

DOI: 10.3969/j.issn.1671-0673. 2026. 01. 001

跨域无人机协同的物理层安全性能分析

张妮娜¹, 麻荣宽², 刘 勇², 罗 灏¹, 黄海燕³, 梁琳琳⁴

(1. 中国人民武装警察部队陕西省总队, 陕西 西安 710054; 2. 信息工程大学, 河南 郑州 450001;
3. 兰州交通大学, 甘肃 兰州 730070; 4. 西安电子科技大学, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对无人机中继网络在瑞利衰落信道下的窃听威胁, 构建集成半双工协作干扰节点的跨域无人机协同系统, 提出跨域无人机协同的物理层安全性能分析方法。通过联合优化中继信息转发与干扰发射, 以最大化链路信干噪比(SINR)为准则动态选择最优传输路径, 在跨域维度扩大合法与窃听链路的信道质量差异。采用选择合并(SC)与最大比合并(MRC)分集技术, 推导系统中断概率与截获概率的闭式表达式, 从可靠性与安全性等方面综合评价系统性能。仿真表明, 增加中继节点并采用 MRC, 可使中断概率降低约一个数量级; 部署协作干扰节点能有效抑制窃听, 在 10 个干扰节点下载截获概率最高下降 80%, 验证所提方案在安全—可靠性折衷性能上的显著提升。

关键词: 无人机中继网络; 物理层安全; 中断概率; 截获概率

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1671-0673(2026)01-0001-09

Physical Layer Security Performance Analysis of Cross-Domain UAV Collaboration

ZHANG Nina¹, MA Rongkuan², LIU Yong², LUO Hao¹, HUANG Haiyan³, LIANG Linlin⁴

(1. Shaanxi Provincial Headquarters of the Chinese People's Armed Police Force, Xi'an 710054, China;
2. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China;
3. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 4. Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: To address eavesdropping threats in unmanned aerial vehicle (UAV) relay networks under Rayleigh fading channels, a cross-domain UAV collaboration system integrated with half-duplex cooperative jamming nodes is constructed, and a physical layer security performance analysis method of cross-domain UAV collaboration is proposed. By jointly optimizing relay information forwarding and jamming transmission, the optimal transmission path is dynamically selected based on the criterion of maximizing the link signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR), thereby the channel quality difference between legitimate and eavesdropping links are expanded in the cross-domain dimension. On this basis, selection combining (SC) and maximum ratio combining (MRC) diversity techniques are adopted, and closed-form expressions for the system outage probability and intercept probability are derived, to evaluate comprehensively the system performance from both reliability and security dimensions. Simulation results show that the addition of the number of relay nodes with MRC technology can reduce the outage probability by approximately one order of magnitude. The deployment of the cooperative jamming nodes effectively suppresses eavesdropping, with the intercept probability decreasing by up to 80% when the number of jamming nodes reaches 10. The results verify the significant improvement in the security-reliability trade-off performance achieved by the proposed scheme.

Key words: UAV relay network; physical layer security; outage probability; intercept probability

收稿日期: 2025-09-28; 修回日期: 2026-01-03

基金项目: 国家自然科学基金(62461032)

作者简介: 张妮娜(1982—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为物理层安全。E-mail: zhangnina0301@yeah.net

随着无线通信技术的飞速发展,跨域无人机协同系统作为异构融合网络的重要形态,通过整合空域与地面异构资源,为实现全域覆盖与业务协同提供了新的范式。然而,此类系统节点类型多样、链路结构复杂、传输环境开放,信息在跨域传输过程中面临共道干扰与恶意窃听的双重安全威胁。物理层安全技术利用无线信道的随机特性实现安全传输,不依赖传统加密机制,成为提升系统安全性的有效途径。在复杂电磁环境与高密度终端接入的背景下,如何通过跨域协同机制,在干扰与窃听共存条件下实现信息可靠安全传输,已成为当前研究的重点与难点。

在无线中继与物理层安全技术融合方面,现有研究围绕可信与不可信环境下的源节点、中继及目的节点,结合波束赋形、信道编码、协作干扰与密钥协商等手段,设计多种抗窃听传输方案,在保障合法通信质量的同时,防止窃听节点获取有效信息,从而提升不可信场景中的网络安全性。以抗窃听与低截获为目标的无线中继物理层安全技术已成为前沿热点,引起广泛研究关注^[1-2]。文献[3]针对多窃听节点协作场景,提出了最优中继选择机制,分析了直连链路与中继链路共存条件下系统的中断概率与截获概率性能。文献[4]面向星地链路面临的潜在窃听威胁,采用协同干扰波束成形技术以改善链路中断性能。文献[5]则利用源节点间信息互干扰降低窃听信噪比,结合功率分割与时间切换策略,优化了双向中继网络的通信容量。文献[6]在不可信中继环境下,借助多目的节点多址接入方式,推导出闭式中中断概率表达式,从而提升系统接收可靠性与吞吐量。文献[7]提出一种基于非正交多址接入的辅助干扰中继方案,通过波束成形与速率调控增强对不可信中继的混淆效果,进一步推导了遍历和速率下界及其渐近表达式,为系统性能评估提供理论依据。文献[8]研究了半双工无线携能中继系统,引入多协作干扰节点,分别针对静态与动态功率分流策略,推导了中断概率与截获概率的闭式解,并系统完成了安全—可靠性之间的折衷分析。文献[9]面向多无人机窃听协作场景,结合最大比合并(Maximum Ratio Combining, MRC),综合考虑回程可靠性、窃听概率与信道衰落等因素,推导了系统中中断概率的闭式表达式。文献[10]进一步对泊松分布窃听者模型下的系统中中断概率与平均传输速率进行了仿真分析。文献[11]设计了多无人机辅助中

