

基于多窃听协作的最佳中继安全可靠性能研究

李美玲¹, 董增寿¹, 王钢飞¹, 路兆铭^{2,3}

(1. 太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024;

2. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876; 3. 北京市网络与体系架构重点实验室, 北京 100876)

摘 要: 物理层安全技术可以有效地对抗窃听行为, 提高主链路传输的可靠性。考虑存在多个窃听攻击的无线中继网络, 且信源到目的端的直传链路始终存在, 中继节点和窃听节点在转发数据时均采用解码转发方式, 提出了基于多窃听协作的最佳中继选择方案; 推导了非中继传输系统和最佳中继传输系统的中断概率和截获概率表达式; 分析了不同的中继选择方案对安全可靠性能的影响。仿真结果表明, 不同的中继选择方案将直接影响到目的节点可获得的信道容量及系统中断概率; 所提方案可以实现更低的系统中断概率; 系统中断概率和截获概率均随着中继数的增加而降低, 随着窃听节点数的增加, 截获概率有所提高, 但是当中继数大于窃听节点数时, 可以有效抑制截获概率, 保证主链路安全传输。

关键词: 物理层安全; 多窃听协作; 中断概率; 截获概率

中图分类号: TN911.1

文献标识码: A

Security versus reliability analysis for multi-eavesdropper cooperation wireless networks with best relay

LI Mei-ling¹, DONG Zeng-shou¹, WANG Gang-fei¹, LU Zhao-ming^{2,3}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

3. Beijing Key Laboratory of Network System Architecture and Convergence, Beijing 100876, China)

Abstract: Physical-layer security could be used to effectively combat eavesdroppers and the transmission reliability of the main link could be improved. A wireless relay network with multiple both decode and forward eavesdroppers and relays were considered, in the presence of the link from source to destination. A best relay selection scheme based on multi-eavesdropper's cooperation was proposed, and the outage probability and the intercept probability was deduced under both schemes without relay and with best relay. Then, the security and reliability influenced by different relay selection schemes were analyzed. The simulation results show that the achievable channel capacity at the destination node and the system outage probability are directly affected by different relay selection scheme. Lower system outage probability can be achieved by the proposed scheme, and the system outage probability and intercept probability are both decreased with the increase of the number of relays. The intercept probability increases with the increase of the number of eavesdroppers, which, however, can be reduced by increasing the number of relays to ensure the main link's reliable transmission.

Key words: physical-layer security, multi-eavesdropper cooperation, outage probability, intercept probability

收稿日期: 2017-03-15; 修回日期: 2017-08-07

通信作者: 董增寿, ansondon@sohu.com

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.41272374, No.61672373); 山西省青年科技研究基金资助项目(No.2014021021-2); 山西省晋城科技攻关基金资助项目(No.201501004-4); 太原科技大学博士科研基金资助项目(No.20152023)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.41272374, No.61672373), The Young Science and Technology Research Fund of Shanxi Province (No.2014021021-2), Jincheng Technology Research Projects of Shanxi Province (No.201501004-4), Research Project of Taiyuan University of Science and Technology (No.20152023)

1 引言

协作通信技术作为下一代无线通信网络的核心技术之一,可以提高频谱利用率,同时也使无线通信环境更加复杂,信息更易泄露,容易引发伪装攻击、恶意窃听以及非法转发等新的安全隐患^[1,2]。

物理层安全技术从信息论的角度出发,充分利用无线信道的各种传播特性,在物理层来解决通信过程的信息安全问题,成为近年来的研究热点。与传统通过在网络协议栈的上层采用各种密钥加密的方式相比,物理层安全利用噪声信道内在的不确定性、无线信道的时变性、互易性、随机性等特点,在香农信息论的安全模型之上通过物理层编码、调制以及安全传输的方式而非复杂的数学方法来确保无线网络的数据保密性^[3]。

文献[5~7]从物理层安全的角度提出了中继干扰方法,在中继转发原始信息的同时额外发送与原始信息独立的噪声信息以混淆窃听节点,使其无法破解原始信息,从而有效抵御窃听者带来的安全隐患。文献[8]提出了基于 QoS 的人工噪声辅助方法在保证主链路目的端的信号干扰噪声比(SINR, signal to interference and noise ratio)下最小化窃听端的接收 SINR 值。最近, Zou 等对基于中继的无线窃听网络安全可靠性折中问题进行了研究。典型的中继策略有基于噪声放大转发(AF, amplify and forward)方式、译码转发(DF, decode and forward)方式和压缩转发(CF, compress and forward)方式。AF 方式操作简单,但中继会将噪声放大化转发到目的节点;DF 方式可以避免噪声前传,适合于源节点—中继节点信道质量较好的环境;而 CF 方式中,中继节点对来自源节点的接收信号经过量化压缩后转发至目的节点,能在 AF 方式和 DF 方式性能之间折中,但也会产生量化噪声,适合于当源节点—中继节点链路信噪比小于或等于源节点—目的节点链路信噪比,或中继节点发送功率足够大时的场合。文献[9~14]分别从不同的角度基于不同的中继方式对物理层的安全性能进行了研究。文献[9]考虑网络中存在多个中继节点和一个窃听节点的场景下,分别讨论了当中继采用 AF 和 DF 方式时系统的截获概率来衡量系统的安全性。文献[10]在文献[9]的基础上,进一步引入中断概率来衡量系统的可靠性,并对中断概率和截获概率之间的关系进行了定量分析。文献[11]综述性地总结了如何利用分集技术来提高无线网络的物

理层安全性能,提出了安全性、可靠性以及吞吐量之间的联合优化问题。文献[12]对 AF、CF 和 DF 方案下的安全容量界进行了分析。然而,在中继协作网络中,如何选择合适的中继至关重要。在文献[9~11]中,最终的中继选择目标转化为中继节点到目的节点的信噪比最大化,从而未能充分考虑信源到中继节点链路的信道条件。文献[15]研究表明,当以系统误码率最小选取最佳中继时,源节点到中继节点信道条件对系统性能的影响较大。文献[16]通过设定信噪比解调门限,将中继节点分为 2 组,分别按照 DF 和 AF 方式转发信息,并选择端到端信噪比最大的阶段作为最佳中继。文献[13]则考虑中继节点与源节点之间的信道条件,选择其中最好的作为最佳中继转发信息,同时选择信道质量最差的中继充当 Jammer 干扰窃听者。以上研究均考虑网络中存在单个窃听者的情况,在实际中,存在多个窃听节点通过协作实现窃听目的的情况。文献[14]考虑单源单目的节点、多窃听者的场景,考虑分布式窃听系统,窃听节点采用选择式合并方式截获信源信息,对系统截获概率进行了分析,当采用中继进行协作传输时,不考虑源到目的节点的直传链路。

