

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.11.016

引用格式:谭琛,肖琨,侯飞宇. 快慢速自适应融合的安全中继选择[J]. 电讯技术,2015,55(11):1277-1282. [TAN Chen,XIAO Kun,HOU Feiyu. Secure Relay Selection Based on Fast-Slow Fused Adaptive Transmissions[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(11):1277-1282.]

快慢速自适应融合的安全中继选择*

谭琛,肖琨**,侯飞宇

(广西多源信息挖掘与安全重点实验室,广西 桂林 541004)

摘要:针对无线通信中的物理层信息安全问题,在无线安全协作网络中提出了一种基于快慢速链路自适应融合的安全中继选择方法。该方法根据移动速度选择链路自适应类型,根据干扰节点对安全容量的“正”或“负”效应使用或不使用干扰节点,基于安全容量最大化准则进行中继选择。在此基础上,对所提安全中继选择方法进行了性能分析,推导了中断概率表达式。中断概率的仿真曲线和理论曲线很吻合,验证了理论分析的正确性。同时,仿真结果显示,相对于采用单一快速链路自适应,基于所提中继选择方法的安全协作通信系统具有更低的误码率和更大的安全容量,在“正效应”条件下干扰节点有助于提升系统安全容量。

关键词:协作通信系统;物理层信息安全;链路自适应;中继选择;干扰节点

中图分类号:TN911.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2015)11-1277-06

Secure Relay Selection Based on
Fast-Slow Fused Adaptive Transmissions

TAN Chen,XIAO Kun,HOU Feiyu

(Guangxi Key Lab of Multi-source Information Mining&Security, Guilin 541004, China)

Abstract:For the physical layer information security in wireless communication, this paper proposes a secure relay selection method based on fast-slow fused link adaptive transmission. In this method, fast or slow adaptive transmission is decided according to the mobile velocity. Whether using jamming node or not depends on the “positive” or “negative” effect that the jamming node will play on the secure capacity of the system. On this basis, the relay forwarding the data to the destination is selected by maximizing the secure capacity. Performance analysis for the proposed method including the outage probability is given and validated by simulation. More simulation results show that the proposed method has lower bit error rate and larger secure capacity compared with existing methods, and the jamming node is helpful to improve system secure capacity in “positive” effect condition.

Key words: cooperative communication system; physical layer information security; link adaptation; relay selection; jamming node

* 收稿日期:2015-04-28;修回日期:2015-07-10 Received date:2015-04-28;Revised date:2015-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61362015);广西自然科学基金资助项目(2014GXNSFAA118397);广西多源信息挖掘与安全重点实验室开放基金项目(MIMS13-01);广西高校科学技术研究项目(2013YB031);广西研究生教育创新计划项目(YCSZ2015098)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61362015); The Natural Science Foundation of Guangxi (2014GXNSFAA118397); Open Fund Project of Guangxi Key Lab of Multi-source Information Mining & Security (MIMS13-01); The Science and Technology Research Projects of Guangxi Universities (2013YB031); Innovation Project of Guangxi Graduate Education (YCSZ2015098)

** 通讯作者:xiaokun@gxnu.edu.cn Corresponding author:xiaokun@gxnu.edu.cn

1 引言

无线通信网络中,由于无线媒介的广播特性,系统覆盖范围内的所有用户可以窃听源信息。传统无线网络中的信息安全主要依赖高层协议栈,通常使用密码保密方案^[1]。在无线通信网络中,传统信息安全受到日益严重的挑战,为了进一步改进无线传输的安全性,人们开始关注物理层信息安全问题^[2-8],例如基于功率控制和信道调度的联合设计^[3]、基于信道的波束成形技术^[4-5]等。

文献[8]研究了噪声对安全容量的潜在贡献,提出了一种噪声协助的协作传输方法;文献[9]考虑了窃听节点和干扰节点,提出最优和次优的中继选择方法。诸如此类的方法还有一些,但是这些方法都没有考虑链路自适应因素。最新研究表明^[10],跟踪大尺度信道衰落或小尺度衰落上的加权平均的慢速链路自适应不仅具有较低的系统复杂度和反馈频率,而且在较高速移动场景中或当信道估计误差较大时慢速链路自适应的性能优于快速链路自适应,单一链路自适应类型显然不是最佳选择。然而,目前快、慢速链路自适应的融合问题尚未见报道。