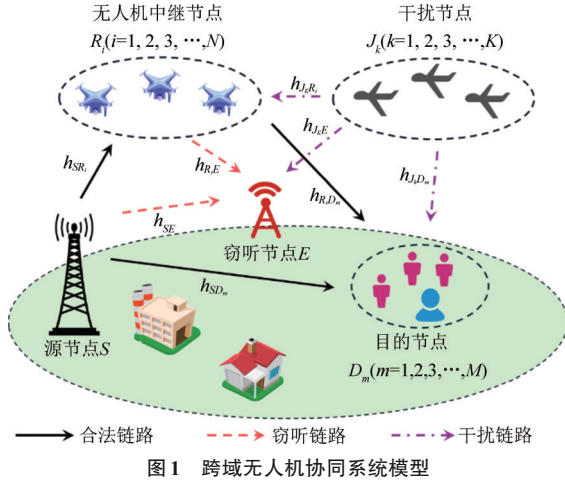
继与干扰协同方案,结合三维天线模型与随机几何理论,推导了空对地信道下系统中中断概率的闭式解。文献[12]联合优化无人机功率分配与部署位置,利用多天线条束成形与二阶锥规划方法,最大化系统安全传输速率。文献[13]在携能中继网络中提出两种混合中继策略,结合MRC技术,分别推导了合法链路与窃听链路的中断概率与截获概率表达式。总体而言,尽管无线中继物理层安全研究已取得显著进展,面向跨域协同与异构组网等复杂场景的安全传输机制仍亟待深入探索。

为解决上述挑战,针对空中无人机节点与地面异构用户/干扰节点组成的空地协同通信域,提出一种跨域无人机协同的物理层安全性能分析方法。该方法通过构建集成半双工协作干扰节点的系统模型,联合优化中继转发与干扰协作机制,并基于空间分集接收选择合并(Selection Combining, SC)或MRC技术合并接收信号,从可靠性与安全性两个维度对系统性能进行联合建模与量化评估。主要研究工作包括:1)构建联合优化模型与节点选择机制:建立含半双工协作干扰的跨域无人机协同系统模型,提出以最大化链路信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)为准则、联合优选最佳中继与干扰节点的传输机制,旨在动态构建最优安全传输路径;2)推导系统性能的闭式解析表达式:在已知干扰链路统计信道状态信息的条件下,基于选择合并与最大比合并分集技术,推导系统中中断概率与截获概率的精确闭式表达式,为跨域协同系统的安全—可靠性折衷分析提供了理论工具;3)完成系统的综合性能评估与验证:通过蒙特卡洛仿真,全面验证理论分析的正确性,并定量评估中继节点、目的节点及干扰节点数量等关键参数对系统中中断与截获性能的影响,揭示所提方案在实现安全—可靠性权衡方面的显著优势。

1 系统模型

为构建联合优化模型与节点选择机制,建立含半双工的跨域无人机协同系统模型,提出以最大化链路信干噪比为准则的联合节点选择机制,旨在动态构建最优安全传输路径,如图1所示。本模型由单个源节点 S 、中继节点组 $R_i (1 \leq i \leq N)$ 、目的节点组 $D_m (1 \leq m \leq M)$ 、单个窃听节点 E 和协作干扰节点组 $J_k (1 \leq k \leq K)$ 构成。各通信节点配备单天线用于收发信息,协作干扰节点工作于半双工

模式,在源节点或中继节点发送信息的时隙内发射干扰信号,以恶化窃听信道。中继节点采用解码转发模式,对源节点信号进行解码并重新编码后转发至目的节点。源节点至目的节点的直接链路存在且可用,协作干扰节点利用自身发射功率定向干扰窃听节点,进一步降低其信道质量,实现物理层安全通信。以信干噪比为准,优先使用中继从目的节点集中选择,将源-目的链路 SINR 最大的节点作为最优目的节点,直连仅作为备份。



整个中继选择与协作干扰的联合传输过程分为两个时隙:第1时隙中,源节点向所有中继节点广播信号,能够正确解码的中继构成解码集 C ;第2时隙中,若解码集 C 非空,则从中选择与目的节点之间信干噪比最大的中继作为最佳中继,由其解码并转发信号至最优目的节点,再由该目的节点分发至其他目的节点。窃听节点在两个时隙均尝试窃听,被动接收源节点与协作干扰节点发射的信号,其中干扰信号不影响合法中继与目的节点的正常接收。

本文提出的跨域无人机协同的物理层安全性能分析方法包含3个核心组件:1)最优目的节点选择机制;2)中继节点动态选择策略;3)SC/MRC空间分集接收技术。通过联合优化中继转发与干扰协作,实现在跨域维度上最大化合法链路窃听链路的信道质量差异。

1.1 信道模型

本模型假设系统能够通过前述机制获得窃听链路大尺度衰落的统计信道状态信息,而且源节点、目的节点、中继节点以及干扰节点相互之间的信道状态信息(Channel State Information, CSI)已知,无人机中继节点与地面固定节点构成空地异构链路,基于此进行协作干扰的功率分配与调度,

使得本文聚焦于评估所提方案在理想条件下的性能上界^[14-15]。

无人机飞行和信息传输所需的能量由携带电源提供,无人机中继 R 的坐标为 $(0, y, H)$,无人机沿 y 轴从初始位置 d_0 以速度 v_0 向目的节点 D 飞行。 v_0 满足 $v_0 < v_{\max}$,其中 $v_{\max}$ 是以米/秒(m/s)为单位的最大速度, $v_{\max}$ 的大小取决于无人机从 d_0 到最终位置的能量消耗和预定飞行时间 t 。如节点 X 到 Y 之间的距离为 $d_{XY} = [H^2 + (d_0 + v_0 t)^2]^{1/2}$ 。窃听节点接收源节点和中继节点组的广播信息,并且窃听节点中CSI已知,所有信道均服从独立不同分布的瑞利衰落,信道衰落系数在各传输时隙内保持不变且在不同传输时隙之间相互独立。需要指出的是,本文核心目的是提出一种协同机制与分析方法,为理论推导方便采用瑞利衰落模型,而实际空地信道通常设定为视距链路的莱斯信道。如果所提方案在信道波动剧烈的瑞利信道下表现良好,那么在实际的莱斯信道中预计会有更优的性能。

$h_{XY}(X, Y \in \{S, R_i, J_k, D_m, E\})$ 表示从节点 X 到 Y 的复信道衰落系数,对应的信道功率增益定义为

$$g_{XY} = |h_{XY}|^2 \quad (1)$$

式中, g_{XY} 服从独立的指数分布,均值为 $1/\lambda_{XY}$ 。 $\lambda_{XY} = (d_{XY})^\chi$, d_{XY} 为信号在无线信道中节点 X 到 Y 的实际传播距离, χ 为衰减因子。因此, g_{XY} 的概论密度函数和累计分布函数为:

$$F_{g_{XY}}(x) = 1 - \exp(-\lambda_{XY}x) \quad (2)$$

$$f_{g_{XY}}(x) = \frac{\partial F_{g_{XY}}(x)}{\partial x} = \lambda_{XY} \exp(-\lambda_{XY}x) \quad (3)$$