本文考虑基于多窃听协作的多中继网络模型,源节点到目的节点直传链路始终存在,窃听系统为集中式控制,考虑信源与中继节点以及中继节点和目的节点两跳链路信道条件,提出基于多窃听协作的最佳中继选择(MEC-BR, multi-eavesdropper cooperation with best relay selection)方案,窃听系统控制中心(FC, fusion center)采用最大比合并方式(MRC, maximum ratio combining)合并截获信息。由于本文重点在于研究多窃听者相互协作时对系统性能的影响,故作为一种基本的性能衡量,考虑中继节点和窃听节点均采用 DF 方式转发信息,推导了基于多窃听节点协作窃听的非中继传输系统(MEC-NR, multi-eavesdropper cooperation without relay)和 MEC-BR 系统的中断概率和截获概率表达式,分析了不同的中继选择方案及中继个数和窃听节点个数对安全可靠性能的影响。仿真结果表明,不同的中继选择方案将直接影响到目的节点可获得的信道容量及系统中断概率,源节点到中继节点链路条件会影响到系统性能,在实际选择最佳中继进行协作传输时应该充分考虑 S-R 链路条件;所提方案可以实现更低的系统中断概率;系统中断概率和截获概率均随着中继数的增加而降低,随着窃听

节点数的增加，截获概率有所提高，但是当中继数大于窃听节点数时，可以有效抑制截获概率，保证主链路安全传输。

2 系统模型

2.1 基于多窃听协作的最佳中继传输方案

本文考虑的网络环境如图 1 所示。包括一个源节点 S 、一个目的节点 D 、 N 个中继节点 $R = \{R_i | i = 1, 2, \dots, N\}$ 和 M 个窃听节点 $E = \{E_j | j = 1, 2, \dots, M\}$ ，且窃听系统由 FC 对所有窃听节点的信息以及自身截获的信息进行融合，最终截获信息。网络范围内的所有中继节点均可以转发源节点 S 信息，且 S - D 直传链路始终存在。主链路为所有从 S 到 D 的链路，窃听链路为所有从 S 到 FC 的链路。信源 S 以发射功率 P_s 、数据速率 R_d 发送信号。则主链路可以实现保密通信的条件是 D 可以与 S 可靠通信，即主链路的信息传输速率大于 R_d ，而所有窃听链路的传输速率小于 R_d ^[10]。

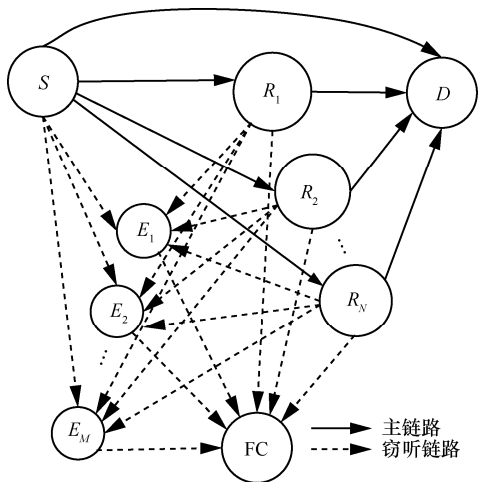


图 1 基于多中继多窃听者的无线网络模型

在选择中继辅助传输时， R_i 采用 DF 协议实现对源信号的辅助传输。信源 S 首先广播信号， N 个中继试图对其进行解码，成功解码的中继构成解码中继集 D_R ，可表示为 $\{\phi, D_1, D_2, \dots, D_N, \dots, D_{2N-1}\}$ ， ϕ 表示空集， D_n 为 N 个中继节点的非空子集^[10]。当解码集为空集时，表示所有的中继节点均解码失败，不进行任何操作；当解码集非空时，本文选择其中一个最佳的中继进行传输。

窃听器随机分布在网络周围，可以窃听信源和中继节点。本文考虑所有窃听节点通过窃听信源信号和中继节点转发的信号试图对信源信号进行解码。在选择窃听节点向 FC 转发截获信息时，同样，

M 个窃听节点中成功对源信号和中继节点信号解码的窃听节点构成解码窃听集 E ，可表示为 $\{\phi, E_1, E_2, \dots, E_M, \dots, E_{2M-1}\}$ ， E_m 为 M 个窃听节点的非空子集。当窃听集 E 为空集时，表示所有的窃听节点均解码失败，不再向 FC 转发信息；当窃听集 E 非空时，选择其中一个最佳的窃听节点向 FC 转发信息。

在文献[10]中，最佳中继是以最后一跳链路容量最大化选择的，即转化为使 R_i - D 链路信噪比 $\gamma_{R_i D}$ 最大化。然而，在实际通信的过程中，从信源到中继链路的性能也会影响到信号的传输，尤其是当 R_i 采用解码转发时，从信源 S 到目的节点 D ，最终可获得的信道容量不仅取决于从中继 R_i 到目的节点 D 最后一跳链路的信道容量。考虑整个传输过程带宽归一化， R_i 采用半双工 DF 方式，用 C_D^i 表示采用中继 R_i 转发源信号时，目的节点 D 最终的信道容量，可表示为

$$C_D^i = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \min \left(\gamma_{SR_i}, \gamma_{SD} + \gamma_{R_i D} \right) \right) \quad (1)$$

其中， $\gamma_{ab} = \frac{P_a |h_{ab}|^2}{N_0}$ 表示节点 a 到节点 b 链路上的信道信噪比， P_a 为节点 a 的发射功率， N_0 为信道加性噪声功率， h_{ab} 为 a - b 链路的信道衰落系数。

由式(1)可知，当源节点到目的节点的信道链路条件 γ_{SD} 一定时，目的节点最终可获得的信道容量不仅与源节点到中继节点的信道条件 γ_{SR_i} 有关，还与中继节点到目的节点的信道条件 $\gamma_{R_i D}$ 有关。

因此，在实际中，应该在考虑中继到目的点链路容量最大的同时，兼顾信源到中继链路的容量尽可能大些。本文考虑 S - D 链路始终存在，提出基于多窃听协作的最佳中继选择(MEC-BR)准则为

$$\begin{aligned} \text{Best Relay} &= \arg \max_{R_i} C_D^i \\ &= \arg \max_{R_i} \left(\min \left(\gamma_{SR_i}, \gamma_{SD} + \gamma_{R_i D} \right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 信号传输过程

为了与单窃听节点的无中继传输网络进行对比，这里也给出基于多窃听协作的无中继(MEC-NR)传输网络的分析。

2.2.1 基于多窃听协作的无中继传输网络(MEC-NR)

MEC-NR 传输网络模型如图 2 所示，包括一个源节点 S 、一个目的节点 D 和 M 个窃听节点 $E = \{E_j | j = 1, 2, \dots, M\}$ ，且窃听系统由窃听基站或融

合中心 FC 对所有窃听节点的信息进行融合，最终截获信息。当 S 以功率 P_s 和速率 R_d 发送信号 x 时， $E_j(j=1,2,\dots,M)$ 和 FC 都会窃听 S 并试图解码，FC 还会将自己截获的信源信息与收到的 $E_j(j=1,2,\dots,M)$ 的信息进行合并解码。最终，如果 FC 可以成功解码则表示信息截获成功。图 2 所示的系统模型传输过程包括以下 2 步。

