



基于协作干扰的全双工中继系统混合安全传输协议

周巍,高锐锋,吉晓东,包志华

(南通大学电子信息学院,江苏 南通 226001)

摘要:针对全双工中继系统的安全问题,提出一种基于协作干扰的物理层安全混合传输协议。系统根据自身信道状态信息,自适应地选择基于中继节点与信源节点轮流发送干扰(RSCJ)协议或基于中继节点与目的节点轮流发送干扰(RDCJ)协议中安全容量相对较高的协议进行信息的传输。在全双工节点自干扰因素被抑制的条件下,给出了系统的传输协议选择策略,并理论推导了采用RSCJ或RDCJ传输协议下系统的安全中断概率表达式。仿真结果表明,利用所提的混合安全传输协议可以显著提高全双工中继系统的安全中断性能,与传统未利用协作干扰的传输机制相比,具有明显的安全性能优势。

关键词:物理层安全;协作干扰;全双工;中继系统;安全中断概率

中图分类号: TN925

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017021

A hybrid cooperative jamming protocol for full-duplex relay wiretap system

ZHOU Wei, GAO Ruifeng, JI Xiaodong, BAO Zhihua

School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226001, China

Abstract: A hybrid cooperative jamming protocol was proposed to improve secrecy capacity for the full-duplex relay system with a passive eavesdropper, which chose the relay-and-source-based cooperative jamming (RSCJ) protocol or the relay-and-destination-based cooperative jamming (RDCJ) protocol according to the channel state information. Taking the self-interference at both the relay and the receiver into consideration, a protocol selection strategy was proposed and the expressions of secrecy outage probability of the system with RSCJ or RDCJ were derived. Simulation results show that the secrecy performance is significantly improved when the proposed hybrid cooperative jamming protocol is applied. Compared to the conventional transmission scheme, the proposed protocol has significant safety performance advantages.

Key words: physical layer security, cooperative jamming, full-duplex, relay system, secrecy outage probability

1 引言

近年来,物理层安全技术利用无线信道固有特性在无线通信安全性方面的研究受到广泛关注。协作干扰技术是物理层安全技术的一个重要分支,2005年Negi R和Goel S^[1]

最早提出利用发送设备产生位于合法接收信道“零空间”的高斯噪声,在不影响合法用户接收性能的情况下,干扰窃听用户的接收信噪比。在此基础之上,参考文献[2]提出了协作保密的概念,利用空闲用户向窃听用户发送干扰。参考文献[3,4]通过引入新的协作干扰节点,提高了系统的

安全性,但新的干扰节点既增加了硬件成本又增加了与合法用户之间的协作开销。

协作干扰技术凭借能提高物理层安全速率方面的优势,成为无线通信领域的热点安全技术。而现有研究工作大多基于传统的半双工中继系统。为了避免半双工通信造成频谱资源浪费,越来越多的学者开始致力于全双工中继系统的研究。参考文献[5,6]只研究了点对点全双工通信系统中全双工接收用户协作干扰的问题,但都未在中继窃听系统中展开研究。参考文献[7]利用几何方法解决全双工中继的干扰功率分配问题,由于只考虑窃听用户窃听中继节点的单一情况,其应用场景相对受限。参考文献[8]在全双工中继系统中,利用信源与中继向窃听用户轮流发送干扰信号的方式来保障通信安全,但只在高信噪比下展开了安全性能研究。

针对上述问题,本文基于全双工中继窃听信道模型,在不引入额外干扰节点及考虑窃听用户窃听两阶段信号传输的前提下,利用协作干扰技术提出了一种混合的安全传输协议。根据系统自身信道状态信息,给出了对应的协议选择策略,且在全双工节点自干扰被抑制下,理论推导了不同传输协议下系统的安全中断概率表达式。

2 系统模型及传输协议

考虑如图 1 所示的中继窃听信道模型, S 为信源节点, D 为目的节点, R 为位于信源节点与目的节点之间的中继节点, E 为被动窃听节点。假设中继节点 R 与目的节点 D 能自由切换全双工和半双工工作模式,且分别配有两根天线,用来接收和发送信号。信源节点 S 和窃听节点 E 均处于半双工工作模式,且只配有一根全向天线。信源节点 S 到目的节点 D 之间不存在直达链路。系统中所有节点之间的信道为平坦瑞利衰落信道,且各个信道之间是相互独立的。中继节点 R 采用译码转发的方式转发接收到的信息。

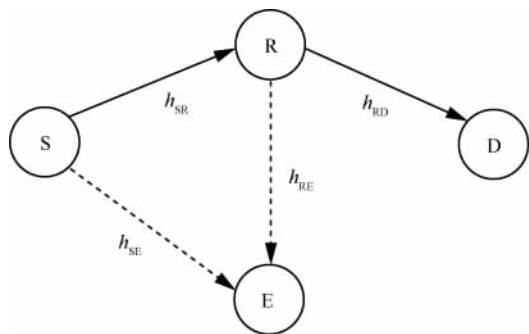


图 1 系统模型

这里,根据 S、R 与 D 节点轮流发送干扰信号方式的不同,提出一种混合的协作传输协议,即基于信源节点与中继节点的协作干扰 (relay-and-source-based cooperative jamming, RSCJ) 协议和基于中继节点和目的节点的协作干扰 (relay-and-destination-based cooperative jamming, RDCJ) 协议,其本质是系统根据自身信道状态信息自适应地选择安全容量相对较高的 RSCJ 或 RDCJ 协议下的传输机制。下面分别具体介绍 RSCJ 和 RDCJ 两种干扰协议。

2.1 RSCJ 传输协议

(1) 协议描述

考虑图 1 所示的系统模型,整个通信过程分两个时隙完成。中继节点 R 在第一时隙处于全双工工作模式,到了第二时隙, R 自动切换到半双工工作模式。目的节点 D 在 RSCJ 协议下始终处于半双工工作模式。

