delta_2\right),\ \text{s.t.}\ \overline{\xi_2^*}\geqslant 1-\varepsilon。\quad (41)$$

已知传输速率 R 和隐蔽约束条件 ε，可得中继的最优转发功率为

$$P_r^*=P_{a_q}^{\max}\Big/\left(\theta_1\lambda_{rw}\right)。\quad (42)$$

证明 据式（35）知平均最小检测错误概率$\overline{\xi_2^*}$是关于 Relay 转发功率 P_r 的单调递减函数。故 Relay 译码转发最优功率由$\overline{\xi_2^*}=1-\varepsilon$确定，联合式（41）可得：

$$\overline{\xi_2^*}=1-\ln\left(\theta\lambda_{aw}+1\right)/\left(\theta\lambda_{aw}\right)=1-\varepsilon。\quad (43)$$

θ_1 为式（43）的解，然后以 P_r 为未知量求解，可得最大转发功率 P_r^*。

证毕。

引理 6　由式（41）有效隐蔽速率的优化问题，可得系统的最大有效隐蔽速率为

$$\bar{R}_{C_2}^*=R\exp\left\{-\left(2^{2R}-1\right)\sigma_b^2\Big/\left(P_r^*\lambda_{rb}\right)\right\}。\tag{44}$$

4　总隐蔽性能分析

本节将基于上述所得的两个阶段传输中断概率和最大有效隐蔽速率，进一步分析系统的整体隐蔽性能。

4.1　系统总的传输中断概率

由于第二阶段的隐蔽传输需要在第一阶段传输成功的基础上进行传输，根据上述所得第一阶段和第二阶段的传输中断概率，可以推导出系统总的传输中断概率。

引理 7　对于多天线半双工中继的隐蔽通信系统，系统总的传输中断概率可表示为

$$\delta=1-\left\{1-\left[1-\exp\left(-\left(2^{2R}-1\right)\sigma_r^2\Big/\left(P_{a_c}\lambda_{a_c r}\right)\right)\right]^n\right\}\times \left\{\exp\left(-\left(2^{2R}-1\right)\sigma_b^2\Big/\left(P_r\lambda_{rb}\right)\right)\right\}。\tag{45}$$

证明　第一阶段和第二阶段传输中断概率分别为 δ_1 和 δ_2，故系统总的传输中断概率为

$$\delta=1-\left(1-\delta_1\right)\left(1-\delta_2\right)。\tag{46}$$

将式（27）和（38）代入式（46）可得：

$$\delta=1-\left\{1-\left[1-\exp\left(-\left(2^{2R}-1\right)\sigma_r^2\Big/\left(P_{a_c}\lambda_{a_c r}\right)\right)\right]^n\right\}\times \left\{1-\left[1-\exp\left(-\left(2^{2R}-1\right)\sigma_b^2\Big/\left(P_r\lambda_{rb}\right)\right)\right]\right\}。\tag{47}$$

对式（47）进行简单计算，即可得系统总的传输中断概率式（45）。

证毕。

4.2　系统总的最大有效隐蔽速率

与系统总的传输中断概率不同，系统总的最大有效隐蔽速率取决于两个阶段中最大有效隐蔽速率的最小值。

引理 8　对于多天线半双工中继的隐蔽通信系统，总的最大有效隐蔽速率可表示为

$$\overline{R_C^*}=\overline{R_{C_2}^*}=R\exp\left\{-\left(2^{2R}-1\right)\sigma_b^2\Big/\left(P_r^*\lambda_{rb}\right)\right\}。\tag{48}$$

证明　总的有效隐蔽速率为第一阶段和第二阶段中最大有效隐蔽速率的最小值，即

$$\bar{R}_C=\min\left(\bar{R}_{C_1}^*,\ \bar{R}_{C_2}^*\right)。\tag{49}$$

假设 $\sigma_r^2=\sigma_b^2$、$\lambda_{a_c r}=\lambda_{rb}$，由式（31）和（42）易知 $P_{a_c}^*\geqslant P_r^*$，令 $V\triangleq R_{C_1}^*-R_{C_2}^*$，根据式（34）和（44）可得：