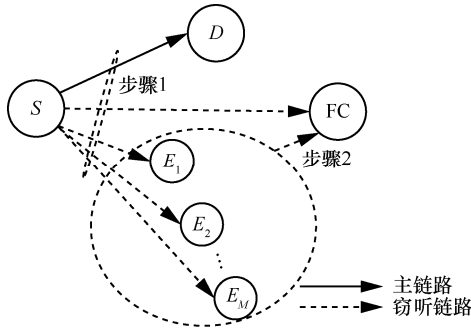


图 2 基于多窃听协作的无中继无线传输网络模型

步骤 1 信源 S 发送信息，目的节点 D 、所有窃听节点 E_j 和 FC 接收信息。

当信源 S 发送信号 x 时，目的端 D 接收到的信号可以表示为

$$r_D^{\text{direct}}(1) = \sqrt{P_s} h_{SD} x + n_D \quad (3)$$

其中， n_D 是均值为 0，方差为 N_0 的高斯白噪声。考虑 E_j 和 FC 已知 S 的所有参数信息^[10]。因此，在步骤 1， E_j 和 FC 接收到的信号可以表示为

$$r_{E_j}^{\text{direct}}(1) = \sqrt{P_s} h_{SE_j} x + n_{E_j} \quad (4)$$

$$r_F^{\text{direct}}(1) = \sqrt{P_s} h_{SF} x + n_F \quad (5)$$

其中， h_{SE_j} 和 h_{SF} 分别表示 S - E_j 和 S -FC 链路的信道衰落系数。 n_{E_j} 和 n_F 是均值为 0，方差为 N_0 的高斯白噪声。

步骤 2 $E_j(j=1,2,\dots,M)$ 对接收到的 S 信息采用 DF 方式将信息转发给 FC，FC 将对接收到的 S 信息和 E 的信息进行合并。这里，考虑只选择最佳的 E 转发截获信息。若用 $C_{E_j}^{\text{direct}}$ 表示 E_j 获得的信道容量，则在基于多窃听协作的无中继无线传输网络中，最佳窃听节点的选择准则可描述为

$$\begin{aligned} \text{Best Eavesdropper} &= \arg \max_{E_j} C_{E_j}^{\text{direct}} \\ &= \arg \max_{E_j} \text{lb}(1 + \gamma_{SE_j}) \end{aligned} \quad (6)$$

用 x_E^b 表示所选最佳窃听节点 E_b 向 FC 发送的信

息，发送功率为 P_E^b 。则步骤 2 中 FC 接收到的信息可表示为

$$r_F^{\text{direct}}(2) = \sqrt{P_E^b} h_{E_b F} \cdot x_E^b + n_F \quad (7)$$

步骤 3 FC 对在步骤 1 收到的信息 $r_F^{\text{direct}}(1)$ 与步骤 2 接收到的信息 $r_F^{\text{direct}}(2)$ 采用 MRC 方式进行合并，从而截获信息实现窃听目的。

2.2.2 基于多窃听协作的最佳中继传输网络 (MEC-BR)

在 MEC-BR 网络中，中继协作的传输过程包括 3 步。在步骤 1 中信源 S 发送信息，目的节点 D 、中继节点 R_i 和所有窃听节点 E_j 和 FC 接收信息。在步骤 2 中，正确解码的最佳中继 BR 转发信号，目的节点 D 、所有窃听节点 E_j 和 FC 接收信息。在步骤 3 中， E_j 对步骤 1 和步骤 2 收到的信号进行合并并解码，解码正确时将信号转发给 FC。考虑信源信号在 2 个传输阶段功率平均分配，以 $\frac{P_s}{2}$ 发送，则在步骤 1， R_i 、 D 、 E_j 和 FC 接收到的信号可分别表示为

$$\begin{cases} r_i^{\text{relay}}(1) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} h_{SR_i} x + n_i \\ r_D^{\text{relay}}(1) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} h_{SD} x + n_D \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} r_{E_j}^{\text{relay}}(1) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} h_{SE_j} x + n_{E_j} \\ r_F^{\text{relay}}(1) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} h_{SF} x + n_F \end{cases} \quad (9)$$

其中， n_i 是均值为 0，方差为 N_0 的高斯白噪声。

在步骤 2 中所有中继节点 R_i 会对接收到的信源信号利用 DF 进行解码，当中继解码集非空时，利用 2.1 节所述最佳中继选择准则，BR 将其解码结果 x_b 转发到目的端 D ，与此同时，窃听节点 E_j 和 FC 也会接收到该信号。

$$r_D^{\text{relay}}(2) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} h_{R_b D} x_b + n_D \quad (10)$$

$$\begin{cases} r_{E_j}^{\text{relay}}(2) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} h_{R_b E_j} x_b + n_{E_j} \\ r_F^{\text{relay}}(2) = \sqrt{\frac{P_s}{2}} h_{R_b F} x_b + n_F \end{cases} \quad (11)$$

其中， $h_{R_b D}$ 、 $h_{R_b E_j}$ 和 $h_{R_b F}$ 分别表示所选最佳中继 BR 与 D 、 E_j 和 FC 链路的信道衰落系数。

在步骤 3 中, 若 E_j 对其在步骤 1 接收到的 S 信号和步骤 2 接收到的 BR 信号进行合并解码集非空时, 则从中选择最佳的一个窃听节点将截获的信息进行解码, 并将解码结果 x_{E_b} 以功率 P_{E_b} 转发给 FC, 此时, 最佳窃听节点的选择准则为

$$\begin{aligned} \text{Best Eavesdropper} &= \arg \max_{E_j} C_{E_j}^{\text{relay}} \\ &= \arg \max_{E_j} \left\{ \min \left(\gamma_{SR_b}, \gamma_{SE_j} + \gamma_{R_b E_j} \right) \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

FC 接收到的信号可表示为

$$r_F^{\text{relay}}(3) = \sqrt{P_{E_b}} h_{E_b F} x_{E_b} + n_F \quad (13)$$

最终, FC 将对步骤 1 窃听到的信源 S 信号 $r_F^{\text{relay}}(1)$ 、步骤 2 窃听的中继信号 $r_F^{\text{relay}}(2)$ 和步骤 3 收到的来自 E_b 的信号 $r_F^{\text{relay}}(3)$ 进行合并截获信号。

3 安全可靠性能分析

3.1 MEC-NR 安全可靠性能分析

3.1.1 中断概率

当信源到目的端 S - D 链路的信道容量小于数据传输速率 R_d 时就会发生中断事件。考虑带宽归一化, 根据香农定理, 在 MEC-NR 网络中, S - D 链路的容量可以表示为

$$C_{SD} = \text{lb}(1 + \gamma_{SD}) \quad (14)$$

本文考虑任意一条链路的信道均服从瑞利分布, 其概率密度函数为

$$f(\gamma) = \frac{1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right), \gamma \geq 0 \quad (15)$$