第一时隙,信源节点 S 向中继节点 R 发送信号 s 的时候会被窃听节点 E 窃听,而全双工中继节点 R 在接收信源信号 s 的同时会向 E 发送干扰信号 z ,同时也受自身自干扰的影响。其中,自干扰的直射分量可通过天线隔离等技术消除,而残余的散射分量可被视为信道衰落。

此时,中继节点 R 接收到的信号为:

$$y_R = \sqrt{P_{S_1}} h_{SR} s + \sqrt{P_{R_1}} h_{RR} z + n_R \quad (1)$$

窃听节点 E 接收到的信号为:

$$y_{E_1} = \sqrt{P_{S_1}} h_{SE} s + \sqrt{P_{R_1}} h_{RE} z + n_{E_1} \quad (2)$$

其中, h_i 为链路 i ($i \in SR, SE, RR$) 的瑞利信道增益; P_{S_1} 和 P_{R_1} 分别为节点 S 和 R 第一时隙的发射功率; n_R 和 n_{E_1} 为节点 R 和 E 处的加性高斯白噪声,且 $n_R \sim N(0, \sigma_R^2)$, $n_{E_1} \sim N(0, \sigma_{E_1}^2)$ 。

第二时隙,中继节点 R 处于半双工的工作模式,中继节点 R 将译码并重新编码后的信号 s' 转发给目的节点 D,同时被窃听节点 E 窃听,此时,信源节点 S 向窃听节点 E 发送干扰 z' ,由于第二时隙中继节点 R 处于半双工工作模式,所以干扰 z' 只对 E 产生影响。

此时,目的节点 D 接收到的信号为:

$$y_D = \sqrt{P_{R_2}} h_{RD} s' + n_D \quad (3)$$

窃听节点 E 接收到的信号为:

$$y_{E_2} = \sqrt{P_{R_2}} h_{RE} s' + \sqrt{P_{S_2}} h_{SE} z' + n_{E_2} \quad (4)$$

其中, h_{RD} 和 h_{RE} 为中继节点 R 分别到 D 与 E 的瑞利信道增益; P_{S_2} 和 P_{R_2} 分别为节点 S 和 R 第二时隙的发射功率; n_D 和 n_{E_2} 为节点 D 和 E 处的加性高斯白噪声,且



$n_D \sim N(0, \sigma_D^2)$, $n_{E_2} \sim N(0, \sigma_{E_2}^2)$ 。

(2) 接收信噪比

假设系统每节点每时隙的发射功率均为 P , 即 $P_{S_1} = P_{S_2} = P_{R_1} = P_{R_2} = P$, 每节点处的高斯白噪声具有相同的方差 σ^2 。

第一时隙, 根据式(1)与式(2), 中继节点 R 与窃听节点 E 处的接收信噪比可分别表示为:

$$\gamma_R = \frac{P_{S_1} |h_{SR}|^2}{P_{R_1} |h_{RR}|^2 + \sigma_R^2} = \frac{\gamma_{SR}}{\gamma_{RR} + 1} \quad (5)$$

$$\gamma_{E_1} = \frac{P_{S_1} |h_{SE}|^2}{P_{R_1} |h_{RE}|^2 + \sigma_{E_1}^2} = \frac{\gamma_{SE}}{\gamma_{RE} + 1} \quad (6)$$

第二时隙, 根据式(3)与式(4), 目的节点 D 与窃听节点 E 处的接收信噪比可分别表示为:

$$\gamma_D = \frac{P_{R_2} |h_{RD}|^2}{\sigma_D^2} = \gamma_{RD} \quad (7)$$

$$\gamma_{E_2} = \frac{P_{R_2} |h_{RE}|^2}{P_{S_2} |h_{SE}|^2 + \sigma_{E_2}^2} = \frac{\gamma_{RE}}{\gamma_{SE} + 1} \quad (8)$$

其中, $\gamma_{ij} = P_i |h_{ij}|^2 / \sigma_j^2$ 表示节点 i 到节点 j 的信噪比, 其中 $i \in \{S, R\}$, $j \in \{R, D, E\}$ 。

2.2 RDCJ 传输协议

(1) 协议描述

考虑图 1 所示的系统模型, 中继节点 R 同样能在全双工和半双工工作模式中进行自由切换, 而目的节点 D 在 RDCJ 协议下始终为全双工工作模式。整个通信过程仍然分两个时隙完成。

RDCJ 的第一时隙与 RSCJ 第一时隙描述的传输过程相同, 信源节点 S 向中继节点 R 发送信号 s 时会被窃听节点 E 窃听, 而全双工中继节点 R 在接收信源信号 s 的同时会向 E 发送干扰信号, 同时受自身自干扰的影响。

同样地, 中继节点 R 和窃听节点 E 接收到的信号分别与式(1)、式(2)相同。

第二时隙, 中继节点 R 将接收到的信号译码并重新编码后转发给目的节点 D, 会被窃听节点 E 窃听, 而全双工目的节点 D 在接收信号 s' 的同时向窃听节点 E 发送干扰 z' , 同时也受自干扰的影响。由于第二时隙中继节点 R 处于半双工的工作模式, 所以干扰 z' 只对窃听节点 E 产生影响。

此时, 目的节点 D 接收到的信号为:

$$y_D = \sqrt{P_{R_2}} h_{RD} s' + \sqrt{P_D} h_{DD} z' + n_D \quad (9)$$

窃听节点 E 接收到的信号为:

$$y_{E_2} = \sqrt{P_{R_2}} h_{RE} s' + \sqrt{P_D} h_{DE} z' + n_{E_2} \quad (10)$$