1.2 信号模型

在第1个传输时隙(T_1)中,协作中继节点、目的节点处接收信号分别为:

$$y_{SR_i}^{T_1} = \sqrt{P_S} h_{SR_i} x_S + \sum_{k=1}^K \sqrt{P_{J_k}} h_{J_k R_i} x_k + n_{SR_i} \quad (4)$$

$$y_{SD_m}^{T_1} = \sqrt{P_S} h_{SD_m} x_S + \sum_{k=1}^K \sqrt{P_{J_k}} h_{J_k D_m} x_k + n_{SD_m} \quad (5)$$

式中: x_S 表示第1个时隙信源发送的信号,其功率为 $E[|x_S|^2] = P_S$, $E[\cdot]$ 表示数学期望; x_k 表示协作干扰节点发送的干扰信号,其功率为 $E[|x_k|^2] = P_{J_k}$; n_{SR_i} 、 n_{SD_m} 表示零均值的加性高斯白噪声,方差为 N_0 。由于协作干扰节点发射的干扰信号不影响中继节点和目的节点对信号的接收,式(4)和式(5)可简写如下:

$$y_{SR_i}^{T_1} = \sqrt{P_S} h_{SR_i} x_S + n_{SR_i} \quad (6)$$

$$y_{SD_m}^{T_1} = \sqrt{P_S} h_{SD_m} x_S + n_{SD_m} \quad (7)$$

窃听节点接收信号可以表示为

$$y_{SE}^{T_1} = \sqrt{P_S} h_{SE} x_S + \sum_{k=1}^K \sqrt{P_{J_k}} h_{J_k E} x_k + n_{SE} \quad (8)$$

式中, n_{SE} 表示零均值的加性高斯白噪声, 方差为 N_0 。

在第 1 个传输时隙中, 由式(6)~式(8)可知, 中继节点、目的节点和窃听节点的 SINR 分别为:

$$\gamma_{SR_i} = \frac{P_S |h_{SR_i}|^2}{N_0} = \frac{P_S g_{SR_i}}{N_0} \quad (9)$$

$$\gamma_{SD_m} = \frac{P_S |h_{SD_m}|^2}{N_0} = \frac{P_S g_{SD_m}}{N_0} \quad (10)$$

$$\gamma_{SE} = \frac{P_S |h_{SE}|^2}{\sum_{k=1}^K P_{J_k} |h_{J_k E}|^2 + N_0} = \frac{P_S g_{SE}}{Z + N_0} \quad (11)$$

式中, $Z = \sum_{k=1}^K P_{J_k} \gamma_{J_k E}$, $\gamma_{J_k E} = g_{J_k E} = |h_{J_k E}|^2$ 表示干扰节点 J_k 到窃听节点 E 的信道功率增益, 服从均值为 $1/\lambda_{J_k E}$ 的指数分布。

在第 2 个传输时隙(T_2)中, 如果译码集合 C 不为空集, 则从译码集合 C 中选择一个特定的中继节点来重新编码转发源节点信息到目的节点。为不失一般性, 假设 R_b 是被选择的最佳中继节点, 最佳中继节点转发信源信号, 目的节点和窃听节点接收信号公式分别为:

$$y_{R_b D_m}^{T_2} = \sqrt{P_{R_b}} h_{R_b D_m} x_S + \sum_{k=1}^K \sqrt{P_{J_k}} h_{J_k D_m} x_k + n_{R_b D_m} \quad (12)$$

$$y_{R_b E}^{T_2} = \sqrt{P_{R_b}} h_{R_b E} x_S + \sum_{k=1}^K \sqrt{P_{J_k}} h_{J_k E} x_k + n_{R_b E} \quad (13)$$

式中: P_{R_b} 为最佳中继节点 R_b 的发射功率; $n_{R_b D_m}$ 、 $n_{R_b E}$ 表示零均值的加性高斯白噪声, 方差为 N_0 。

由于干扰信号不影响目的节点对信号的接收, 根据式(12)、式(13), 目的节点和窃听节点在第 2 个时隙的接收 SINR 分别为:

$$\gamma_{R_b D_m} = \frac{P_{R_b} |h_{R_b D_m}|^2}{N_0} = \frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} \quad (14)$$

$$\gamma_{R_b E} = \frac{P_{R_b} |h_{R_b E}|^2}{\sum_{k=1}^K P_{J_k} |h_{J_k E}|^2 + N_0} = \frac{P_{R_b} g_{R_b E}}{Z + N_0} \quad (15)$$

1.3 最佳节点选择

在 $S \rightarrow D_m$ 、 $R_i \rightarrow D_m$ 链路中, 为更好地描述系统模型性能, 采用 SC 和 MRC 空间分集技术, 对系统模型中各分集链路做线性处理, 由式(10)、式(14)可知, 目的节点组端到端的 SINR 分别为:

$$\gamma_{D_m}^{SC} = \max(\gamma_{SD_m}, \gamma_{R_b D_m}) \quad (16)$$

$$\gamma_{D_m}^{MRC} = \gamma_{SD_m} + \gamma_{R_b D_m} \quad (17)$$

式中, $\gamma_{D_m}^{SC}$ 、 $\gamma_{D_m}^{MRC}$ 分别为基于 SC 和 MRC 空间分集技术的目的节点端到端的 SINR。