其中, Γ 为信道平均信噪比。则在 MEC-NR 网络中, S - D 链路发生中断的概率可表示为

$$P_{\text{out}}^{\text{direct}} = P_r(C_{SD} < R_d) = 1 - e^{-\frac{2^{R_d} - 1}{\Gamma_{SD}}} \quad (16)$$

其中, Γ_{SD} 为 S - D 链路上的平均信噪比。

3.1.2 截获概率

当窃听链路的容量高于数据传输速率 R_d 时, 窃听系统将成功截获信息, 实现窃听目的。当 E_j 对接收到的信源信息解码均不成功时, 也即 E 的解码集为空集时 $E^{\text{direct}} = \phi$, 此时窃听链路只有从信源到融合中心 FC 这条链路, 链路容量记为 C_{SF} ; 当 E 解码成功, 也即 E 解码集非空时 $E^{\text{direct}} \neq \phi$, 根据式(6)最佳 E 的选择准则, 选择最佳的窃听节点 E_b 传输到 FC, 此时, 窃听链路的信道容量为

$$C_{F,E}^{\text{direct}} = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{F,E}^{\text{direct}}) \quad (17)$$

为了与 MEC-BR 网络中所选最佳窃听节点区分, 这里, 用 E_b^{direct} 表示 MEC-NR 网络中所选的最佳窃听节点, 则式(17)中, 有

$$\gamma_{F,E}^{\text{direct}} = \min(\gamma_{SE_b^{\text{direct}}}, \gamma_{SF} + \gamma_{E_b^{\text{direct}} F})$$

因此, 在 MEC-NR 网络中, 系统的截获概率为

$$\begin{aligned} P_{\text{int}}^{\text{direct}} &= P_r(E^{\text{direct}} = \phi) P_r(C_{SF} > R_d) + \\ &\sum_{m=1}^{2^M-1} P_r(E^{\text{direct}} = E_m) P_r(C_{F,E}^{\text{direct}} > R_d) \end{aligned} \quad (18)$$

其中,

$$\begin{aligned} P_r(E^{\text{direct}} = \phi) &= \prod_{j=1}^M P_r(C_{SE_j} < R_d) \\ &= \prod_{j=1}^M P_r\left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{SE_j}) < R_d\right) \end{aligned} \quad (19)$$

结合式(15)和式(19)可得

$$P_r(E^{\text{direct}} = \phi) = \prod_{j=1}^M \left(1 - e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SE_j}}}\right) \quad (20)$$

$$\begin{aligned} P_r(E^{\text{direct}} = E_m) &= \prod_{E_j \in E_m} P_r(C_{SE_j} > R_d) \prod_{E_k \in \bar{E}_m} P_r(C_{SE_k} < R_d) \\ &= \prod_{E_j \in E_m} e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SE_j}}} \prod_{E_k \in \bar{E}_m} \left(1 - e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SE_k}}}\right) \end{aligned} \quad (21)$$

$$P_r(C_{SF} > R_d) = P_r(\text{lb}(1 + \gamma_{SF}) > R_d) = e^{-\frac{2^{R_d} - 1}{\Gamma_{SF}}} \quad (22)$$

结合式(17)和式(19)可得

$$\begin{aligned} P_r(C_{F,E}^{\text{direct}} > R_d) &= P_r\left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{F,E}^{\text{direct}}) > R_d\right) \\ &= P_r(\gamma_{F,E}^{\text{direct}} > 2^{2R_d} - 1) \\ &= P_r\left(\min(\gamma_{SE_b^{\text{direct}}}, \gamma_{SF} + \gamma_{E_b^{\text{direct}} F}) > 2^{2R_d} - 1\right) \\ &= P_r(\gamma_{SE_b^{\text{direct}}} > 2^{2R_d} - 1) P_r(\gamma_{SF} + \gamma_{E_b^{\text{direct}} F} > 2^{2R_d} - 1) \\ &= e^{-\frac{2^{2R_d} - 1}{\Gamma_{SE_b^{\text{direct}}}}} \cdot \left(\frac{\Gamma_{E_b^{\text{direct}} F} e^{-\frac{2^{2R_d} - 1}{\Gamma_{E_b^{\text{direct}} F}}}}{\Gamma_{E_b^{\text{direct}} F} - \Gamma_{SF}} - \frac{\Gamma_{SF} e^{-\frac{2^{2R_d} - 1}{\Gamma_{SF}}}}{\Gamma_{E_b^{\text{direct}} F} - \Gamma_{SF}} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

将式(19)~式(23)代入式(18)可得 MEC-NR 网络系统截获概率为

$$P_{\text{int}}^{\text{direct}} = \prod_{j=1}^M \left(1 - e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SE_j}}} \right) e^{-\frac{2^{2R_d} - 1}{\Gamma_{SF}}} + \sum_{m=1}^{2^M - 1} \left(\prod_{E_j \in E_m} e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SE_j}}} \prod_{E_k \in \bar{E}_m} \left(1 - e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SE_k}}} \right) e^{-\frac{2^{2R_d} - 1}{\Gamma_{SE_b}^{\text{direct}}}} \right) \left(\frac{\Gamma_{E_b^{\text{direct}} F} e^{-\frac{2^{2R_d} - 1}{\Gamma_{EF}}} - \Gamma_{SF} e^{-\frac{2^{2R_d} - 1}{\Gamma_{SF}}}}{\Gamma_{E_b^{\text{direct}} F} - \Gamma_{SF}} - \frac{\Gamma_{SF} e^{-\frac{2^{2R_d} - 1}{\Gamma_{SF}}}}{\Gamma_{E_b^{\text{direct}} F} - \Gamma_{SF}} \right) \quad (24)$$

3.2 MEC-BR 安全可靠性能分析

3.2.1 中断概率

在 MEC-BR 网络中, S - D 链路发生中断有 2 种情况: 1) 当中继解码集为空集时, 即 $D_R = \phi$, S - D 直传链路发生中断; 2) 当解码集非空时即 $D_R \neq \phi$, 采用中继协作传输, 但目的端 D 处可获得的总容量 C_D^{relay} 仍然小于数据传输速率 R_d 。因此, 可以计算得到, 基于多窃听协作的最佳中继传输网络中, S - D 的中断概率可以表示为

$$P_{\text{out}}^{\text{relay}} = P_r(D_R = \phi) \cdot P_{\text{out}}^{\text{direct}} + \sum_{n=1}^{2^N - 1} P_r(D_R = D_n) P_r(C_D^{\text{relay}} < R_d) \quad (25)$$

其中, 中继解码集为空集意味着所有信源到中继链路的容量均小于数据传输速率, 其发生概率为

$$P_r(D_R = \phi) = \prod_{i=1}^N P_r(C_{SR_i} < R_d) = \prod_{i=1}^N \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{SR_i}) < R_d \right) = \prod_{i=1}^N \left(1 - e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SR_i}}} \right) \quad (26)$$

$$P_r(D_R = D_n) = \prod_{D_i \in D_n} P_r(C_{SR_i} > R_d) \prod_{D_i \in \bar{D}_n} P_r(C_{SR_i} < R_d) = \prod_{D_i \in D_n} e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SR_i}}} \prod_{D_i \in \bar{D}_n} \left(1 - e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SR_i}}} \right) \quad (27)$$