基于此,本文从快慢速链路自适应融合的角度开展安全中继选择研究,获得了新的快慢速链路自适应融合的安全中继选择方法,取得了良好的效果。

2 系统模型

如图1所示,基于快慢速链路自适应融合的安全协作系统模型包含1个源节点S、K个译码转发中继节点 R_i 、1个窃听节点E以及1个目的节点D。满足一定条件时(参见第3.2节),从中继节点中选择1个节点作为干扰节点,所有中继节点组成中继节点集合 $S_{\text{relay}} = \{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ 。

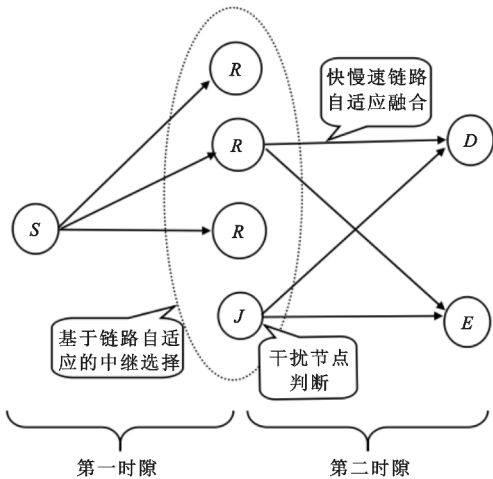


图1 系统模型
Fig. 1 System model

假设源节点到目的节点和窃听节点的链路处于深度衰落,通信只能通过中继节点实现。信息传输分为两个时隙:第一个时隙中,源节点向各节点广播信息;第二个时隙中,通过基于快慢速链路自适应融合的安全中继选择方法选出的中继节点向目的节点发送信息,当使用干扰节点时,干扰节点向窃听节点和目的节点发送干扰信号。

当被选的中继节点向目的节点发送数据时,有可能被窃听节点窃听。为了进一步提升安全容量,通过干扰节点判断,当干扰节点能够对系统安全容量产生“正”效应时,从中继节点集合中选取两个中继节点,一个中继节点用来正常传输数据,另一个中继节点作为干扰节点,发射干扰信号。

3 安全协作中继选择算法

3.1 快、慢速链路自适应融合

本节中无线链路根据信道的变化频度选择使用快速或慢速链路自适应。信道的变化频度与多普勒频移成正比,而移动速度越大多普勒频移现象越明显,因此可通过目的节点的移动速度判断信道的变化频度。假设 v_D 为目的节点的移动速度, v_1 为第一门限速度, v_2 为第二门限速度, $v_1 < v_2$,当 $v_D \leq v_1$ 时,相应链路的信道状况为低频度变化,采用快速链路自适应;当 $v_1 < v_D \leq v_2$ 时,相应链路的信道状况为一般频度变化,选取安全容量最大时对应的链路自适应类型;当 $v_D > v_2$ 时,相应链路的信道状况为高频度变化,采用慢速链路自适应。

3.2 干扰节点选择

设 $\gamma_{J,D}^W$ 表示干扰节点到目的节点链路 $J \rightarrow D$ 的信噪比, $\gamma_{J,E}^W$ 表示干扰节点到窃听节点链路 $J \rightarrow E$ 的信噪比。干扰节点J发出的信号为干扰信号,研究表明^[9],当 $\gamma_{J,E}^W < \gamma_{J,D}^W$ 时,干扰节点J的使用会降低系统安全容量,此时干扰节点对系统安全容量呈现“负”效应;当 $\gamma_{J,E}^W \geq \gamma_{J,D}^W$ 时,使用干扰节点J时的安全容量大于不使用干扰节点J时的保密容量,干扰节点J对系统容量呈现“正”效应。在快速链路自适应方式下, $\gamma_{J,D}^W = \gamma_{J,D}^F$ 、 $\gamma_{J,E}^W = \gamma_{J,E}^F$, $\gamma_{J,D}^F$ 、 $\gamma_{J,E}^F$ 分别为 $J \rightarrow D$ 、 $J \rightarrow E$ 链路的即时信噪比;在慢速链路自适应方式下, $\gamma_{J,D}^W = \gamma_{J,D}^S$ 、 $\gamma_{J,E}^W = \gamma_{J,E}^S$, $\gamma_{J,D}^S$ 、 $\gamma_{J,E}^S$ 分别为 $J \rightarrow D$ 、 $J \rightarrow E$ 链路的平均信噪比。