在 $S \rightarrow E$ 、 $R_i \rightarrow E$ 链路中, 为更好地描述系统模型性能, 采用 SC 和 MRC 空间分集技术, 对系统模型中各分集链路做线性处理, 由式(11)、式(15)可知, 窃听节点端到端的 SINR 分别为:

$$\gamma_E^{SC} = \max(\gamma_{SE}, \gamma_{R_b E}) \quad (18)$$

$$\gamma_E^{MRC} = \gamma_{SE} + \gamma_{R_b E} \quad (19)$$

式中, γ_E^{SC} 、 γ_E^{MRC} 分别为基于 SC 和 MRC 空间分集技术的窃听节点端到端的 SINR。

为提升无线中继通信系统的链路传输安全, 本文综合考虑合法链路与窃听链路的信道状态信息, 在系统发射功率受限条件下, 提出一种基于 SINR 的最佳目的节点选择方案。该方案以 SINR 为性能度量, 从 M 个目的节点中选取最优的 m 个节点用于信息传输, 其选择准则如下:

$$m = \arg\max_{1 \leq l \leq M} (\gamma_{SD_l}) = \arg\max_{1 \leq l \leq M} \left(\frac{P_S g_{SD_l}}{N_0} \right) = \arg\max_{1 \leq l \leq M} (g_{SD_l}) \quad (20)$$

在最优目的节点确定的前提下, 设计一种基于协作解码转发的最佳中继选择传输方案。该方案由能够正确解码源节点信号的 n 个中继构成解码集 C , 在满足信息安全传输要求下, 以 SINR 为准则, 从 C 中选取最优的 b 个中继参与协同传输, 其选择准则如下:

$$b = \arg\max_{1 \leq i \leq n} \left(\frac{P_{R_i} g_{R_i D_m}}{N_0} \right) = \arg\max_{1 \leq i \leq n} (g_{R_i D_m}) \quad (21)$$

式中, n 为成功解码源节点信号的中继节点数量。

2 性能分析

为推导系统性能的闭式解析表达式, 基于第 1 节构建的系统模型, 从可靠性和安全性两个维度进行理论分析, 分别针对 SC 与 MRC 两种空间分集技术, 严格推导系统中断概率与截获概率的精确闭式表达式, 为跨域协同系统的安全—可靠性折衷分析提供理论工具。

2.1 中断概率准则

中断概率是评估无线通信系统可靠性的关键指标, 反映通信链路失效的风险。本文定义为: 合法主链路的信干噪比低于预设阈值的概率。

2.1.1 采用 SC 的选择中继可靠性分析

根据中断概率定义和全概率公式, 采用 SC 的选择中继方案的中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}}^{\text{SC}} = \sum_{m=1}^M \Pr(C=\emptyset) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SD_m} < \gamma_{\text{th}}\right) + \sum_{C \subset R, C \neq \emptyset} \sum_{m=1}^M \Pr(|C|=n) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SD_m}^{\text{SC}} < \gamma_{\text{th}}\right) \quad (22)$$

式中: $|C|$ 表示集合 C 中的元素个数, 即正确解码源节点信息的中继节点数目; γ_{th} 表示 SINR 门限值。 $|C|=0$ 时, 意味着 $C=\emptyset$ 的情况, 中继节点组不能转发源节点信息至最优目的节点。

$\Pr(|C|=n)$ 表示存在 n 个中继节点能够成功译码源节点信息的概率, Ω 表示信道参数, 公式如下:

$$\Pr(|C|=n) = \prod_{R_i \in C} \Pr(\gamma_{SR_i} > \gamma_{\text{th}}) \prod_{\substack{R_i \in R, \\ R_i \notin C}} \Pr(\gamma_{SR_i} < \gamma_{\text{th}}) = \prod_{R_i \in C} \Pr\left(\frac{P_S g_{SR_i}}{N_0} > \gamma_{\text{th}}\right) \prod_{\substack{R_i \in R, \\ R_i \notin C}} \Pr\left(\frac{P_S g_{SR_i}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right) = \left[\exp\left(-\frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{P_S \Omega_{SR}}\right)\right]^n \left[1 - \exp\left(-\frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{P_S \Omega_{SR}}\right)\right]^{N-n} \quad (23)$$

$\Pr(C=\emptyset)$ 表示没有中继节点能够成功译码源节点信息的概率, 用数学公式可以表示为

$$\Pr(C=\emptyset) = \left[1 - \exp\left(-\frac{N_0 \gamma_{\text{th}}}{P_S \Omega_{SR}}\right)\right]^N \quad (24)$$

当解码集合 $C=\emptyset$ 时, 用数学公式可以表示为

$$\Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SD_m}^{\text{SC}} < \gamma_{\text{th}}\right) = \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SD_m} < \gamma_{\text{th}}\right) \cdot \Pr\left(\frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right) \quad (25)$$

式中, $\Pr\left(\frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right)$ 表示最佳中继节点 R_b 至目的节点链路 SINR 小于门限值的概率, 表示为

$$\Pr\left(\frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right) = \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RD}}\right)\right]^n \quad (26)$$

当解码集合 $|C|=n$ 时, 用数学公式表示为

$$\Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SD_m} < \gamma_{\text{th}}\right) = \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \frac{P_S g_{SD_m}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right) = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{C_{M-1}^m (-1)^m}{\Omega_{SD}} \int_0^{\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S}} \exp\left(-\frac{(m+1)x}{\Omega_{SD}}\right) dx = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{C_{M-1}^m (-1)^m}{m+1} \left[1 - \exp\left(-\frac{(m+1)\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S \Omega_{SD}}\right)\right] \quad (27)$$

式中, $\Pr\left(\max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}) < x \mid x\right)$ 和 $\Pr\left(\frac{P_S x}{N_0} < \gamma_{\text{th}} \mid x\right)$ 的表达

式如下:

$$\Pr\left(\max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}) < x \mid x\right) = \left[\Pr(g_{SD_r} < x)\right]^{M-1} = \sum_{m=0}^{M-1} C_{M-1}^m (-1)^m \exp\left(-\frac{mx}{\Omega_{SD}}\right) \quad (28)$$

$$\Pr\left(\frac{P_S x}{N_0} < \gamma_{\text{th}} \mid x\right) = \begin{cases} 0, & x \geq \frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S}; \\ 1, & x < \frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S}. \end{cases} \quad (29)$$

最后, 联立式(23)~式(27), 并将其代入式(22), 即可得到该中继选择方案中断概率的精确闭式表达式:

$$P_{\text{out}}^{\text{SC}} = \sum_{m=1}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), C=\emptyset, \gamma_{SD_m} < \gamma_{\text{th}}\right) + \sum_{C \subset R, C \neq \emptyset} \sum_{m=1}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), |C|=n, \gamma_{SD_m}^{\text{SC}} < \gamma_{\text{th}}\right) = \sum_{m=1}^M \Pr(C=\emptyset) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \frac{P_S g_{SD_m}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right) + \sum_{C \subset R, C \neq \emptyset} \sum_{m=1}^M \Pr(|C|=n) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \frac{P_S g_{SD_m}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right) \cdot \Pr\left(\frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right) \quad (30)$$