当有中继正确解码时, 根据 2.1 节最佳中继选择方法, 选出最佳中继 BR 采用 DF 方式向目的节点转发信息。根据 2.2.2 节所描述的信号传输过程, D 将合并步骤 1) 收到的信源信号 $r_D^{\text{relay}}(1)$ 和步骤 2 收到的中继信号 $r_D^{\text{relay}}(2)$, 采用 MRC 方式时, 目的节点 D 处可获得的信道容量可表示为

$$C_D^{\text{relay}} = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_D^{\text{relay}}) = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \min(\gamma_{SR_b}, \gamma_{SD} + \gamma_{R_b D})) \quad (28)$$

根据式(28), 并结合式(15)考虑所有链路信道条件服从瑞利分布, 可得

$$P_r(C_D^{\text{relay}} < R_d) = 1 - P_r\left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{SR_b}) > R_d\right) P_r\left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{SD} + \gamma_{R_b D}) > R_d\right) = 1 - e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SR_b}}} \left(\frac{\Gamma_{SD}}{\Gamma_{SD} - \Gamma_{R_b D}} e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{SD}}} + \frac{\Gamma_{R_b D}}{\Gamma_{R_b D} - \Gamma_{SD}} e^{-\frac{4^{R_d} - 1}{\Gamma_{R_b D}}} \right) \quad (29)$$

将式(16)、式(26)~式(29)代入式(25)可以得到 MEC-BR 网络系统中断概率 $P_{\text{out}}^{\text{relay}}$ 。

3.2.2 截获概率

在 MEC-BR 网络中, 窃听系统可以成功截获合法信息可以描述为: 窃听控制中心处可获得的信道容量大于数据传输速率 R_d 。当中继解码集为空集时, 即 $D_R = \phi$, 系统模型转化为无中继的多窃听模型。当中继解码集非空时, 即 $D_R \neq \phi$, 依据 2.2.2 节所述, E_j 会对其在步骤 1 接收到的 S 信号和步骤 2 接收到的 R_b 信号进行合并并解码, 当窃听集为空集时, 即 $E^{\text{relay}} = \phi$, 所有窃听节点对收到的 S 信号和 R 信号联合解码失败的情况, FC 将对步骤 1 和步骤 2 窃听到的源 S 信号 $r_F^{\text{relay}}(1)$ 和中继信号 $r_F^{\text{relay}}(2)$ 进行合并, 作出最终判决, 此时, 窃听系统的传输模型如图 3 所示, 用 $C_{F,E}^{\text{relay}}$ 表示此时窃听中心 FC 处获得的容量, 可计算为

$$C_{F,E}^{\text{relay}} = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{F,E}^{\text{relay}}) = \frac{1}{2} \text{lb}(1 + \min\{\gamma_{SR_b}, \gamma_{SF} + \gamma_{R_b F}\}) \quad (30)$$

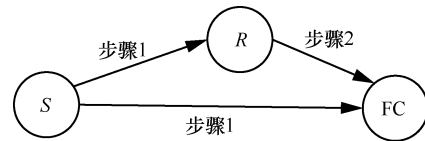


图 3 窃听节点解码集为空集时的窃听系统模型

当中继解码集非空 $D_R \neq \phi$, 且 E_j 对信源发出的信号和中继转发的信号进行合并解码集非空时, 即 $E^{\text{relay}} \neq \phi$, 此时, 窃听链路部分的传输过程如图 4 所示, 具体过程: ① S 发送信源信号, 选择的最佳中继 BR 和 M 个窃听者接收信号; ② M 个窃听者和 FC 接收 BR 转发的信号, 且 E_j 对第 ① 步接收到的信源信号 $r_{E_j}^{\text{relay}}(1)$ 和第 ② 步接收到的 BR 发送的信号 $r_{E_j}^{\text{relay}}(2)$ 进行合并解码; ③ 若解码集非空, 则选择最佳的 E_b 转发信号到

FC。最后，FC 将合并这 3 步接收到的信号进行合并解码。用 $C_{F,\bar{E}}^{\text{relay}}$ 表示此时窃听中心 FC 处获得的容量，可计算为

$$C_{F,\bar{E}}^{\text{relay}} = \frac{1}{3} \text{lb}(1 + \gamma_{F,\bar{E}}^{\text{relay}}) = \frac{1}{3} \text{lb} \left(1 + \min \left(\gamma_{SR}, \gamma_{SE}, \gamma_{SF} + \gamma_{RF}, \gamma_{SE} + \gamma_{RE}, \gamma_{SF} + \gamma_{RF} + \gamma_{EF} \right) \right) \quad (31)$$

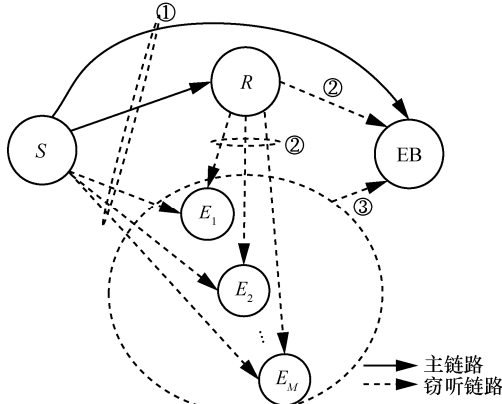


图 4 窃听节点解码集非空集时的窃听系统模型

假设每个节点均采用 DF 方式转发信号，则可以得到 FC 处的截获概率可以表示为

$$P_{\text{int}}^{\text{relay}} = P_r(D_R = \phi) P_{\text{int}}^{\text{direct}} + \sum_{n=1}^{2^N-1} P_r(D_R = D_n) \cdot \left[P_r(E^{\text{relay}} = \phi) P_r(C_{F,\bar{E}}^{\text{relay}} > R_d) + \sum_{m=1}^{2^M-1} P_r(E^{\text{relay}} = E_m) P_r(C_{F,\bar{E}}^{\text{relay}} > R_d) \right] \quad (32)$$

$$P_r(C_{F,\bar{E}}^{\text{relay}} > R_d) = P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \min \{ \gamma_{SR_b}, \gamma_{SF} + \gamma_{R_b,F} \}) > R_d \right) = P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{SR_b}) > R_d \right) P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{SF} + \gamma_{R_b,F}) > R_d \right) = e^{-\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{SR_b}}} \left(\frac{\Gamma_{R_b,F}}{\Gamma_{R_b,F} - \Gamma_{SF}} e^{\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{R_b,F}}} + \frac{\Gamma_{SF}}{\Gamma_{SF} - \Gamma_{R_b,F}} e^{-\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{SF}}} \right) \quad (33)$$