当 $\gamma_{J,E}^W$ 、 $\gamma_{J,D}^W$ 值的相对大小在短时间内频繁改变时,做出是否使用干扰节点的判断变得很困难,此现象类似移动切换中常见的“乒乓效应”。为了克服

这种缺陷,我们采取以下方法:只有当 $\gamma_{J,E}^W \geq \gamma_{J,D}^W$ 状态持续一段时间 t 且 $t > t_0$ 时,才使用该节点为干扰节点, t_0 为时间门限。

3.3 基于快慢速链路自适应融合的中继选择

当使用干扰节点时,选取中继和干扰节点对

$$(i^*, j^*) = \arg \max_{\substack{i \neq j \\ i \in S_{\text{relay}} \\ j \in S_{\text{relay}}}} \left\{ \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1 + \frac{\gamma_{i,D}^W}{1 + \gamma_{i,D}^W}}{1 + \frac{\gamma_{j,E}^W}{1 + \gamma_{j,E}^W}} \right) \right\} \quad (1)$$

进行中继和干扰传输;当不使用干扰节点时,选取中继节点

$$i_N^* = \arg \max_{i \in S_{\text{relay}}} \left\{ \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{1 + \gamma_{i,D}^W}{1 + \gamma_{i,E}^W} \right) \right\} \quad (2)$$

进行中继传输。 i^*, j^* 分别是使用干扰节点时的中继节点和干扰节点, i_N^* 是不使用干扰节点时的中继节点, $\gamma_{i,D}^W$ 表示中继节点 i 到目的节点 D 链路的信噪比, $\gamma_{i,E}^W$ 表示中继节点 i 到窃听节点 E 链路的信噪比, $\gamma_{j,D}^W$ 表示干扰节点 j 到目的节点 D 链路的信噪比, $\gamma_{j,E}^W$ 表示干扰节点 j 到窃听节点 E 链路的信噪比。

4 算法中断性能分析

4.1 $v_D > v_2$ 时安全容量的概率密度函数

为了简化分析,假设窃听节点 E 静止, $J \rightarrow E, R \rightarrow E$ 两条链路采用快速自适应,在莱斯信道下, $J \rightarrow E, R \rightarrow E$ 两条链路的信噪比的概率密度函数为

$$f_{\gamma_{R,E}^F}^F(\gamma_{R,E}^F) = \frac{(1 + n_{R,E}^2) e^{-n_{R,E}^2}}{\gamma_{R,E}} e^{-\frac{(1 + n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}} \gamma_{R,E}^F} \times I_0 \left(2n_{R,E} \sqrt{\frac{(1 + n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}} \gamma_{R,E}^F} \right), \quad (3)$$

$$f_{\gamma_{J,E}^F}^F(\gamma_{J,E}^F) = \frac{(1 + n_{J,E}^2) e^{-n_{J,E}^2}}{\gamma_{J,E}} e^{-\frac{(1 + n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}} \gamma_{J,E}^F} \times I_0 \left(2n_{J,E} \sqrt{\frac{(1 + n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}} \gamma_{J,E}^F} \right). \quad (4)$$

式中, $\gamma_{R,E}^F, \gamma_{J,E}^F$ 分别为快速链路自适应下的 $R \rightarrow E, J \rightarrow E$ 链路信噪比, $\overline{\gamma_{R,E}}, \overline{\gamma_{J,E}}$ 分别为 $R \rightarrow E, J \rightarrow E$ 链路的平均信噪比, $n_{R,E}, n_{J,E}$ 分别是 $R \rightarrow E, J \rightarrow E$ 链路信道的莱斯因子, $I_0(x)$ 为第一类零阶贝塞尔函数。由于 $\gamma_{R,E}^F, \gamma_{J,E}^F$ 相互独立,可得 $\gamma_{R,E}^F, \gamma_{J,E}^F$ 的联合概率密度函数 $f^F(\gamma_{R,E}^F, \gamma_{J,E}^F) = f_{\gamma_{R,E}^F}^F(\gamma_{R,E}^F) \cdot f_{\gamma_{J,E}^F}^F(\gamma_{J,E}^F)$ 。