2.1.2 采用 MRC 的选择中继可靠性分析

基于中断概率定义与全概率公式, 采用 MRC 的中继选择方案的中断概率可表示为

$$P_{\text{out}}^{\text{MRC}} = \sum_{m=1}^M \Pr(C=\emptyset) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SD_m} < \gamma_{\text{th}}\right) + \sum_{C \subset R, C \neq \emptyset} \sum_{m=1}^M \Pr(|C|=n) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SD_m}^{\text{MRC}} < \gamma_{\text{th}}\right) \quad (31)$$

当解码集合 $|C|=n$ 时, 用数学公式表示为

$$\Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SD_m}^{\text{MRC}} < \gamma_{\text{th}}\right) = \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \frac{P_S g_{SD_m}}{N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} < \gamma_{\text{th}}\right) = \int_0^{\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S}} \sum_{m=0}^{M-1} C_{M-1}^m (-1)^m \exp\left(-\frac{mx}{\Omega_{SD}}\right) \cdot$$

$$\sum_{n_1=0}^n C_n^{n_1} (-1)^{n_1} \exp\left(-\frac{n_1 \gamma_{th} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RD}}\right) \exp\left(\frac{n_1 P_S x}{P_{R_b} \Omega_{RD}}\right) \cdot \frac{1}{\Omega_{SD}} \exp\left(-\frac{x}{\Omega_{SD}}\right) dx = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n_1=0}^n \frac{C_n^{n_1} C_{M-1}^{m-1}}{(-1)^{m+n_1}} \frac{1}{m+1 - \frac{n_1 P_S \Omega_{SD}}{P_{R_b} \Omega_{RD}}} \left[\exp\left(-\frac{n_1 \gamma_{th} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RD}}\right) - \exp\left(-\frac{(m+1) \gamma_{th} N_0}{P_S \Omega_{SD}}\right) \right] \quad (32)$$

式中, $\Pr\left(\max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}) < x\right)$ 和 $\Pr\left(\frac{P_S x}{N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} < \gamma_{th} | x\right)$ 的表达式如下:

$$\Pr\left(\max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}) < x\right) = \sum_{m=0}^{M-1} C_{M-1}^m (-1)^m \exp\left(-\frac{mx}{\Omega_{SD}}\right) \quad (33)$$

$$\Pr\left(\frac{P_S x}{N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} < \gamma_{th} | x\right) = \begin{cases} 0, x > \frac{\gamma_{th} N_0}{P_S}; \\ \sum_{n_1=0}^n C_n^{n_1} (-1)^{n_1} \exp\left(-\frac{n_1 \gamma_{th} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RD}}\right) \exp\left(\frac{n_1 P_S x}{P_{R_b} \Omega_{RD}}\right), x \leq \frac{\gamma_{th} N_0}{P_S}. \end{cases} \quad (34)$$

最后,联立式(23)、式(24)、式(27)与式(32),并将其代入式(31),可得中继选择方案的中断概率闭式表达式:

$$P_{out}^{MRC} = \sum_{m=1}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), C = \emptyset, \gamma_{SD_m} < \gamma_{th}\right) + \sum_{\substack{C \subset R, m=1 \\ C \neq \emptyset}}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), |C|=n, \gamma_{D_m}^{MRC} < \gamma_{th}\right) = \sum_{m=1}^M \Pr(C = \emptyset) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \frac{P_S g_{SD_m}}{N_0} < \gamma_{th}\right) + \sum_{\substack{C \subset R, m=1 \\ C \neq \emptyset}}^M \Pr(|C|=n) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \frac{P_S g_{SD_m}}{N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b D_m}}{N_0} < \gamma_{th}\right) \quad (35)$$

2.2 截获概率准则

截获概率是衡量无线通信系统安全性能的关键指标,物理意义为机密信息被成功窃听风险。本文定义为:窃听链路信干噪比超过给定安全门限的概率。

2.2.1 采用SC的选择协作安全性分析

在跨域无人机协同系统模型中,若窃听链路的瞬时信干噪比超过门限值,窃听节点E可能成功解码来自源节点S及最佳中继节点 R_b 的信号。为分析此场景下的安全性能,可利用空间分集技术,对第1时隙源自S的信号与第2时隙来自最佳中继

R_b 的转发信号进行联合处理。据此,该中继选择方案下系统截获概率基于全概率公式推导如下:

$$P_{out}^{E,SC} = \Pr(C = \emptyset) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_{SE} > \gamma_{th}\right) + \sum_{\substack{C \subset R, m=1 \\ C \neq \emptyset}}^M \Pr(|C|=n) \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}}), \gamma_E^{SC} > \gamma_{th}\right) = \sum_{m=1}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}})\right) \Pr(C = \emptyset) \Pr(\gamma_{SE} > \gamma_{th}) + \sum_{\substack{C \subset R, m=1 \\ C \neq \emptyset}}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{1 \leq l' \leq M, l' \neq m} (g_{SD_{l'}})\right) \Pr(|C|=n) \Pr(\min(\gamma_{SE}, \gamma_{R_b E}) > \gamma_{th}) \quad (36)$$

当解码集 $C = \emptyset$ 为空时,系统仅存在直传链路。此时,截获概率 $\Pr(\gamma_{SE} > \gamma_{th})$ 即源节点到窃听节点的SINR大于门限值的概率,可由下式给出:

$$\Pr(\gamma_{SE} > \gamma_{th}) = \int_0^\infty \exp\left(-\frac{\gamma_{th} z}{P_S \Omega_{SE}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{P_S \Omega_{SE}}\right) f_Z(z) dz = \frac{1}{\Gamma(K) (P_{J_k} \Omega_{JE})^K} \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{P_S \Omega_{SE}}\right) \int_0^\infty z^{K-1} \exp\left(-\frac{\gamma_{th} z}{P_S \Omega_{SE}}\right) \exp\left(-\frac{z}{P_{J_k} \Omega_{JE}}\right) dz = \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{P_S \Omega_{SE}}\right) \left(1 + \frac{P_{J_k} \Omega_{JE} \gamma_{th}}{P_S \Omega_{SE}}\right)^{-K} \quad (37)$$