$$P_r(E^{\text{relay}} = \phi) = \prod_{j=1}^M P_r(C_{E_j} < R_d) = \prod_{j=1}^M P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{E_j}) < R_d \right) = \prod_{j=1}^M P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \min(\gamma_{SR}, \gamma_{SE_j} + \gamma_{RE_j})) < R_d \right) = \prod_{j=1}^M \left(1 - P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \min(\gamma_{SR}, \gamma_{SE_j} + \gamma_{RE_j})) > R_d \right) \right)$$

$$= \prod_{j=1}^M \left(1 - P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{SR}) > R_d \right) \cdot P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{SE_j} + \gamma_{RE_j}) > R_d \right) \right) = \prod_{j=1}^M \left(1 - e^{-\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{SR}}} \left(\frac{\Gamma_{RE_j}}{\Gamma_{RE_j} - \Gamma_{SE_j}} e^{\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{RE_j}}} + \frac{\Gamma_{SE_j}}{\Gamma_{SE_j} - \Gamma_{RE_j}} e^{\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{SE_j}}} \right) \right) \quad (34)$$

$$P_r(E^{\text{relay}} = E_m) = \prod_{E_j \in E_m} P_r(C_{E_j} > R_d) \prod_{E_k \in \bar{E}_m} P_r(C_{E_k} < R_d) = \prod_{E_j \in E_m} P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{E_j}) > R_d \right) \prod_{E_k \in \bar{E}_m} P_r \left(\frac{1}{2} \text{lb}(1 + \gamma_{E_k}) < R_d \right) = \prod_{E_j \in E_m} e^{-\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{SR}}} \left(\frac{\Gamma_{RE_j}}{\Gamma_{RE_j} - \Gamma_{SE_j}} e^{\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{RE_j}}} + \frac{\Gamma_{SE_j}}{\Gamma_{SE_j} - \Gamma_{RE_j}} e^{\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{SE_j}}} \right) \cdot \prod_{E_k \in \bar{E}_m} \left(1 - e^{-\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{SR}}} \left(\frac{\Gamma_{RE_k}}{\Gamma_{RE_k} - \Gamma_{SE_k}} e^{\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{RE_k}}} + \frac{\Gamma_{SE_k}}{\Gamma_{SE_k} - \Gamma_{RE_k}} e^{\frac{4^{R_d}-1}{\Gamma_{SE_k}}} \right) \right) \quad (35)$$

$$P_r(C_{F,\bar{E}}^{\text{relay}} > R_d) = P_r \left(\frac{1}{3} \text{lb}(1 + \gamma_{SR_b}) > R_d \right) \cdot P_r \left(\frac{1}{3} \text{lb}(1 + \gamma_{SE_b}) > R_d \right) \cdot P_r \left(\frac{1}{3} \text{lb}(1 + \gamma_{SF} + \gamma_{R_b,F}) > R_d \right) \cdot P_r \left(\frac{1}{3} \text{lb}(1 + \gamma_{SE_b} + \gamma_{R_b,E_b}) > R_d \right) \cdot P_r \left(\frac{1}{3} \text{lb}(1 + \gamma_{SF} + \gamma_{R_b,F} + \gamma_{E_b,F}) > R_d \right) = e^{-\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{SR_b}}} e^{-\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{SE_b}}} \left(\frac{\Gamma_{R_b,F}}{\Gamma_{R_b,F} - \Gamma_{SF}} e^{\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{R_b,F}}} + \frac{\Gamma_{SF}}{\Gamma_{SF} - \Gamma_{R_b,F}} e^{\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{SF}}} \right) \cdot \left(\frac{\Gamma_{R_b,E_b}}{\Gamma_{R_b,E_b} - \Gamma_{SE_b}} e^{\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{R_b,E_b}}} + \frac{\Gamma_{SE_b}}{\Gamma_{SE_b} - \Gamma_{R_b,E_b}} e^{\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{SE_b}}} \right) \cdot \left(\frac{\Gamma_{R_b,F} \Gamma_{SF} + \Gamma_{E_b,F} \Gamma_{SF} - \Gamma_{R_b,F} \Gamma_{E_b,F}}{(\Gamma_{R_b,F} - \Gamma_{SF})(\Gamma_{E_b,F} - \Gamma_{SF})} e^{-\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{SF}}} - \frac{\Gamma_{R_b,F}^2}{(\Gamma_{R_b,F} - \Gamma_{SF})(\Gamma_{E_b,F} - \Gamma_{R_b,F})} e^{-\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{R_b,F}}} + \frac{\Gamma_{EF}^2}{(\Gamma_{E_b,F} - \Gamma_{SF})(\Gamma_{E_b,F} - \Gamma_{R_b,F})} e^{-\frac{6^{R_d}-1}{\Gamma_{E_b,F}}} \right) \quad (36)$$

将式(33)~式(36)代入式(32)可得基于多窃听协作的最佳中继传输网络的系统截获概率 $P_{\text{int}}^{\text{relay}}$ 。

4 仿真结果

图 5 所示为在不同中继选择方案下 $S-R$ 链路、 $R-D$ 链路和目的节点 D 可获得的信道容量 C_{SR} 、 C_{RD} 和 C_D 对比, 3 种中继选择方案分别为使 C_{SR} 最大化、使 C_{RD} 最大化和使 C_D 最大化。旨在说明不同的中继选择方案下, 使 C_{SR} 、 C_{RD} 和 C_D 达到最大时的中继是不一样的。仿真包括后面的仿真参数, 如果无特别说明, 则中继数 $N=20$, 对于任意一个中继 R , Γ_{SR} 和 Γ_{RD} 的取值范围为 $0\sim 20$ dB, $S-D$ 链路信道衰落系数设为 1。可以看出, 当以最大化 C_{RD} 为准则选取最佳中继时, C_{SR} 的值不能达到最大; 而当以最大化 C_{SR} 为准则选取最佳中继时, C_{RD} 的值也不能达到最大。那么, 在实际中, 选择最佳中继需要结合实际目标来决定。

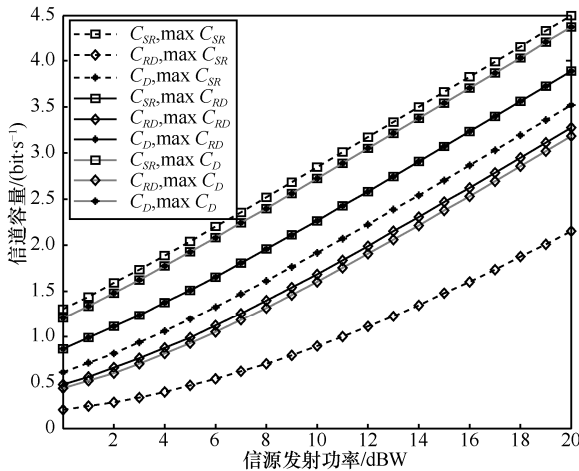


图 5 不同中继选择方案下 $S-R$ 链路、 $R-D$ 链路和目的节点 D 可获得的信道容量

图 6 为当网络中始终存在 $S-D$ 链路和无 $S-D$ 链路时, 不同 $S-D$ 链路及 $R-D$ 链路信道条件下, 系统中断概率随 $S-R$ 链路信道信噪比的变化情况。信源信号传输速率为 1 bit/s。可以看出, 随着 $S-R$ 链路信道信噪比增大, 中断概率单调递减, 因此, $S-R$ 链路对系统中断性能的影响较大, 这说明, 在选择中继时应该考虑 SR 链路因素。且无论 $S-D$ 链路信道条件如何, 网络中存在 $S-D$ 链路时, 网络中断概率要比无 $S-D$ 链路时实现更低的中断概率。