其中, h_{DD} 为目的节点 D 的自干扰信道增益, P_D 为节点 D 的发射功率。

(2) 接收信噪比

RDCJ 协议下, $P_{S_1} = P_{R_1} = P_{R_2} = P_D = P$, 第一时隙, 中继节点 R 与窃听节点 E 处的接收信噪比分别与式(5)、式(6)相同。

第二时隙, 目的节点 D 与窃听节点 E 处的接收信噪比可分别表示为:

$$\gamma_D = \frac{P_{R_2} |h_{RD}|^2}{P_D |h_{DD}|^2 + \sigma_D^2} = \frac{\gamma_{RD}}{\gamma_{DD} + 1} \quad (11)$$

$$\gamma_{E_2} = \frac{P_{R_2} |h_{RE}|^2}{P_D |h_{DE}|^2 + \sigma_{E_2}^2} = \frac{\gamma_{RE}}{\gamma_{DE} + 1} \quad (12)$$

其中, $\gamma_{RD} = P_{R_2} |h_{RD}|^2 / \sigma_D^2$, $\gamma_{DD} = P_D |h_{DD}|^2 / \sigma_D^2$, $\gamma_{RE} = P_{R_2} |h_{RE}|^2 / \sigma_{E_2}^2$, $\gamma_{DE} = P_D |h_{DE}|^2 / \sigma_{E_2}^2$ 。

3 协议选择策略与性能分析

本节讨论了系统基于安全容量的协议选择策略, 并以安全中断概率为性能指标分析了基于 RSCJ 和 RDCJ 的混合传输协议的系统安全性能。这里, 安全容量定义为 $C_S = [C_T - C_E]^+$, 其中, C_T 为合法信道容量, C_E 为窃听信道容量, $[x]^+ = \max(0, x)$ 。而系统瞬时安全容量 C_S 不能够达到系统所要求的安全传输速率 R_S 时的概率 (即安全中断概率), 记为 $P_{out} = \Pr\{C_S < R_S\}$, 由于 $R_S \geq 0$, 则 $\Pr\{[x]^+ < R_S\} = \Pr\{x < R_S\}$ 。

3.1 传输协议选择策略

在整个中继通信过程中, 由于每时隙信道状态信息会发生变化, 因而系统的安全容量也在不断变化, 而所提的混合传输协议就是根据窃听节点不同的信噪比较 RSCJ 与 RDCJ 系统的安全容量来判断需要选择哪种干扰协议来进行信息的传输。这里, 设全双工节点的自干扰信噪比抑制在 0 dB, 即 $\gamma_{RR} = \gamma_{DD} = 0$ dB, 主信道信噪比 $\gamma_{SR} = \gamma_{RD}$ 。

由式(5)~(8)可得, RSCJ 第一时隙和第二时隙的安全容量分别表示为:

$$\begin{aligned} C_{S_1}^{RSCJ} &= \frac{1}{2} [1b(1 + \gamma_R) - 1b(1 + \gamma_{E_1})]^+ \\ &= \frac{1}{2} \left[1b \left(\frac{1 + \frac{\gamma_{SR}}{\gamma_{RR} + 1}}{1 + \frac{\gamma_{SE}}{\gamma_{RE} + 1}} \right) \right]^+ \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned}
 C_{S_2}^{\text{RSCJ}} &= \frac{1}{2} [\text{lb}(1+\gamma_D) - \text{lb}(1+\gamma_{E_2})]^+ \\
 &= \frac{1}{2} \left[\text{lb} \left(\frac{1+\gamma_{RD}}{1+\frac{\gamma_{RE}}{\gamma_{SE}+1}} \right) \right]^+ \quad (14)
 \end{aligned}$$

其中, 1/2 源于通信传输分两个时隙完成。

此时, RSCJ 系统的安全容量可表达为:

$$\begin{aligned}
 C_S^{\text{RSCJ}} &= \min(C_{S_1}^{\text{RSCJ}}, C_{S_2}^{\text{RSCJ}}) \\
 &= \left\{ \min \left[\frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1+\gamma_R}{1+\gamma_{E_1}} \right), \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1+\gamma_D}{1+\gamma_{E_2}} \right) \right] \right\}^+ \\
 &= \left\{ \frac{1}{2} \text{lb} \left[\min \left(\frac{1+\gamma_R}{1+\gamma_{E_1}}, \frac{1+\gamma_D}{1+\gamma_{E_2}} \right) \right] \right\}^+ \quad (15)
 \end{aligned}$$

同理, 根据式(5)和式(6), 可得 RDCJ 第一时隙的安全容量与式(13)相同, 即 $C_{S_1}^{\text{RDCJ}} = C_{S_1}^{\text{RSCJ}}$ 。

由式(11)和式(12)可得 RDCJ 第二时隙的安全容量为:

$$\begin{aligned}
 C_{S_2}^{\text{RDCJ}} &= \frac{1}{2} [\text{lb}(1+\gamma_D) - \text{lb}(1+\gamma_{E_2})]^+ \\
 &= \frac{1}{2} \left[\text{lb} \left(\frac{1+\frac{\gamma_{RD}}{\gamma_{DD}+1}}{1+\frac{\gamma_{RE}}{\gamma_{DE}+1}} \right) \right]^+ \quad (16)
 \end{aligned}$$

同样地, 这里的 1/2 源于通信传输需要两个时隙, 则 RDCJ 系统的安全容量为:

$$\begin{aligned}
 C_S^{\text{RDCJ}} &= \min(C_{S_1}^{\text{RDCJ}}, C_{S_2}^{\text{RDCJ}}) \\
 &= \left\{ \min \left[\frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1+\gamma_R}{1+\gamma_{E_1}} \right), \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1+\gamma_D}{1+\gamma_{E_2}} \right) \right] \right\}^+ \\
 &= \left\{ \frac{1}{2} \text{lb} \left[\min \left(\frac{1+\gamma_R}{1+\gamma_{E_1}}, \frac{1+\gamma_D}{1+\gamma_{E_2}} \right) \right] \right\}^+ \quad (17)
 \end{aligned}$$