式中, $f_Z(z) = \frac{z^{K-1}}{\Gamma(K) (P_{J_k} \Omega_{JE})^K} \exp\left(-\frac{z}{P_{J_k} \Omega_{JE}}\right)$,由常见函数积分查表 $\int_0^\infty x^{v-1} e^{-ux} dx = \frac{1}{u^v} \Gamma(v)$ 可得。

当解码集合 $|C|=n$ 时, $\Pr(\min(\gamma_{SE}, \gamma_{R_b E}) > \gamma_{th})$

可以用数学公式表示为

$$\Pr(\min(\gamma_{SE}, \gamma_{R_b E}) > \gamma_{th}) = \int_0^\infty \Pr\left(\frac{P_S g_{SE}}{z + N_0} > \gamma_{th} | z\right) \Pr\left(\frac{P_{R_b} g_{R_b E}}{z + N_0} > \gamma_{th} | z\right) f_Z(z) dz = \Gamma(K) (P_{J_k} \Omega_{JE})^{-K} \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{P_S \Omega_{SE}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \int_0^\infty z^{K-1} \exp\left(-\frac{\gamma_{th} z}{P_S \Omega_{SE}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{th} z}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \exp\left(-\frac{z}{P_{J_k} \Omega_{JE}}\right) dz = \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{P_S \Omega_{SE}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{th} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \left(1 + \frac{P_{J_k} \Omega_{JE} \gamma_{th}}{P_S \Omega_{SE}} + \frac{P_{J_k} \Omega_{JE} \gamma_{th}}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right)^{-K} \quad (38)$$

结合全概率公式, $\Pr\left(g_{SD_m} > \max_{\substack{1 \leq l' \leq M, \\ l' \neq m}}(g_{SD_{l'}})\right)$ 表示为

$$\Pr\left(g_{SD_m} > \max_{\substack{1 \leq l' \leq M, \\ l' \neq m}}(g_{SD_{l'}})\right) = \int_0^\infty \Pr\left(\max_{\substack{1 \leq l' \leq M, \\ l' \neq m}}(g_{SD_{l'}}) < x \mid x\right) f_{g_{SD_m}}(x) dx = \sum_{m=0}^{M-1} C_{M-1}^m (-1)^m \int_0^\infty \frac{1}{\Omega_{SD}} \exp\left(-\frac{(m+1)x}{\Omega_{SD}}\right) dx = \sum_{m=0}^{M-1} \frac{C_{M-1}^m (-1)^m}{m+1} \quad (39)$$

同理,可得

$$\Pr\left(g_{R_b D} > \max_{\substack{1 \leq i \leq n, \\ i \neq m}}(g_{R_i D})\right) = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{C_{n-1}^i (-1)^i}{i+1} \quad (40)$$

2.2.2 采用 MRC 的选择协作安全性分析

根据截获概率的定义,并运用全概率公式,可推导出采用 MRC 技术的协作中继方案的截获概率为

$$P_{\text{out}}^{\text{E,MRC}} = \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{\substack{1 \leq l' \leq M, \\ l' \neq m}}(g_{SD_{l'}}), C = \emptyset, \gamma_{SE} > \gamma_{\text{th}}\right) + \sum_{\substack{C \subset R, m=1 \\ C \neq \emptyset}}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{\substack{1 \leq l' \leq M, \\ l' \neq m}}(g_{SD_{l'}}), |C|=n, \gamma_E^{\text{MRC}} > \gamma_{\text{th}}\right) = \sum_{m=1}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{\substack{1 \leq l' \leq M, \\ l' \neq m}}(g_{SD_{l'}})\right) \Pr(C=\emptyset) \Pr(\gamma_{SE} > \gamma_{\text{th}}) + \sum_{\substack{C \subset R, m=1 \\ C \neq \emptyset}}^M \Pr\left(g_{SD_m} > \max_{\substack{1 \leq l' \leq M, \\ l' \neq m}}(g_{SD_{l'}})\right) \Pr(|C|=n) \Pr(\gamma_{SE} + \gamma_{R_b E} > \gamma_{\text{th}}) \quad (41)$$

当解码集合 $|C|=n$ 时, $\Pr(\gamma_{SE} + \gamma_{R_b E} > \gamma_{\text{th}})$ 可以表示为

$$\Pr(\gamma_{SE} + \gamma_{R_b E} > \gamma_{\text{th}}) = \int_0^\infty \Pr\left(\frac{P_S g_{SE}}{z + N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b E}}{z + N_0} > \gamma_{\text{th}} \mid z\right) f_Z(z) dz = \frac{P_{R_b} \Omega_{RE}}{P_{R_b} \Omega_{RE} + P_S \Omega_{SE}} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \Gamma(K) (P_{J_k} \Omega_{JE})^{-K} + \int_0^\infty z^{K-1} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} z}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \exp\left(-\frac{z}{P_{J_k} \Omega_{JE}}\right) dz + \frac{P_S \Omega_{SE}}{P_{R_b} \Omega_{RE} + P_S \Omega_{SE}} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S \Omega_{SE}}\right) \Gamma(K) (P_{J_k} \Omega_{JE})^{-K} + \int_0^\infty z^{K-1} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} z}{P_S \Omega_{SE}}\right) \exp\left(-\frac{z}{P_{J_k} \Omega_{JE}}\right) dz =$$

$$\frac{P_{R_b} \Omega_{RE}}{P_{R_b} \Omega_{RE} + P_S \Omega_{SE}} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \left(1 + \frac{P_{J_k} \Omega_{JE} \gamma_{\text{th}}}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right)^{-K} + \frac{P_S \Omega_{SE}}{P_{R_b} \Omega_{RE} + P_S \Omega_{SE}} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S \Omega_{SE}}\right) \left(1 + \frac{P_{J_k} \Omega_{JE} \gamma_{\text{th}}}{P_S \Omega_{SE}}\right)^{-K} \quad (42)$$