图 7 为不同中继选择方案下目的节点可获得的信道容量对比。从图中可以看出, 在相同的网络模型下, 所提方案可以获得更高的目的节点信道容量; 且 $S-D$ 链路始终存在时可以获得更高的目的节点信道容量。

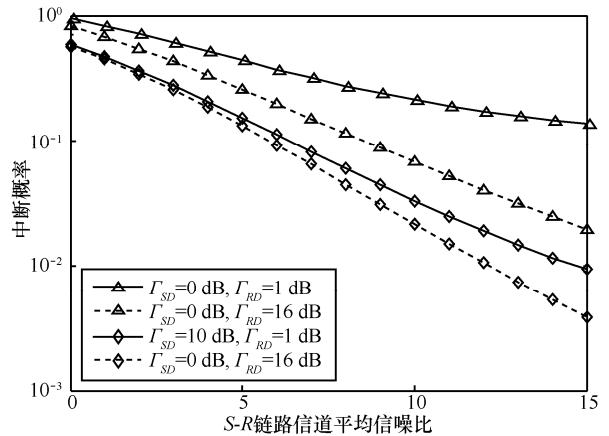


图 6 中断概率随 $S-R$ 链路信噪比的变化情况

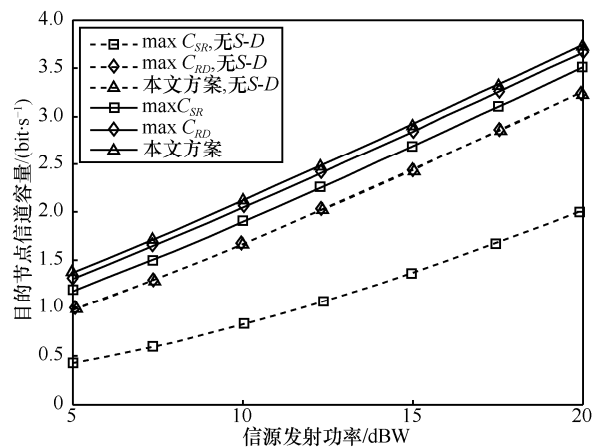


图 7 所提最佳中继方案与传统方案下目的节点可获得的信道容量比较

图 8 为当网络中始终存在 $S-D$ 链路和无 $S-D$ 链路时, 不同中继选择方案下系统中断概率对比。信源信号传输速率为 1 bit/s。从图中可以看出, 当网络中不考虑 $S-D$ 链路时, 传统使 C_{RD} 最大化的最佳中继选择方案下系统中断概率最小, 即文献[10]中的方案; 而当网络中考虑 $S-D$ 链路时, 所提最佳中继选择方案下

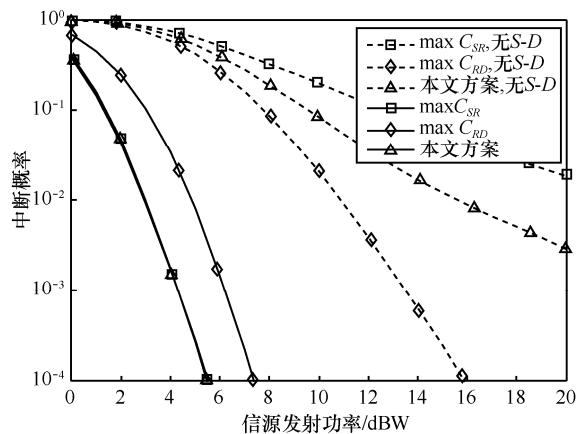


图 8 所提最佳中继方案与传统方案下系统中断概率比较

系统中断概率最小，且当 $\Gamma_{SR} \leq \Gamma_{RD} + \Gamma_{SD}$ 时，所提方案的系统中断概率与使 C_{SR} 最大化的最佳中继选择方案下的系统中断概率相同。

图 9 为不同中继选择方案下中断截获性能对比。图中，中继数 $N=2$ ，窃听节点数 $M=2$ ， $S-D$ 链路信道信噪比 $\Gamma_{SD} = 5$ dB，假设窃听链路的信道条件与主链路相比相差 3 dB。从图中可以看出，当网络中存在 $S-D$ 链路时，其安全可靠性能更好些，这主要是缘于目的节点处的分集增益而带来的性能提升；其次，在 $S-D$ 链路存在的情况下，当中继链路信道条件都比较差时，直传链路尚可保证接收一部分信息，从而降低中断概率，因此，在相同的中断条件下，所提方案的截获概率更低。

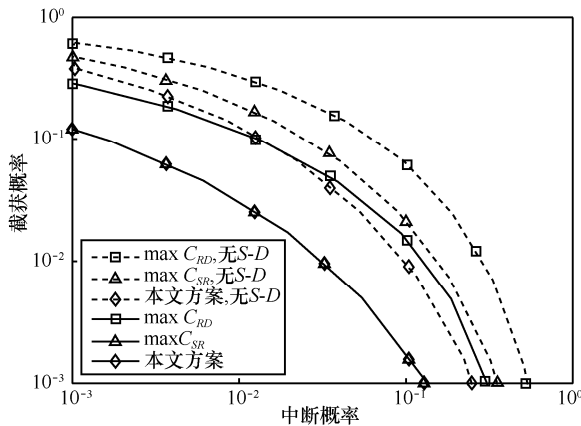


图 9 不同中继选择方案下中断截获性能对比

图 10 为不同中继选择方案下，系统中断概率随中继数量的变化情况。信源信号传输速率为 1 bit/s。从图中可以看出，随着中继数量的增加，系统中断概率降低；而且，当网络中存在 $S-D$ 直传链路时，采用所提方案选择最佳中继可以实现更低的系统中断概率。