在高信噪比情况下, 令 $K_1 = \frac{\gamma_{SE}}{\gamma_{RE}}$, $K_2 = \frac{\gamma_{RE}}{\gamma_{DE}}$, 根据式(15), RSCJ 系统的安全容量可重新表达为:

$$\begin{aligned}
 C_S^{\text{RSCJ}} &= \left\{ \frac{1}{2} \text{lb} \left[\min \left(\frac{1+\gamma_R}{1+K_1}, K_1 \cdot \frac{1+\gamma_D}{1+K_1} \right) \right] \right\}^+ \\
 &= \begin{cases} [C_{S_1}]^+, & K_1 \geq 1 \\ [C_{S_2}]^+, & K_1 < 1 \end{cases} \quad (18)
 \end{aligned}$$

其中, $C_{S_1} = \frac{1}{2} \text{lb}[(1+\gamma_R)/(1+K_1)]$,

$C_{S_2} = \frac{1}{2} \text{lb}[K_1 \cdot (1+\gamma_D)/(1+K_1)]$ 。

根据式(17), RDCJ 的安全容量同样可简化为:

$$\begin{aligned}
 C_S^{\text{RDCJ}} &= \left\{ \frac{1}{2} \text{lb} \left[\min \left(\frac{1+\gamma_R}{1+K_1}, \frac{1+\gamma_D}{1+K_2} \right) \right] \right\}^+ \\
 &= \begin{cases} [C_{S_1}]^+, & K_1 \geq K_2 \\ [C_{S_2}]^+, & K_1 < K_2 \end{cases} \quad (19)
 \end{aligned}$$

其中, $C_{S_2}' = \frac{1}{2} \text{lb}[(1+\gamma_D)/(1+K_2)]$ 。

假设主信道信噪比高于窃听信道信噪比, 下面分情况讨论 RSCJ 与 RDCJ 各自的安全性能优势并给出对应的协议选择策略。定义如下 3 种情况:

C1: $K_1 \geq 1, K_1 \geq K_2$ 或 $K_1 < 1, K_1 < K_2$ 且 $K_1 K_2 = 1$;

C2: $1 \leq K_1 < K_2$ 或 $K_1 < 1, K_1 < K_2$ 且 $K_1 K_2 > 1$;

C3: $K_2 \leq K_1 < 1$ 或 $K_1 < 1, K_1 < K_2$ 且 $K_1 K_2 < 1$ 。

当 C1 发生时, 若 $K_1 \geq 1$ 且 $K_1 \geq K_2$, 可得 RSCJ 与 RDCJ 的安全容量均为 C_{S_1} , 即 $C_S^{\text{RSCJ}} = C_S^{\text{RDCJ}} = C_{S_1}$; 同理, 若 $K_1 < 1, K_1 < K_2$ 且 $K_1 K_2 = 1$ 则 $C_S^{\text{RSCJ}} = C_{S_2} = \frac{1}{2} \text{lb}[(1+\gamma_D)/(1+\frac{1}{K_1})]$, $C_S^{\text{RDCJ}} = C_{S_2}' = \frac{1}{2} \text{lb}[(1+\gamma_D)/(1+K_2)]$, 由于 $K_1 K_2 = 1$, 得 $C_S^{\text{RSCJ}} = C_S^{\text{RDCJ}}$ 。

当 C2 发生时, 若 $1 \leq K_1 < K_2$ 则 $C_S^{\text{RSCJ}} = C_{S_1}$, $C_S^{\text{RDCJ}} = C_{S_2}'$, 可得 $C_S^{\text{RSCJ}} > C_S^{\text{RDCJ}}$; 若 $K_1 < 1, K_1 < K_2$ 且 $K_1 K_2 > 1$, $C_S^{\text{RSCJ}} = C_{S_2}$, $C_S^{\text{RDCJ}} = C_{S_2}'$, 可得 $C_S^{\text{RSCJ}} > C_S^{\text{RDCJ}}$ 。

当 C3 发生时, 若 $K_2 \leq K_1 < 1, C_S^{\text{RSCJ}} = C_{S_2}, C_S^{\text{RDCJ}} = C_{S_1}$, 可得 $C_S^{\text{RSCJ}} < C_S^{\text{RDCJ}}$; 若 $K_1 < 1, K_1 < K_2$ 且 $K_1 K_2 < 1$, $C_S^{\text{RSCJ}} = C_{S_2}, C_S^{\text{RDCJ}} = C_{S_2}'$, 可得 $C_S^{\text{RSCJ}} < C_S^{\text{RDCJ}}$ 。

在本文中, 利用协作干扰技术最直接的目的就是降低窃听用户的接收信噪比, 因此, 在主信道信噪比相同的情况下, 传输协议的选择主要取决于窃听节点的接收信噪比。随着信道状态信息的不同, γ_{SE} 、 γ_{RE} 和 γ_{DE} 的节点信噪比也不同, 给出的协议选择策略理由如下描述: 当三者关系满足 C1 时, RSCJ 与 RDCJ 两种协议的系统安全性能相同, 也就是说, 在此情况下, 系统可以任意选择其中一种协议进行有效的信息传输; 而当 C2 发生时, 由上述分析可知, RSCJ 系统的安全容量始终高于 RDCJ 的安全容量, 所以此时应选择 RSCJ 协议; 反之, 当 C3 发生时, 相比 RSCJ, 选择 RDCJ 传输协议能使系统获得更高的安全性能。需要说明的是, 本文所提出的协议选择策略不是一种迭代的算法, 它只需完成一些简单的比较运算, 因此协议切换的复杂度很低。