式中, $\Pr\left(\frac{P_S g_{SE}}{z + N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b E}}{z + N_0} > \gamma_{\text{th}} \mid z\right)$ 和 $\Pr\left(\frac{P_S g_{SE}}{z + N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b E}}{z + N_0} > \gamma_{\text{th}} \mid z, g_{SE}\right)$ 的表达式如下:

$$\Pr\left(\frac{P_S g_{SE}}{z + N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b E}}{z + N_0} > \gamma_{\text{th}} \mid z\right) = \int_0^\infty \Pr\left(\frac{P_S g_{SE}}{z + N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b E}}{z + N_0} > \gamma_{\text{th}} \mid z, g_{SE}\right) f_{g_{SE}}(g_{SE}) dg_{SE} = \frac{P_{R_b} \Omega_{RE}}{P_{R_b} \Omega_{RE} + P_S \Omega_{SE}} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} z}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) + \frac{P_S \Omega_{SE}}{P_{R_b} \Omega_{RE} + P_S \Omega_{SE}} \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} z}{P_S \Omega_{SE}}\right) \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S \Omega_{SE}}\right) \quad (43)$$

$$\Pr\left(\frac{P_S g_{SE}}{z + N_0} + \frac{P_{R_b} g_{R_b E}}{z + N_0} > \gamma_{\text{th}} \mid z, g_{SE}\right) = \begin{cases} 1, & g_{SE} > \frac{\gamma_{\text{th}} z}{P_S} + \frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S}; \\ \exp\left(-\frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \exp\left(\frac{P_S g_{SE}}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right) \exp\left(\frac{\gamma_{\text{th}} z}{P_{R_b} \Omega_{RE}}\right), & \\ g_{SE} < \frac{\gamma_{\text{th}} z}{P_S} + \frac{\gamma_{\text{th}} N_0}{P_S}. \end{cases} \quad (44)$$

3 数值仿真与分析

为完成系统的综合性能评估与验证,通过蒙特卡洛仿真,全面验证第 2 节理论分析的正确性,并定量评估中继节点、目的节点及干扰节点数量等关键参数对系统中断与截获性能的影响,揭示所提方案在实现安全—可靠性权衡方面的显著优势。

采用 MATLAB 平台进行仿真,共运行 10^6 次独立实验以确保统计可靠性。具体仿真参数配置如表 1 所示,其基本假设是合法传输链路的平均信道增益显著优于窃听链路。

中继节点数量对中断概率的影响如图 2 所示。结果显示,系统中断概率随信干噪比增加而单调递减,且在低信干噪比区域 SC 与 MRC 性能差异有限。随着信干噪比提升,增加中继节点显著改善了系统可靠性,其中 MRC 技术的优势尤为突出。当 $N=5$ 、 $\gamma=-2$ dB 时, MRC 方案的中断概率较 SC 方案降低约一个数量级,凸显在多中继场景下采用 MRC 分集接收技术的显著性能增益。

表1 仿真参数

符号	含义	数值
M	目的节点个数	4
N	中继节点个数	5
K	干扰节点个数	3
P_S	源节点 S 发射功率/dBm	3
P_R	中继节点 R 发射功率/dBm	3
P_J	干扰节点 J 发射功率/dBm	2
N_0	噪声功率/(dBm $\cdot$ Hz $^{-1}$)	1
Ω_{SR}	SR 信道参数/dB	5
Ω_{SD}	SD 信道参数/dB	4
Ω_{RD}	RD 信道参数/dB	3
Ω_{SE}	SE 信道参数/dB	1
Ω_{JE}	JE 信道参数/dB	2
Ω_{RE}	RE 信道参数/dB	1
γ	系统信干噪比/dB	-20~10或-20~20

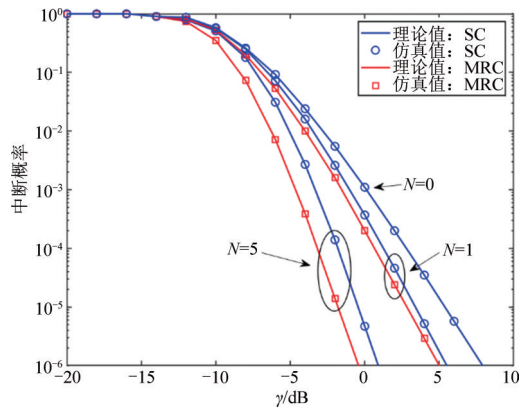


图2 中继节点数量对中断概率的影响

目的节点数量对中断概率的影响如图3所示。结果表明,系统中断概率随信干噪比提升而单调下降,而且增加目的节点数可显著改善系统可靠性。定量分析显示,当信干噪比为-5 dB、目的节点数 M 从1增至10时,采用MRC技术中断概率从 2.1×10^{-3} 降至 1.0×10^{-5} ,降幅达99.95%,且始终优于SC技术。这证明通过增加目的节点拓展接收分集维度,能有效利用MRC优势,大幅提升信息传输成功率。

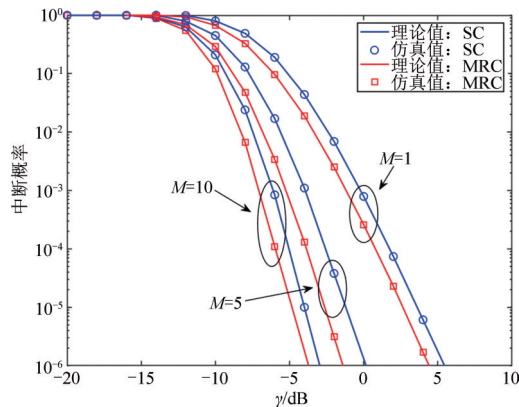


图3 目的节点数量对中断概率的影响

图4展示了不同干扰节点数对系统安全性能的影响,定量分析表明,随着干扰节点数 K 从1增至10,系统截获概率显著降低。相较于无干扰基准场景,当 $K=10$ 时,采用SC与MRC技术下的截获概率分别下降了75%和81%,这一结果凸显了协作干扰在恶化窃听信道、提升物理层安全性方面的决定性作用。