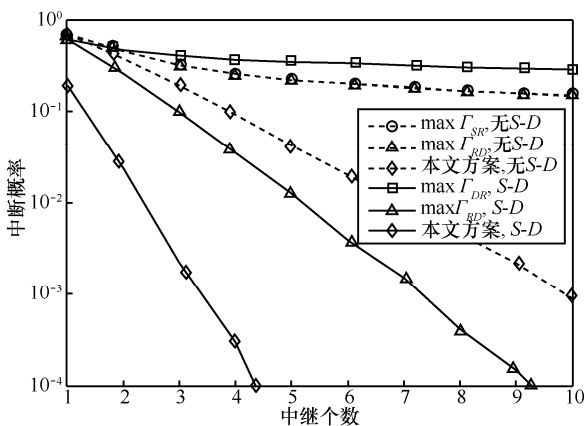


图 10 不同中继选择方案系统中断概率随中继个数变化情况

图 11 为采用所提方案时，不同的中继个数及窃听节点个数对中断截获性能的影响情况。 $S-D$ 链路信道信噪比 $\Gamma_{SD} = 5$ dB，假设窃听链路的信道条件与主链路相比相差 3 dB。可以看出，当窃听节点数 M 一定时，随着中继个数 N 的增加，在相同中断的情况下，系统截获概率降低；而当中继个数 N 一定时，随着 M 的增加，截获概率提高。但是，中继个数对截获概率的影响要大于窃听节点数对截获概率的影响，如图 12 所示。

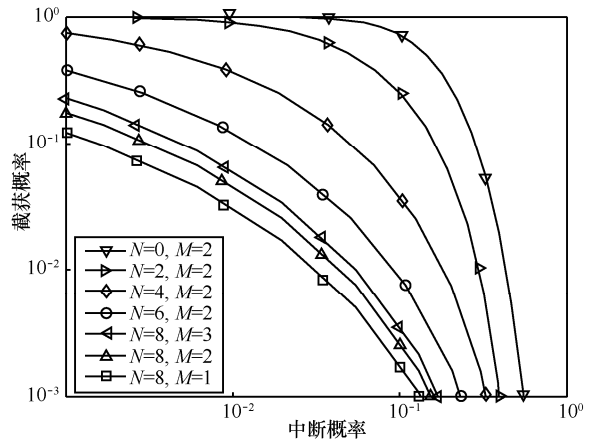


图 11 中断截获性能随中继数和窃听节点数的变化

图 12 为截获概率随窃听节点以及中继节点数的变化情况。随着窃听节点数的增加，截获概率增加，而通过增加中继个数，可以降低截获概率。

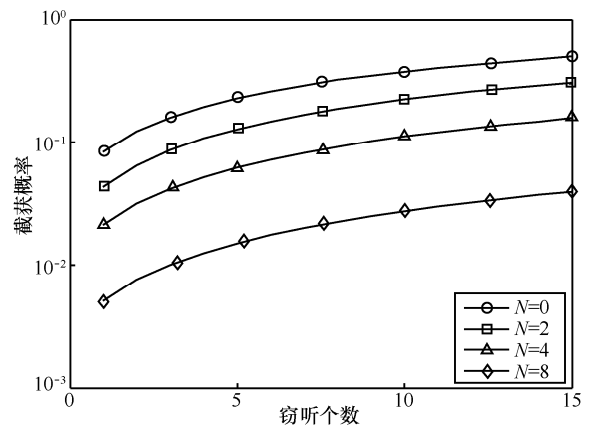


图 12 截获概率随窃听节点以及中继节点数的变化情况

5 结束语

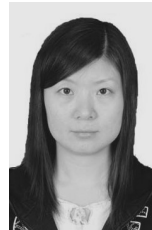
本文考虑直传链路始终存在的情况下，提出了基于多窃听协作的最佳中继传输方案，基于各节点采用 DF 协议，目的节点和窃听中心均采用 MRC 方式，推导了系统中断概率和截获概率，分析了不

同的中继选择方案对系统性能的影响。结果表明,所提方案可以实现更好的保密通信。需要说明的是,本文考虑 SR 链路信道条件较好的场景,故仅分析了各节点采用 DF 的数据转发方式。未来将综合比较各种信道条件下,分别采用 AF、DF 和 CF 数据转发方式时的系统性能,并将在此模型上进一步考虑窃听链路信道为非理想情况下的最佳传输方案。

参考文献:

- [1] LI J, FENG Z, FENG Z, et al. A survey of security issues in cognitive radio networks[J]. China Communications, 2015, 12(3):132-149.
- [2] ZOU Y, ZHU J, WANG X. A survey on wireless security: technical challenges, recent advances, and future trends[J]. Proceedings of the IEEE, 2016, 104(9):1727-1765.
- [3] MUKHERJEE A, FAKOORIAN S A, HUANG J, et al. Principles of physical layer security in multiuser wireless networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1550-1573.
- [4] 都晨辉. 协作网络中物理层安全关键技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2014.
DU C H. Physical layer security in collaboration communications networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2014.
- [5] LAI L, GAMAL H E. The relay-eavesdropper channel: cooperation for secrecy[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(9): 4005-4019.
- [6] ZHANG J, GURSOY M. Collaborative relay beamforming for secrecy[J]. Mathematics, 2010:1-5.
- [7] GOECKEL D, VASUDEVAN S, TOWSLEY D, et al. Artificial noise generation from cooperative relays for everlasting secrecy in two-hop wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(10): 2067-2076.
- [8] LIAO W, CHANG T, MA W, et al. QoS-based transmit beamforming in the presence of eavesdroppers: an optimized artificial-noise-aided approach[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(3): 1202-1216.
- [9] ZOU Y, WANG X, SHEN W. Optimal relay selection for physical-layer security in cooperative wireless networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(10):2099-2111.
- [10] ZOU Y, WANG X, SHEN W. Security versus reliability analysis of opportunistic relaying[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(6): 2653-2661.
- [11] ZOU Y, ZHU J, WANG X, et al. Improving physical-layer security in wireless communications using diversity techniques[J]. IEEE Network, 2014, 29(1):42-48.
- [12] DAI B, MA Z. Multiple-access relay wiretap channel[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2015, 10(9): 1835-184.
- [13] CHEN J C, ZHANG R Q, SONG L, et al. Joint relay and jammer selection for secure two-way relay networks[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2012, 7(1): 310-320.
- [14] DING X, SONG T, ZOU Y, et al. Improving secrecy for multi-relay multi-eavesdropper wireless systems through relay selection[J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2016, 27(7): 982-991.
- [15] 李美玲. 基于中继的协作频谱感知性能分析及优化[J]. 通信学报, 2013, 34(9): 33-40.
LI M L. Performance analysis and optimization of cooperative spectrum sensing with relay[J]. Journal on Communications, 2013, 34(9): 33-40.
- [16] LIU T X, SONG L Y. A threshold-based hybrid relay selection scheme[C]//The Wireless Communications and Networking Conference Workshops. 2010:1-5.

作者简介:



李美玲 (1982-), 女, 山西宁武人, 太原科技大学副教授, 主要研究方向为无线通信关键技术、认知无线网络、协作通信。



董增寿 (1979-), 男, 山西寿阳人, 博士, 太原科技大学教授, 主要研究方向为故障诊断、图像处理与模式识别、专网通信技术等。

王钢飞 (1981-), 男, 山西清徐人, 太原科技大学助教, 主要研究方向为信道估计、协作频谱感知。

路兆铭 (1986-), 男, 河南安阳人, 博士, 北京邮电大学讲师, 主要研究方向为软件定义无线网络、能源互联网等。