基于上述的协议选择策略,下面分别讨论在 RSCJ 与 RDCJ 不同传输协议下系统的安全性能。

3.2 RSCJ 性能分析

假设系统选择了 RSCJ 协议,此时,安全容量表达式如式 (15) 所示。为了简便,令 $X = \frac{1+\gamma_R}{1+\gamma_{E1}}$, $Y_1 = \frac{1+\gamma_D}{1+\gamma_{E2}}$, $Z_1 = \min(X, Y_1)$, 则 RSCJ 系统的安全中断概率表示为:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^{\text{RSCJ}} &= \Pr \{ C_S^{\text{RSCJ}} < R_s \} \\ &= \Pr \{ Z_1 < 2^{2R_s} \} \\ &= \Pr \{ \min(X, Y_1) < \xi \} \\ &= 1 - [1 - F_X(\xi)][1 - F_{Y_1}(\xi)] \quad (20) \end{aligned}$$

其中, $\xi = 2^{2R_s}$, $F_X(\xi)$ 和 $F_{Y_1}(\xi)$ 分别为 X 和 Y_1 在 ξ 下的累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)。

由式(20)可知,要得到 RSCJ 系统安全中断概率,只需求得 $F_X(\xi)$ 和 $F_{Y_1}(\xi)$, 下面给出具体计算过程。

对于平坦瑞利衰落信道, $|h_{ij}|^2$ 服从均值为 λ_{ij} 的指数分布, 在这里, 设 $P/\sigma^2=1$, 则 γ_{ij} 服从均值为 λ_{ij} 的指数分布。

由于 $\gamma_R = \frac{\gamma_{SR}}{\gamma_{RR}+1}$, $\gamma_{E1} = \frac{\gamma_{SE}}{\gamma_{RE}+1}$, 可得 γ_R 的 CDF 和 γ_{E1} 的概率密度函数(probability density function, PDF)分别表示为:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_R}(x) &= 1 - \frac{\lambda_{SR}}{\lambda_{SR} + \lambda_{RR}x} e^{-\frac{x}{\lambda_{SR}}} \quad (x > 0) \quad (21) \\ f_{\gamma_{E1}}(y) &= \frac{1}{\lambda_{SE} + \lambda_{RE}y} e^{-\frac{y}{\lambda_{SE}}} + \frac{\lambda_{SE}\lambda_{RE}}{(\lambda_{SE} + \lambda_{RE}y)^2} e^{-\frac{y}{\lambda_{SE}}} \quad (y > 0) \quad (22) \end{aligned}$$

则 X 的 CDF 可表达为:

$$\begin{aligned} F_X(u) &= \Pr \left\{ \frac{1+\gamma_R}{1+\gamma_{E1}} < u \right\} \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{u(1+y)-1} f_{\gamma_R}(x) f_{\gamma_{E1}}(y) dx dy \\ &= \int_0^{\infty} F_{\gamma_R} [u(1+y)-1] \cdot f_{\gamma_{E1}}(y) dy \\ &= \int_0^{\infty} \left[1 - \frac{\lambda_{SR}}{\lambda_{SR} + \lambda_{RR} [u(1+y)-1]} e^{-\frac{u(1+y)-1}{\lambda_{SR}}} \right] \cdot \\ &\quad \left[\frac{1}{\lambda_{SE} + \lambda_{RE}y} e^{-\frac{y}{\lambda_{SE}}} + \frac{\lambda_{SE}\lambda_{RE}}{(\lambda_{SE} + \lambda_{RE}y)^2} e^{-\frac{y}{\lambda_{SE}}} \right] dy \\ &= \frac{M_1 + M_2 + M_3}{\lambda_{RE} [(u\lambda_{RR} + \lambda_{SR} - \lambda_{RR})\lambda_{RE} - u\lambda_{RR}\lambda_{SE}]} \quad (23) \end{aligned}$$

其中:

$$M_1 = \lambda_{SR}\lambda_{RE} (n_1 - u\lambda_{RR}\lambda_{RE}\lambda_{SE}) \cdot e^{\frac{(u-1)\lambda_{SR} + \lambda_{SR} + u\lambda_{SE}}{u\lambda_{RR}\lambda_{SE}}} \cdot E_i(1, m_1) \quad (24)$$

$$\begin{aligned} M_2 &= \lambda_{RE} \cdot e^{\frac{\lambda_{SR} + \lambda_{RR} + u\lambda_{SE} - u\lambda_{RR}}{\lambda_{SR}\lambda_{RE}}} \cdot E_i \left(1, \frac{\lambda_{SR} + u\lambda_{SE}}{\lambda_{SR}\lambda_{RE}} \right) \cdot \\ &\quad [(\lambda_{SR} + u\lambda_{SE})n_1 - \lambda_{SR}(n_1 - u\lambda_{RR}\lambda_{RE}\lambda_{SE})] \quad (25) \end{aligned}$$

$$M_3 = n_1 \cdot \left(\lambda_{RE}n_1 - \lambda_{SR}\lambda_{RE}^2 e^{\frac{1-u}{\lambda_{SR}}} \right) \quad (26)$$

这里, $E_i(1, a) = \int_1^{\infty} x^{-1} \cdot e^{-ax} dx$,

$$m_1 = \frac{(\lambda_{SR} + u\lambda_{RR} - \lambda_{RR})(\lambda_{SR} + u\lambda_{SE})}{u\lambda_{SR}\lambda_{RR}\lambda_{SE}},$$

$$n_1 = (u\lambda_{RR} + \lambda_{SR} - \lambda_{RR})\lambda_{RE} - u\lambda_{RR}\lambda_{SE}.$$