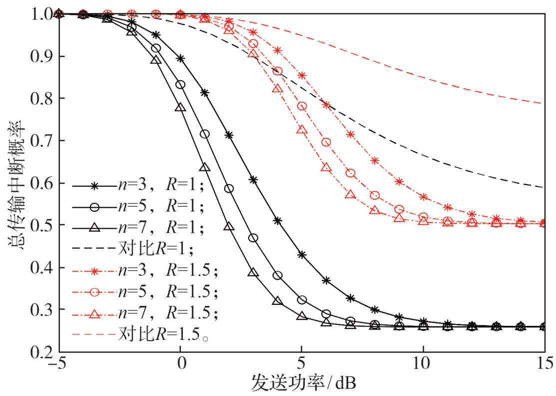
$$V=R\left\{1-\exp\left\{-\frac{\left(2^{2R}-1\right)\sigma_b^2}{P_r^*\lambda_{rb}}\right\}-\left\{1-\exp\left[-\frac{\left(2^{2R}-1\right)\sigma_r^2}{P_{a_c}^*\lambda_{a_c r}}\right]\right\}^n\right\}\geqslant R\left\{1-\exp\left\{-\frac{\left(2^{2R}-1\right)\sigma_r^2}{P_{a_c}^*\lambda_{a_c r}}\right\}-\left\{1-\exp\left[-\frac{\left(2^{2R}-1\right)\sigma_r^2}{P_{a_c}^*\lambda_{a_c r}}\right]\right\}^n\right\}\geqslant 0。\tag{50}$$

由于 $V\geqslant 0$，即第一阶段的最大有效隐蔽速率大于第二阶段的有效隐蔽速率。证毕。

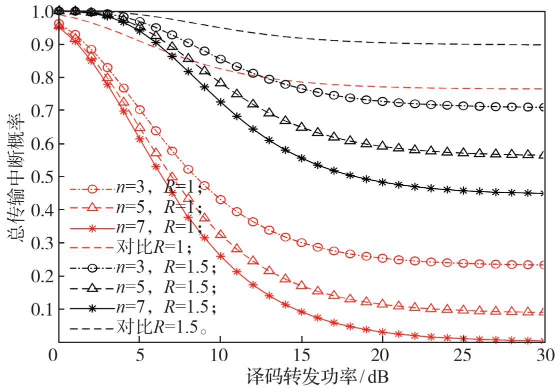
5　仿真与讨论

本节针对多天线半双工中继隐蔽通信系统，利用系统仿真分析两个阶段 Willie 的检测性能，并对比分析了不同天线数量对每个阶段和系统总的隐蔽性能的影响，以及 Alice 配备双天线且在两个阶段中采用随机干扰的传输方案的情况。本文所采用部分仿真参数如下：Alice 与 Relay、Alice 与 Willie、Relay 与 Bob 间信道小尺度衰落的方差均为 $\lambda_{ar}=\lambda_{aw}=\lambda_{rb}=1$，Alice 配备天线数为 $n=5$，Relay、Willie 与 Bob 处的噪声方差均为 $\sigma_r^2=\sigma_w^2=\sigma_b^2=1$ dB，信道编码速率为 $R=1.5$ bpcu，隐蔽约束值设置为 $\varepsilon=0.01$[5, 9, 14]。

图 2a 描述了 Alice 的发送功率 P_{a_c} 与总的传输中断概率 δ 的关系，图 2b 描述了 Relay 译码转发功率 P_r 与总的传输中断概率 δ 的关系。从图 2 中可以看出，总的传输中断概率是关于 P_{a_c} 和 P_r 的减函数。这是因为随着发送功率 P_{a_c} 和转发功率 P_r 的增加，使得 Relay 和 Bob 处的信噪比增加，从而使得信息传输更可靠。此外，系统总的传输中断概率随着 Alice 配备天线数量的增加而减小，这是因为发送天线数量增加，会增加信道的增益，从而使得系统传输中断概率减小。总的传输中断概率随着传输速率 R 的增大而增加。这是因为在信道容量不变时，传输速率增加使得信号传输质量下降。还可以发现，采用随机干扰方案的总传输中断概率大于采用联合传输方案的总传输中断概率。



a）第一阶段发送功率 P_{a_c} 对总传输中断概率的影响



b）第二阶段译码转发功率 P_r 对总传输中断概率的影响

图 2　系统的总传输中断概率变化曲线

Fig. 2　Total transmission interruption probability variation curves of the system