设 $Z_1 = \frac{\gamma_{R,E}^F}{\gamma_{J,E}^F}$, 则 Z_1 的概率密度函数为

$$f_{Z_1}^F(z_1) = \int_0^{+\infty} |\gamma_{J,E}^F| f^F(\gamma_{J,E}^F \cdot z_1, \gamma_{J,E}^F) d\gamma_{J,E}^F = \int_0^{+\infty} \frac{\gamma_{J,E}^F \cdot (1 + n_{R,E}^2) (1 + n_{J,E}^2) e^{-n_{R,E}^2 - n_{J,E}^2}}{\gamma_{R,E} \gamma_{J,E}} \times e^{-\frac{(1 + n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}} \gamma_{J,E}^F \cdot z_1 - \frac{(1 + n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}} \gamma_{J,E}^F} \times I_0 \left(2n_{R,E} \sqrt{\frac{(1 + n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}} \gamma_{J,E}^F \cdot z_1} \right) \times I_0 \left(2n_{J,E} \sqrt{\frac{(1 + n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}} \gamma_{J,E}^F} \right) d\gamma_{J,E}^F. \quad (5)$$

令 $Y_1 = \text{lb}(Z_1)/2$, 则 Y_1 的概率密度函数为

$$f_{Y_1}^F(y_1) = |\ln 2 \cdot 2^{2y_1+1}| f_{Z_1}^F(2^{2y_1}) = \ln 2 \cdot 2^{2y_1+1} \int_0^{+\infty} \frac{\gamma_{J,E}^F \cdot (1 + n_{R,E}^2) (1 + n_{J,E}^2) e^{-n_{R,E}^2 - n_{J,E}^2}}{\gamma_{R,E} \gamma_{J,E}} \times e^{-\frac{(1 + n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}} \gamma_{J,E}^F \cdot 2^{2y_1} - \frac{(1 + n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}} \gamma_{J,E}^F} \times I_0 \left(2n_{R,E} \sqrt{\frac{(1 + n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}} \gamma_{J,E}^F \cdot 2^{2y_1}} \right) \times I_0 \left(2n_{J,E} \sqrt{\frac{(1 + n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}} \gamma_{J,E}^F} \right) d\gamma_{J,E}^F. \quad (6)$$

当目的节点 D 高速移动即 $v_D > v_2$ 时, $J \rightarrow D, R \rightarrow D$ 链路采用慢速链路自适应,平均信噪比的概率密度函数可以用对数正态分布描述如下:

$$f_{\gamma_{R,D}^S}^S(\gamma_{R,D}^S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \gamma_{R,D}^S \sigma_{R,D}} e^{-(\ln \gamma_{R,D}^S - \mu_{R,D})^2 / 2\sigma_{R,D}^2}, \quad (7)$$

$$f_{\gamma_{J,D}^S}^S(\gamma_{J,D}^S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \gamma_{J,D}^S \sigma_{J,D}} e^{-(\ln \gamma_{J,D}^S - \mu_{J,D})^2 / 2\sigma_{J,D}^2}. \quad (8)$$

式中, $\gamma_{R,D}^S, \gamma_{J,D}^S$ 分别为慢速链路自适应下相应链路的平均信噪比, $\mu_{R,D}, \mu_{J,D}, \sigma_{R,D}, \sigma_{J,D}$ 分别为相应链路平均信噪比的均值和方差。

同理可得 $\gamma_{R,D}^S, \gamma_{J,D}^S$ 的联合概率密度函数

$$f^S(\gamma_{R,D}^S, \gamma_{J,D}^S) = f_{\gamma_{R,D}^S}^S(\gamma_{R,D}^S) \cdot f_{\gamma_{J,D}^S}^S(\gamma_{J,D}^S)$$

以及 $Z_2 = \gamma_{R,D}^S / \gamma_{J,D}^S$ 的概率密度函数

$$f_{Z_2}^S(z_2) = \int_0^{+\infty} |\gamma_{J,D}^S| f^S(\gamma_{J,D}^S \cdot z_2, \gamma_{J,D}^S) d\gamma_{J,D}^S,$$

从而得到 $Y_2 = \text{lb}(Z_2)/2$ 的概率密度函数

$$f_{Y_2}^S(y_2) = |\ln 2 \cdot 2^{2y_2+1}| f_{Z_2}^S(2^{2y_2}).$$

令 $C_S = \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{R,D}^W}{1 + \gamma_{J,D}^W} \right) - \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{R,E}^W}{1 + \gamma_{J,E}^W} \right)$, 参照