同理可得, Y_1 的 CDF 可表达为:

$$\begin{aligned} F_{Y_1}(v) &= \Pr \left\{ \frac{1+\gamma_D}{1+\gamma_{E2}} < v \right\} \\ &= \int_0^{\infty} \int_0^{v(1+y)-1} f_{\gamma_D}(x) f_{\gamma_{E2}}(y) dx dy \\ &= \int_0^{\infty} F_{\gamma_D} [v(1+y)-1] \cdot f_{\gamma_{E2}}(y) dy \\ &= \int_0^{\infty} \left[1 - e^{-\frac{v(1+y)-1}{\lambda_{RD}}} \right] \cdot \\ &\quad \left[\frac{1}{\lambda_{RE} + \lambda_{SE}y} e^{-\frac{y}{\lambda_{RE}}} + \frac{\lambda_{SE}\lambda_{RE}}{(\lambda_{RE} + \lambda_{SE}y)^2} e^{-\frac{y}{\lambda_{RE}}} \right] dy \\ &= 1 - e^{-\frac{1-v}{\lambda_{RD}}} + \frac{v\lambda_{RE}}{\lambda_{RD}\lambda_{SE}} \cdot e^{\frac{v\lambda_{RE} - v\lambda_{SE} + \lambda_{RD} + \lambda_{SE}}{\lambda_{RD}\lambda_{SE}}} \cdot \\ &\quad E_i \left(1, \frac{v\lambda_{RE} + \lambda_{RD}}{\lambda_{RD}\lambda_{SE}} \right) \quad (27) \end{aligned}$$

将式(23)和式(27)代入式(20), 就可得 RSCJ 系统的安全中断概率。

3.3 RDCJ 性能分析

假设系统选择了 RDCJ 传输协议, 根据式(17), 同样地, $X = \frac{1+\gamma_R}{1+\gamma_{E1}}$, 令 $Y_2 = \frac{1+\gamma_D}{1+\gamma_{E2}}$, $Z_2 = \min(X, Y_2)$, 则 RDCJ 系统的安全中断概率可表达为:

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}} &= \Pr\{C_S < R_S\} \\
&= \Pr\{Z_2 < 2^{2R_S}\} \\
&= \Pr\{\min(X, Y_2) < \xi\} \\
&= 1 - [1 - F_X(\xi)][1 - F_{Y_2}(\xi)] \quad (28)
\end{aligned}$$

其中, $\xi = 2^{2R_S}$ 。

由于 RDCJ 第一时隙传输过程与 RSCJ 第一时隙传输过程相同, 所以 $F_X(\xi)$ 可由式 (23) 给出, 而 Y_2 的 CDF 由如下计算得到。

由于 $\gamma_D = \frac{\gamma_{RD}}{\gamma_{DD} + 1}$, $\gamma_{E_2} = \frac{\gamma_{RE}}{\gamma_{DE} + 1}$, 可得 γ_D 的 CDF 和 γ_{E_2} 的 PDF 分别表示为:

$$F_{\gamma_D}(x) = 1 - \frac{\lambda_{RD}}{\lambda_{RD} + \lambda_{DD}x} e^{-\frac{x}{\lambda_{RD}}} \quad (x > 0) \quad (29)$$

$$f_{\gamma_{E_2}}(y) = \frac{1}{\lambda_{RE} + \lambda_{DE}y} e^{-\frac{y}{\lambda_{RE}}} + \frac{\lambda_{RE}\lambda_{DE}}{(\lambda_{RE} + \lambda_{DE}y)^2} e^{-\frac{y}{\lambda_{RE}}} \quad (y > 0) \quad (30)$$

则 Y_2 的 CDF 可表达为:

$$\begin{aligned}
F_{Y_2}(v) &= \Pr\{Y_2 < v\} \\
&= \Pr\left\{\frac{1 + \gamma_D}{1 + \gamma_{E_2}} < v\right\} \\
&= \int_0^{\infty} \int_0^{v(1+y)-1} f_{\gamma_D}(x) f_{\gamma_{E_2}}(y) dx dy \\
&= \int_0^{\infty} F_{\gamma_D}[v(1+y)-1] \cdot f_{\gamma_{E_2}}(y) dy \\
&= \int_0^{\infty} \left[1 - \frac{\lambda_{RD}}{\lambda_{RD} + \lambda_{DD}[v(1+y)-1]} e^{-\frac{v(1+y)-1}{\lambda_{RD}}}\right] \cdot \\
&\quad \left[\frac{1}{\lambda_{RE} + \lambda_{DE}y} e^{-\frac{y}{\lambda_{RE}}} + \frac{\lambda_{RE}\lambda_{DE}}{(\lambda_{RE} + \lambda_{DE}y)^2} e^{-\frac{y}{\lambda_{RE}}}\right] dy \\
&= \frac{N_1 + N_2 + N_3}{\lambda_{DE}[(v\lambda_{DD} + \lambda_{RD} - \lambda_{DD})\lambda_{DE} - v\lambda_{DD}\lambda_{RE}]} \quad (31)
\end{aligned}$$

其中:

$$N_1 = \lambda_{RD}\lambda_{DE}(n_2 - v\lambda_{DD}\lambda_{DE}\lambda_{RE}) \cdot e^{\frac{(v-1)\lambda_{DD} + \lambda_{RD} + v\lambda_{RE}}{v\lambda_{DD}\lambda_{RE}}} \cdot E_i(1, m_2) \quad (32)$$

$$N_2 = \lambda_{DE} \cdot e^{\frac{\lambda_{RD} + \lambda_{DE} + v\lambda_{RE} - v\lambda_{DE}}{\lambda_{RD}\lambda_{DE}}} \cdot E_i\left(1, \frac{\lambda_{RD} + v\lambda_{RE}}{\lambda_{RD}\lambda_{DE}}\right) \cdot [(\lambda_{RD} + v\lambda_{RE})n_2 - \lambda_{RD}(n_2 - v\lambda_{DD}\lambda_{DE}\lambda_{RE})] \quad (33)$$

$$N_3 = n_2 \cdot \left(\lambda_{DE}n_2 - \lambda_{RD}\lambda_{DE}^2 e^{\frac{1-v}{\lambda_{RD}}} \right) \quad (34)$$