图 3 呈现了两个阶段中，单根天线的最大人工干扰功率 $P_{a_q}^{\max}$ 与最大有效隐蔽速率 $\overline{R_{C_1}^*}$ 和 $\overline{R_{C_2}^*}$ 间的关系。

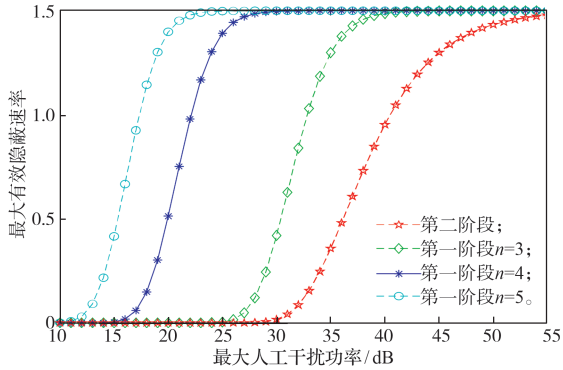


图 3　最大有效隐蔽速率随单天线最大人工干扰功率变化曲线

Fig. 3　Maximum effective steganographic rate curves varying with the maximum artificial interference power of a single antenna

由图 3 可知，值得注意的是，随着最大人工干扰功率 $P_{a_q}^{\max}$ 值的增加，两个阶段的最大有效隐蔽速率 $\overline{R_{C_1}^*}$ 和 $\overline{R_{C_2}^*}$ 都呈现出增加的趋势。这是因为随着干扰功率的增加，使得满足隐蔽约束条件下的最优发送功率和转发功率都随之增加。还可以看到，在第一阶段中，随着 Alice 配备的天线数量增加，最大有效隐蔽速率增加，而第二阶段的最大有效隐蔽速率不受天线数量的影响，这是因为 Alice 所发送的干扰不会影响 Bob 接收中继转发的隐蔽信息。随着单根天线的最大干扰功率增加，两个阶段的最大有效隐蔽速率也增加，并趋于传输速率 R，且第二阶段的最大有效隐蔽速率小于第一阶段的对应值，这与 4.2 节中分析的结果一致，即总有效隐蔽速率等于第二阶段最大有效隐蔽速率。

图 4 描述了两个阶段中，Alice 的发送功率 P_{a_c} 和 Relay 的转发功率 P_r 与最大有效隐蔽速率 $\overline{R_{C_1}^*}$ 和 $\overline{R_{C_2}^*}$ 之间的关系。

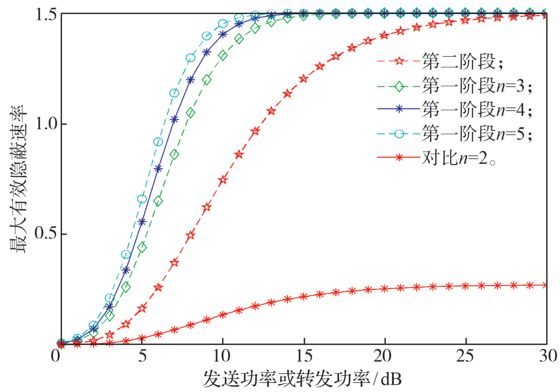


图 4　最大有效隐蔽速率随发送功率和转发功率变化曲线

Fig. 4　Maximum effective concealment steganographic curves varying with transmission power and forwarding power

观察图 4 可发现，随着 P_{a_c} 和 P_r 增加，最大有效隐蔽速率 $\overline{R_{C_1}^*}$ 和 $\overline{R_{C_2}^*}$ 都呈现增加的趋势。此外可以发现，在隐蔽通信系统中，联合采用 ZFB、RSJ 的传输方案的最大有效隐蔽速率大于只采用随机干扰方案下的最大有效隐蔽速率。