文献[9]的近似处理,于是有

$$C_S \approx \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{R,D}^W}{\gamma_{J,D}^W} \right) - \frac{1}{2} \text{lb} \left(1 + \frac{\gamma_{R,E}^W}{\gamma_{J,E}^W} \right) \approx \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{\gamma_{R,D}^W}{\gamma_{J,D}^W} \right) - \frac{1}{2} \text{lb} \left(\frac{\gamma_{R,E}^W}{\gamma_{J,E}^W} \right). \quad (9)$$

于是,可以得到 C_S 的概率密度函数

$$\begin{aligned} f_{C_S}^S(c_s) &= \int_0^{+\infty} f_{Y_2}^S(y_2 + c_s) f_{Y_1}^F(y_2) dy_2 = \\ &\int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} (\ln 2)^2 \cdot 2^{4y_2+2c_s+2} \times \\ &\frac{\gamma_{J,E}^F \cdot (1+n_{R,E}^2)(1+n_{J,E}^2) e^{-n_{R,E}^2-n_{J,E}^2}}{2\pi\gamma_{J,D}^S \cdot (2^{2y_2} + c_s) \sigma_{R,D} \sigma_{J,D} \gamma_{R,E} \gamma_{J,E}} \times \\ &e^{-(\ln \gamma_{J,D}^S \cdot (2^{2y_2} + c_s) - \mu_{R,D})^2 / 2\sigma_{R,D}^2} \times \\ &e^{-(\ln \gamma_{J,D}^S - \mu_{J,D})^2 / 2\sigma_{J,D}^2} \gamma_{R,E}^F \gamma_{J,E}^F \cdot 2^{2y_2} \frac{(1+n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}} \gamma_{J,E}^F \times \\ &I_0 \left[2n_{R,E} \sqrt{\frac{(1+n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}}} \gamma_{J,E}^F \cdot 2^{2y_2} \right] \times \\ &I_0 \left[2n_{J,E} \sqrt{\frac{(1+n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}}} \gamma_{J,E}^F \right] d\gamma_{J,D}^S d\gamma_{J,E}^F dy_2. \end{aligned} \quad (10)$$

4.2 $v_D \leq v_1$ 时安全容量的概率密度函数

当目的节点 D 低速移动即 $v_D \leq v_1$ 时, $R \rightarrow D, J \rightarrow D$ 链路采用快速链路自适应,相应链路的信噪比的概率密度函数分别为

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{R,D}^F}^F(\gamma_{R,D}^F) &= \frac{(1+n_{R,D}^2) e^{-n_{R,D}^2}}{\gamma_{R,D}} e^{-\frac{(1+n_{R,D}^2)}{\gamma_{R,D}}} \gamma_{R,D}^F \times \\ &I_0 \left(2n_{R,D} \sqrt{\frac{(1+n_{R,D}^2)}{\gamma_{R,D}}} \gamma_{R,D}^F \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} f_{\gamma_{J,D}^F}^F(\gamma_{J,D}^F) &= \frac{(1+n_{J,D}^2) e^{-n_{J,D}^2}}{\gamma_{J,D}} e^{-\frac{(1+n_{J,D}^2)}{\gamma_{J,D}}} \gamma_{J,D}^F \times \\ &I_0 \left(2n_{J,D} \sqrt{\frac{(1+n_{J,D}^2)}{\gamma_{J,D}}} \gamma_{J,D}^F \right). \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\gamma_{R,D}^F, \gamma_{J,D}^F$ 分别为快速自适应下 $R \rightarrow D, J \rightarrow D$ 链路的信噪比。同 4.1 节的推导过程,可以得到此时 C_S 的概率密度函数为