这里, $E_i(1, a) = \int_1^{\infty} x^{-1} \cdot e^{-ax} dx$,

$$m_2 = \frac{(\lambda_{RD} + v\lambda_{DD} - \lambda_{DD})(\lambda_{RD} + v\lambda_{RE})}{v\lambda_{RD}\lambda_{DD}\lambda_{RE}},$$

$$n_2 = (v\lambda_{DD} + \lambda_{RD} - \lambda_{DD})\lambda_{DE} - v\lambda_{DD}\lambda_{RE}.$$

将式 (23) 和式 (31) 代入式 (8), 最终, 可得到 RDCJ 系统的安全中断概率。

4 仿真与分析

本节以安全中断概率为指标, 通过计算机仿真来衡量本文所提的基于 RSCJ 与 RDCJ 的混合传输协议的系统安全性能。仿真中, 假设噪声功率 σ^2 和节点发射功率 P 均设为 1 W^[8], 目标安全速率 $R_s = 0.5$ bit/(s·Hz), “NCJ”表示不采用协作干扰技术的方案。

图 2 给出了不同传输协议在不同的窃听信道信噪比 γ_{SE} 下的安全中断概率曲线。如图 2 所示, 当 $\gamma_{RE} = 20$ dB、 $\gamma_{DE} = 10$ dB 时, 随着窃听信道信噪比 γ_{SE} 不断增大, 基于本文所提的混合协议, 不管系统选择 RSCJ 或 RDCJ 中的哪一种协议, 其安全性能始终优于 NCJ 方案。当 $\gamma_{SE} < 10$ dB, 即 γ_{SE}, γ_{RE} 和 γ_{DE} 三者关系满足 C3 时, 选择 RDCJ 协议系统的安全中断概率低于选择 RSCJ 协议的安全中断概率; 当 10 dB $< \gamma_{SE} < 40$ dB, 即满足 C2 时, 选择 RSCJ 协议相比选择 RDCJ 能使系统获得更高的安全性能; 而当 $\gamma_{SE} \geq 40$ dB 或 $\gamma_{SE} = 10$ dB, 三者关系满足 C1 时, 由于两者的安全中断概率基本相同, 系统可以任意选择 RSCJ 与 RDCJ 其中一种协议。由

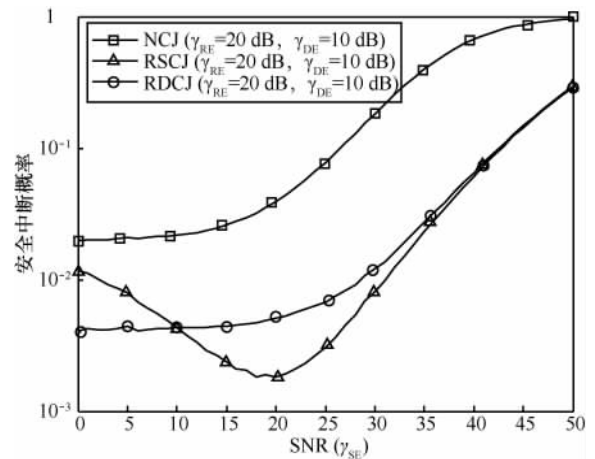


图 2 $\gamma_{RR} = \gamma_{DD} = 0$ dB, $\gamma_{SR} = \gamma_{RD} = 40$ dB 时窃听信道信噪比 γ_{SE} 对系统安全性能的影响



此,验证了本文所提的协议选择策略的有效性。

图3和图4分别给出了不同传输协议的系统在C2和C3下的安全中断概率性能曲线。由图3可知,当 $\gamma_{SE}=15$ dB时,窃听节点信噪比 γ_{SE} 、 γ_{RE} 和 γ_{DE} 三者关系满足C2,采用RSCJ协议的系统安全性能最优;反之,如图4所示,当 $\gamma_{SE}=5$ dB时,窃听节点信噪比三者关系满足C3,RDCJ表现出更为明显的安全性能优势,且不管选择何种协议,利用协作干扰的系统始终比未利用协作干扰的方案的性能更优。此外,不同方案下的安全中断概率的仿真值也与理论值相匹配,证明了理论分析的正确性。

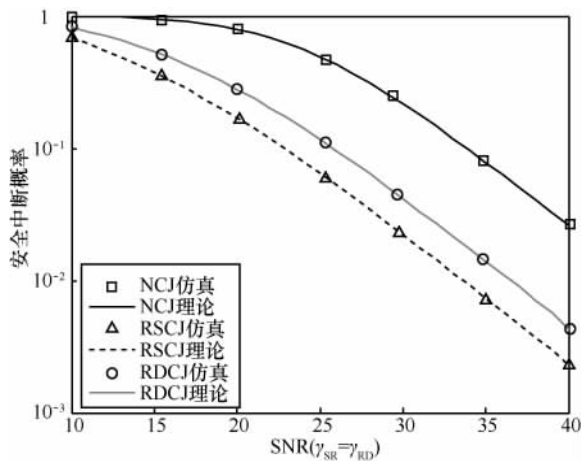


图3 $\gamma_{RR}=\gamma_{DD}=0$ dB, $\gamma_{RE}=20$ dB, $\gamma_{DE}=10$ dB时C2下不同传输协议系统的安全性能比较