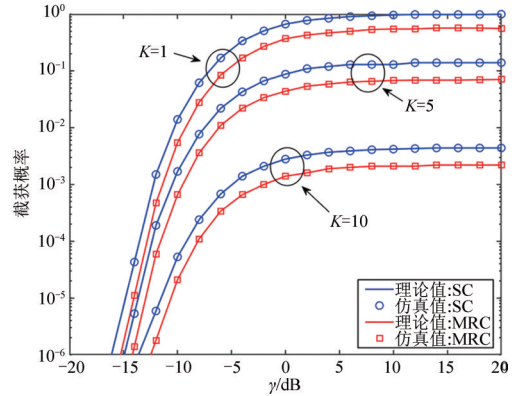


图4 干扰节点数量对截获概率的影响

图5的定量结果揭示了中继与干扰节点对系统安全性的差异化影响。当固定中继节点数 ($N=6$) 时,将干扰节点从 $K=3$ 增至 $K=6$,可使截获概率下降超过36%,凸显了干扰节点在恶化窃听信道、提升抗窃听能力方面的主导作用。相比之下,在相同干扰水平下(如 $K=3$ 或 $K=6$),将中继节点数从 $N=3$ 增加至 $N=6$,对截获概率的影响不足5%,效果甚微。这一鲜明对比证明,在所述的系统模型中,部署协作干扰节点是提升物理层安全性的更有效手段。

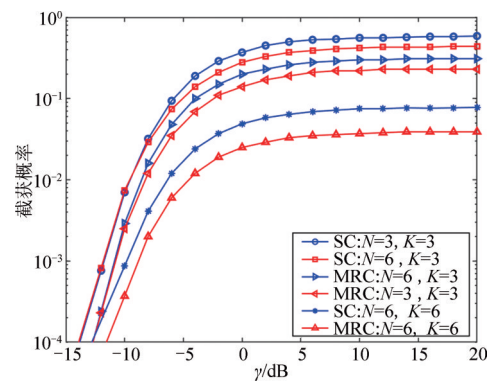


图5 截获概率随中继与干扰节点数量的变化关系

图6揭示了系统安全性与可靠性之间的明确折衷关系。定量分析表明,为达到相同的安全水平(如截获概率为0.2),采用MRC技术的中断概率为 1.0×10^{-5} ,较SC技术的 3.2×10^{-3} 改善了两个数量级以上。具体而言,在干扰节点数 $K=10$ 且信干噪比为0 dB时,MRC对应的中断概率比SC降低约

60%。同时,增加干扰节点能系统性优化此折衷性能,即在相同中断概率下获得更低的截获概率。

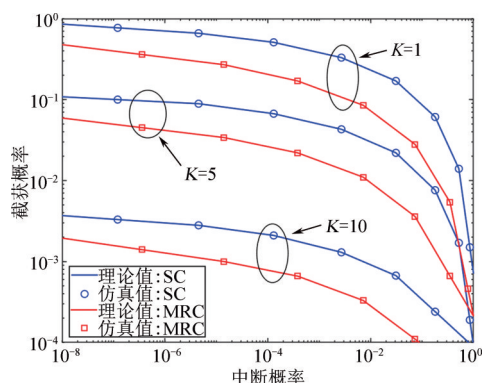


图6 截获概率与中断概率的变化关系

4 结束语

通过中继转发信息和协作干扰窃听节点相互联合,构建跨域无人机协同的物理层安全模型,采用SC、MRC等空间分集技术,实现合法链路与窃听链路之间信道质量差异的最大化,为跨域无人机协同系统提供了理论支撑。

需要指出的是,本文工作在已知窃听统计CSI的理想假设下,验证了所提联合方案的有效性。未来的研究将考虑在完全未知或部分已知窃听CSI的更严峻场景下,结合更符合空地信道特性的莱斯衰落或更为复杂的几何随机模型,设计具有鲁棒性的安全传输方案。

参考文献:

- [1] 黄海燕. 认知无线网络中的协作中继传输技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2016: 1-110.
- [2] 陈艳, 欧阳林芳. SWIPT不可信中继系统安全性能的优化[J]. 信息工程大学学报, 2024, 25(4): 397-403.
- [3] 李美玲, 董增寿, 王钢飞, 等. 基于多窃听协作的最佳中继安全可靠性能研究[J]. 通信学报, 2017, 38(10): 71-80.
- [4] 郭美丽, 李灵燕, 罗永伦. 无线通信物理层安全传输技术研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(5): 28-31.
- [5] LEE K, HONG J P, CHOI H H, et al. Wireless-powered two-way relaying protocols for optimizing physical layer security [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2019, 14(1): 162-174.
- [6] SHI H, CAI Y M, CHEN D C, et al. Physical layer security in an untrusted energy harvesting relay network [J]. IEEE Access, 2019, 7: 24819-24828.
- [7] LV L, ZHOU F H, 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.
- [8] NGUYEN T N, TRAN D H, VAN CHIEN T, et al. Security-reliability tradeoff analysis for SWIPT- and AF-based IoT networks with friendly jammers [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(21): 21662-21675.
- [9] LIU H W, YOO S J, KWAK K S. Opportunistic relaying for low-altitude UAV swarm secure communications with multiple eavesdroppers [J]. Journal of Communications and Networks, 2018, 20(5): 496-508.
- [10] LEI H, WANG D, PARK K H, et al. On secure UAV communication systems with randomly located eavesdroppers [C]//Proceedings of the 2019 IEEE/CIC International Conference on Communications in China. Piscataway, USA: IEEE, 2019: 201-206.
- [11] MA R Q, YANG W W, ZHANG Y, et al. Secure mmWave communication using UAV-enabled relay and cooperative jammer [J]. IEEE Access, 2019, 7: 119729-119741.
- [12] ZHAO N, LI Y X, ZHANG S, et al. Security enhancement for NOMA-UAV networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 3994-4005.
- [13] NGUYEN T N, TRAN D H, VAN CHIEN T, et al. Physical layer security in AF-based cooperative SWIPT sensor networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(1): 689-705.
- [14] 黄海燕, 李阳轲, 梁琳琳, 等. 基于CR-RSMA的无人机反向散射通信系统中中断性能分析[J]. 西安邮电大学学报, 2025, 30(4): 1-8.
- [15] 黄海燕, 艾宇昕, 梁琳琳, 等. 窃听器攻击下的RSMA无线通信系统中的物理层安全性能分析[J]. 信息网络安全, 2024, 24(2): 252-261.

(编辑: 李志豪)