$$\begin{aligned} f_{C_S}^F(c_s) &= \int_0^{+\infty} f_{Y_2}^F(y_2 + c_s) f_{Y_1}^F(y_2) dy_2 = \\ &\int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} \int_0^{+\infty} (\ln 2)^2 \cdot 2^{4y_2+2c_s+2} \times \\ &\frac{\gamma_{J,D}^F \gamma_{J,E}^F (1+n_{R,E}^2)(1+n_{J,E}^2)(1+n_{R,D}^2)(1+n_{J,D}^2) e^{-n_{R,E}^2-n_{J,E}^2-n_{R,D}^2-n_{J,D}^2}}{\gamma_{R,E} \gamma_{J,E} \gamma_{R,D} \gamma_{J,D}} \times \\ &e^{\frac{(1+n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}} \gamma_{J,E}^F \cdot 2^{2y_2} - \frac{(1+n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}} \gamma_{J,E}^F - \frac{(1+n_{R,D}^2)}{\gamma_{R,D}} \gamma_{J,D}^F \cdot (2^{2y_2} + c_s) - \frac{(1+n_{J,D}^2)}{\gamma_{J,D}} \gamma_{J,D}^F} \times \\ &I_0 \left(2n_{R,D} \sqrt{\frac{(1+n_{R,D}^2)}{\gamma_{R,D}}} \gamma_{J,D}^F \cdot (2^{2y_2} + c_s) \right) \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &I_0 \left(2n_{R,E} \sqrt{\frac{(1+n_{R,E}^2)}{\gamma_{R,E}}} \gamma_{J,E}^F \cdot 2^{2y_2} \right) \times \\ &I_0 \left(2n_{J,E} \sqrt{\frac{(1+n_{J,E}^2)}{\gamma_{J,E}}} \gamma_{J,E}^F \right) \times \\ &I_0 \left(2n_{J,D} \sqrt{\frac{(1+n_{J,D}^2)}{\gamma_{J,D}}} \gamma_{J,D}^F \right) d\gamma_{J,D}^F d\gamma_{J,E}^F dy_2. \end{aligned} \quad (13)$$

当 $v_1 < v_D \leq v_2$ 时的安全容量分布可类似得到,限于篇幅,此处不作介绍。

4.3 算法中断性能

$S_{\text{relay}} = \{R_1, R_2, \dots, R_K\}$ 中的中继节点两两组成中继节点和干扰节点对,每一对所构成场景的安全容量的概率密度函数分别为 $f_{C_{S1}}(c_{s1}) f_{C_{S2}}(c_{s2}) \dots f_{C_{Sn}}(c_{sn})$,其中 $n = 2C_K^2$ 。假设中继节点和干扰节点对 (R_i, J_i) 构成的场景的安全容量为 C_{Si} ,则中继节点和干扰节点 (R_i, J_i) 被选出的概率为

$$\begin{aligned} P(R_i, J_i) &= P(C_{Si} > C_{S1}) P(C_{Si} > C_{S2}) \dots \\ &P(C_{Si} > C_{Sn}) = \\ &[1 - P(C_{Si} - C_{S1} \leq 0)] \cdot \\ &[1 - P(C_{Si} - C_{S2} \leq 0)] \dots \\ &[1 - P(C_{Si} - C_{Sn} \leq 0)] = \\ &[1 - \int_{-\infty}^0 \int_0^{+\infty} f_{C_{Si}}(c_{si} + z) f_{C_{S1}}(c_{si}) dc_{si} dz] \times \\ &[1 - \int_{-\infty}^0 \int_0^{+\infty} f_{C_{Si}}(c_{si} + z) f_{C_{S2}}(c_{si}) dc_{si} dz] \dots \\ &[1 - \int_{-\infty}^0 \int_0^{+\infty} f_{C_{Si}}(c_{si} + z) f_{C_{Sn}}(c_{si}) dc_{si} dz], \end{aligned} \quad (14)$$

系统的中断概率为

$$P_{\text{out}} = P(R_i, J_i) \times \int_0^{\gamma_0} f_{\gamma_{R_i,D}^W}(\gamma_{R_i,D}^W) d\gamma_{R_i,D}^W. \quad (15)$$

式中, γ_0 是 $R \rightarrow D$ 链路的信噪比中断门限。

5 仿真分析

仿真系统模型采用第 2 节中所述系统,假设窃听节点 E 为静止的,目的节点 D 为移动的,节点 D 的移动速度 v_D 在 $0 \sim 120$ km/h 服从均匀分布,速度门限值 $v_1 = 10$ km/h, $v_2 = 60$ km/h。系统中有 3 个中继节点,从 3 个中继节点中选取 J 和 R 。采用莱斯衰落信道,莱斯因子为 1。

首先将公式 (15) 中的中断概率与仿真结果进行对比,如图 2 所示。从图中可以看出,中断概率的理论分析性能与相同条件下的仿真结果十分吻合,从而验证了所推导中断概率的正确性。