6　结论

本文研究了多天线半双工中继隐蔽通信系统，联合设计了 ZFB、RSJ 的传输方案，分别推导、分析了不同天线数量下，两个阶段通信的最小检测阈值、平均最小检测错误概率和传输中断概率的封闭表达式。在给定隐蔽性要求的情况下，给出了每个阶段的最大有效隐蔽速率，并推导了系统总的最大有效隐蔽速率表达式。仿真结果表明：

1）当天线数量 $n \geqslant 3$ 时，系统总的传输中断概率随着天线数量的增加而减小，且系统总的最大有效隐蔽速率同第二阶段相同。

2）通过对比 Alice 配备双天线且采用随机干扰的传输方案下系统的隐蔽性能，可知联合采用 ZFB、RSJ 的传输方案的最大有效隐蔽速率，大于只采用随机干扰方案下的最大有效隐蔽速率。

此外，可以进一步探索通过不同种类的中继转发隐蔽信息，对系统隐蔽性能的影响。

参考文献：

[1] HUANG L Y，LEI J，HUANG Y. Spatial Modulation Covert Communication Assisted by Artificial Noise[C]//2023 IEEE/CIC International Conference on

Communications in China (ICCC Workshops). Dalian：IEEE，2023：1−6.

[2] BASH B A，GOECKEL D，TOWSLEY D. Limits of Reliable Communication with Low Probability of Detection on AWGN Channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications，2013，31(9)：1921−1930.

[3] LEE S，BAXLEY R J，WEITNAUER M A，et al. Achieving Undetectable Communication[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing，2015，9(7)：1195−1205.

[4] XIANG W Y，WANG J Q，XIAO S，et al. Achieving Constant Rate Covert Communication via Multiple Antennas[C]//2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference(VTC2022-Spring). Helsinki：IEEE，2022：1−6.

[5] YANG L，YANG W W，TU J，et al. Covert Communication Achieved by a Full-Duplex Multi-Antenna Receiver in Wireless Networks[J]. Journal of Circuits, Systems and Computers，2021，30(14)：2150258.

[6] SHMUEL O，COHEN A，GUREWITZ O. Multi-Antenna Jamming in Covert Communication[J]. IEEE Transactions on Communications，2021，69(7)：4644−4658.

[7] YANG L，YANG W W，TANG L，et al. Beamforming Design and Covert Performance Analysis for Full-Duplex Multiantenna System[J]. Complexity，2021，2021(1)：7−10.

[8] AFANA A，ASGHARI V，GHRAYEB A，et al. Cooperative Relaying in Spectrum-Sharing Systems with Beamforming and Interference Constraints[C]//2012 IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Cesme：IEEE，2012：429−433.

[9] TAO L W，YANG W W，LU X B，et al. Multi-Antenna Jammer Assisted Covert Communications in Data Collected IoT with NOMA[J]. China Communications，2023，20(5)：217−231.

[10] HU J S，YAN S H，ZHOU X B，et al. Covert Communications Without Channel State Information at Receiver in IoT Systems[J]. IEEE Internet of Things Journal，2020，7(11)：11103−11114.

[11] GAO C，YANG B，ZHENG D，et al. Cooperative Jamming and Relay Selection for Covert Communications in Wireless Relay Systems[J]. IEEE Transactions on Communications，2024，72(2)：1020−1032.

[12] RANKOV B，WITTNEBEN A. Spectral Efficient Signaling for Half-Duplex Relay Channels[C]//Conference Record of the Thirty-Ninth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2005. Pacific Grove：IEEE，2005：1066−1071.

[13] LIU Y，WU H H，JIANG X H. Joint Selection of FD/HD and AF/DF for Covert Communication in Two-Hop Relay Systems[J]. Ad Hoc Networks，2023，148：103207.

[14] HU J S，SHAHZAD K，YAN S H，et al. Covert Communications with a Full-Duplex Receiver over Wireless Fading Channels[C]//2018 IEEE International Conference on Communications(ICC). Kansas City：IEEE，2018：1−6.

[15] GRADSHTEYN I S， RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products[M]. 7th Edition. New York：Academic Press，2007：340−627.

（责任编辑：廖友媛）