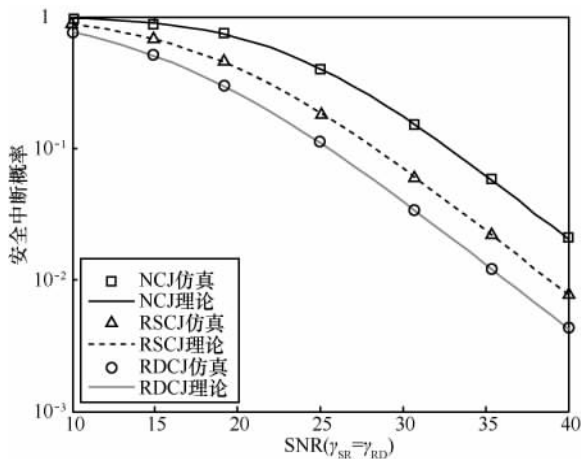


图4 $\gamma_{RR}=\gamma_{DD}=0$ dB, $\gamma_{RE}=20$ dB, $\gamma_{DE}=10$ dB时C3下不同传输协议系统的安全性能比较

图5给出了在不同自干扰信噪比条件下的各传输协议下系统安全性能比较。如图5所示,由于NCJ系统中节点都处于半双工工作模式,所以节点不受自干扰因素的影响

响,其安全中断概率保持不变。而RSCJ与RDCJ协议下的系统均受节点自干扰因素的影响,其劣势也随着 γ_{RR} 和 γ_{DD} 的增加变得尤为明显。需要注意的是,当 $\gamma_{RR}=\gamma_{DD}>8$ dB时,无论窃听用户与合法用户节点之间的信道质量如何,RSCJ系统的安全性能始终优于RDCJ的安全性能,这是因为对于RSCJ系统来说,只有一个自干扰因素 γ_{RR} 的影响,而RDCJ系统却存在 γ_{RR} 和 γ_{DD} 两个自干扰因素。这也意味着,只有当全双工节点自干扰信噪比被抑制在较小范围时,本文所提出的混合传输协议才能发挥较为明显的安全性能优势。

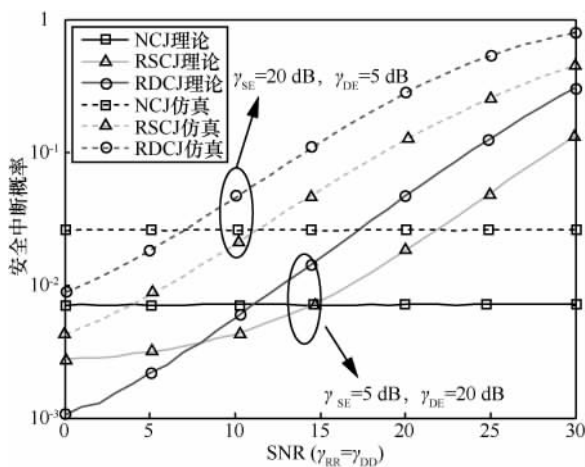


图5 $\gamma_{RR}=\gamma_{DD}=0$ dB, $\gamma_{RE}=15$ dB时中继节点自干扰因素对系统安全性能的影响

5 结束语

本文研究了全双工中继窃听系统中的物理层安全传输问题,根据节点轮流发送干扰方式的不同,提出了一种基于RSCJ和RDCJ的混合传输协议,在不影响合法用户接收性能的情况下,降低窃听用户接收信噪比,以提高系统的安全容量。此外,在考虑全双工节点自干扰因素条件下,给出了协议选择策略并理论推导了采用RSCJ或RDCJ协议下系统的安全中断概率表达式。研究发现,当全双工节点自干扰被抑制时,根据窃听节点信噪比的不同,利用本文所提混合协议自适应地选择合适的传输协议相比单独使用RSCJ或RDCJ或未利用协作干扰的方案,具有较为明显的安全性能优势。

参考文献:

- [1] NEGI R, GOEL S. Secret communication using artificial noise[C]//

- IEEE Vehicular Technology Conference, September 25–28, 2005, Dallas, TX, USA. New Jersey: IEEE Press, 2005: 1906-1910.
- [2] TEKIN E, YENER A. Achievable rates for the general Gaussian multiple access wire-tap channel with collective secrecy [C]// Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (ACCCC), September 27–29, 2006, Monticello, IL, USA. New Jersey: IEEE Press, 2006: 809-816.
- [3] CHEN J, ZHANG R, 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.
- [4] ZHANG R, SONG L, HAN Z, et al. Physical layer security for two-way untrusted relaying with friendly jammers [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61 (8): 3693-3704.
- [5] ZHENG G, KRIKIDIS I, LI J, et al. Improving physical layer secrecy using full-duplex jamming receivers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(20): 4962-4974.
- [6] LI W, GHOGHO M, CHEN B, et al. Secure communication via sending artificial noise by the receiver: outage secrecy capacity/region analysis[J]. IEEE Communications Letters, 2012, 16(10): 1628-1631.
- [7] LEE J H. Full-duplex relay for enhancing physical layer security in multi-hop relaying systems[J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(4): 525-528.
- [8] CHEN G, GONG Y, XIAO P, et al. Physical layer network security in the full-duplex relay system [J]. IEEE Transactions on Information Forensics Security, 2015, 10(3): 574-583.
- [9] GOPALA P K, LAI L, EL-GAMAL H. On the secrecy capacity of fading channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2008, 54(10): 4687-4698.

[作者简介]



周巍(1991–),女,南通大学电子信息学院硕士生,主要研究方向为无线中继系统中的物理层安全技术。



高锐锋(1987–),男,南通大学电子信息学院博士生,主要研究方向为无线通信物理层安全。



吉晓东(1979–),男,博士,南通大学电子信息学院副教授,主要研究方向为中继协作通信及无线网络安全。



包志华(1955–),男,南通大学电子信息学院教授,主要研究方向为现代通信技术、通信信号处理、认知技术以及中继协作等。