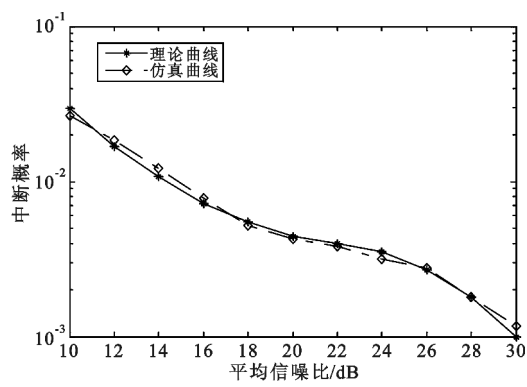


图 2 中断概率理论与仿真结果对比

Fig. 2 Outage probability comparison between simulation and analytical results

其次,分别仿真了快慢速链路自适应融合与单一快速链路自适应下所提安全协作中继选择算法的误码率性能,结果如图 3 所示。从图中可以看出,各链路的误码率都随着平均信噪比的增加而呈现下降趋势。同时,快慢速链路自适应融合下所提安全中继选择算法的误码率比单一快速链路自适应下的要小,尤其是 $R \rightarrow D$ 链路,优势更明显,说明基于快慢速链路自适应融合的安全中继选择算法相对基于快速链路自适应的安全协作中继选择算法的误码率性能更优,从而验证了快慢速链路自适应融合对于提升移动通信系统性能的重要作用。

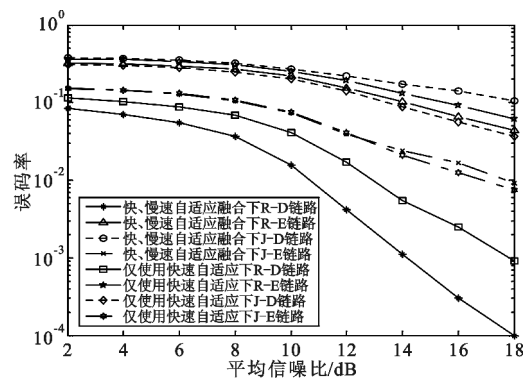


图 3 快慢速链路自适应融合与单一快速链路自适应下安全协作中继选择算法的误码率性能对比

Fig. 3 Bit error rate performance comparison between the proposed algorithm and single fast adaptation

安全容量是衡量安全协作通信系统的主要性能指标,对此分别仿真了快慢速链路自适应融合和单一快速链路自适应下应用所提安全协作中继选择算法时的系统安全容量,结果如图 4 所示。可以清楚地看到,在使用快慢速链路自适应融合时,安全协作通信系统的安全容量相对于单一快速链路自适应时的系统安全容量有大幅度的提升,最大提升幅度达

到 15%,充分说明了快慢速链路自适应融合对提升安全协作通信系统性能的重要作用。同时,为了探讨干扰节点对安全协作中继系统性能的影响,我们分别仿真了使用干扰节点和不使用干扰节点情形下应用所提安全协作中继选择算法时的系统安全容量,如图 5 所示。可以看出,由于仿真中控制了干扰节点的发射功率,采用较小的发射功率,干扰节点对安全协作通信系统的性能呈现“正”效应,体现在使用干扰节点时的安全协作通信系统的安全容量相对于不使用干扰节点时的安全容量优势显著,安全容量提升幅度在 5% ~ 15% 之间,说明了正确使用干扰节点有利于提升安全协作通信系统的性能。

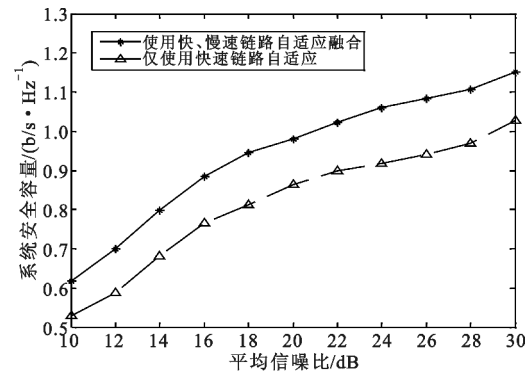


图 4 快慢速链路自适应融合时与仅使用快速链路自适应时的系统安全容量对比

Fig. 4 System security capacity comparison between the proposed algorithm and single fast adaptation

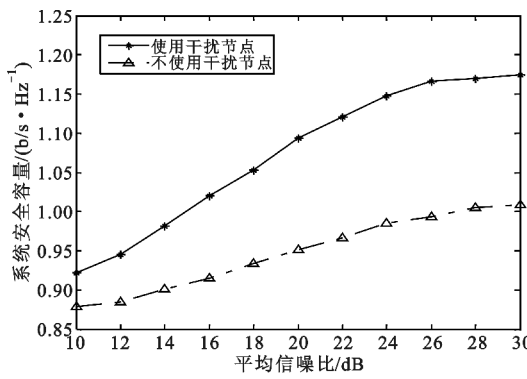


图 5 使用干扰节点时与不使用干扰节点时的系统安全容量对比

Fig. 5 System security capacity comparison when jamming node is used or not

6 结束语

本文提出了基于快慢速链路自适应融合的安全中继选择算法,并进行了理论和仿真分析。分析表明,在安全协作网络的链路传输和中继选择中引入

自适应类型选择以及干扰节点使用等问题,有助于降低系统误码率,提高系统安全容量,提升幅度最高可以达到 15%,具有积极的现实意义。此外,本文算法克服了现有算法可能导致干扰节点来回切换的缺陷,具有实际应用价值。未来可以进一步考虑开展多天线系统中此类问题的研究。

参考文献:

- [1] PELLEGRINI V, PRINCIPE F, DE MAYRI G, et al. Cryptographically secure radios based on directional modulation [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing. Florence: IEEE, 2014: 8163–8167.
- [2] 张文, 黄继海, 吉江. 防内外部窃听的多播物理层安全发 [J]. 电讯技术, 2014, 54(7): 980–984.
ZHANG Wen, HUANG Jihai, JI Jiang. Physical Layer Security Algorithm for Multicast System Preventing Internal / External Eavesdroppers [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(7): 980–984. (in Chinese).
- [3] XIAO H, YANG K, WANG X D. Robust Power Control under Channel Uncertainty for Cognitive Radios with Sensing Delays [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2013, 12(2): 646–655.
- [4] SURAWEEERA N D, WAVEGEDARA K C B. Distributed Beam forming Techniques for Dual-hop Decode-and-Forward MIMO Relay Networks [C]// Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Industrial and Information Systems. Bali Island: IEEE, 2011: 125–129.
- [5] MATSUMURO T, ISHIKAWA Y, ISHIKAWA T, et al. Effective Beam Forming of Phased Array Antenna for Efficient Microwave Power Transmission [C]// Proceedings of 2014 IEEE Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference. Sendai: IEEE, 2014: 717–719.
- [6] SANTHOSHKUMAR M, SELVARAJ M D. Performance Analysis of Scaled Switching Technique for Cooperative Diversity Systems [C]// Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Information and Communication Technology. Shanghai: IEEE, 2014: 425–430.

- [7] DAI B, MA Z. Achievable Rate-Equivocation Regions for Relay Broadcast Channels with Confidential Messages [C]// Proceedings of 2014 IEEE Information Theory and its Applications. Chengdu: IEEE, 2014: 393–397.
- [8] LUO S Y, LI J Y, PETROPULU A P. Uncoordinated Cooperative Jamming for Secret Communications [J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2013, 8(7): 1081–1090.
- [9] KRIKIDIS I, THOMPSON J S, LAUGHLIN S M. Relay Selection for Secure Cooperative Networks with Jamming [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(10): 5003–5011.
- [10] TONI L, CONTI A. Does Fast Adaptive Modulation Always Outperform Slow Adaptive Modulation [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2011, 10(5): 1504–1513.

作者简介:



谭琛(1989—),男,山东临沂人,2012年获学士学位,现为广西师范大学硕士研究生,主要研究方向为协同通信;

TAN Chen was born in Linyi, Shandong Province, in 1989. He received the B. S. degree in 2012. He is now a graduate student. His research concerns cooperative communications.

肖琨(1974—),男,湖南邵阳人,2003年获博士学位,现为副教授、硕士生导师,主要研究方向为协同通信、移动衰落信道等;

XIAO Kun was born in Shaoyang, Hunan Province, in 1974. He received the Ph. D. degree in 2003. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns cooperative communications and mobile fading channels.

Email: xiaokun@gxnu.edu.cn

候飞宇(1991—),男,山西泽州人,2014年获学士学位,现为广西师范大学硕士研究生,主要研究方向为协同通信。

HOU Feiyu was born in Zezhou, Shanxi Province, in 1991. He received the B. S. degree in 2014. He is now a graduate student. His research concerns cooperative communications.