引用格式:何春燕,高飞,张辉. 基于斯塔克伯格博弈的联合中继和干扰的功率分配机制[J]. 电光与控制,2018,25(1):104-109. HE C Y, GAO F, ZHANG H. A power allocation mechanism combining relay with jammer based on stackelberg game[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(1): 104-109.

基于斯塔克伯格博弈的联合中继和干扰的功率分配机制

何春燕, 高 飞, 张 辉
(重庆邮电大学移通学院通信与信息工程系,重庆 401520)

摘 要: 在无线通信系统中,用户与窃听中继协作将导致信息泄露,为保证自身通信安全需向协作干扰者支付报酬购买干扰功率,导致自身效益降低。为了在安全通信的同时提高用户效益,提出一种基于斯塔克伯格的联合中继和干扰的功率分配机制。在窃听中继协作转发、空闲用户协作干扰的场景下,建立三方博弈的斯塔克伯格博弈模型:将通信用户建模为功率购买者,窃听中继和空闲用户建模为功率出售者,有效刻画了安全与效益的折中关系。仿真结果表明,所提联合功率分配方案会在数次迭代后收敛到所有节点收益最大值,同时也是发送方通信安全容量的最大值,比中继全功率发送时提高了0.2 (bit·s^{-1})·Hz^{-1},提高用户安全性能。

关键词: 协作网络; 窃听中继; 斯塔克伯格博弈; 功率分配; 安全容量
中图分类号: TN918 **文献标志码**: A **doi**:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.01.022

A Power Allocation Mechanism Combining Relay with Jammer Based on Stackelberg Game

HE Chun-yan, GAO Fei, ZHANG Hui
(Department of Communication and Information Engineering, College of Mobile Telecommunications, Chongqing University of Posts and Telecom, Chongqing 401520, China)

Abstract: In the wireless communications system, the cooperation of users with eavesdropping relay may result in the leakage of information. To ensure their communication security, it's necessary to pay the cooperative jammer for the jamming power. In order to improve the user benefits under secret communication, this paper presents a power allocation mechanism combining relay with jammer based on the Stackelberg game. In the case of the eavesdropping relay cooperative forwarding and the idle user collaborated interfering, a tripartite game model is established based on Stackelberg game, where the communication user is regarded as a power-buyer and the relay and idle users are regarded as power-sellers. Simulation results show that the proposed joint power allocation mechanism will converge to some value which is not only the maximum utility of all nodes after several iterations, but also the maximum security capacity of the sender. The security capacity improves by 0.2 (bit·s^{-1})·Hz^{-1} than that of relay with full power, which improves the safety performance of the user.

Key words: cooperative network; eavesdropping relay; Stackelberg game; power allocation; security capacity

0 引言

无线网络中大量用户受通信距离或环境等因素限制而无法直接通信,必须经过中继节点协作转发才能进行信息交换。协作通信的成功主要基于协作节点的可靠性,但在实际情况中难以得到保证,如出于利益的考虑,部分中继节点被非法收买并对合法用户进行窃听。这些不可靠的中继也被称为恶意中继,其恶意行为将增大窃听信道容量、减小主信道容量,从而降低整个系统的安全性能。

针对无线网络存在未知恶意中继的情况,不少学者从检测恶意行为的角度出发进行研究,文献[1]通

收稿日期:2017-02-20 **修回日期**:2017-11-06
基金项目:2015年重庆市高等教育教学改革研究项目(153203);重庆市特色专业建设项目(YTJG201633, YTJG201618, YTJG201615, YTJG201639)
作者简介:何春燕(1985—),女,重庆合川人,硕士,讲师,研究方向为移动通信、物联网、信号处理。

过两个二进制假说来分别检测降低功率的自私行为和恶意干扰攻击；文献[2]设计了一种双重方案来检测准静态中继信道中存在恶意行为的中继，通过测量平均接收功率和观察追踪符号的相位旋转分布检测中继的不端行为；文献[3]设计了 MANET 网络的新型入侵检测系统以判断邻近节点的可靠性。在对恶意中继行为检测的基础上，一些学者建立了协作网络的节点信任评估模型对网络中节点进行评估：文献[4]在协作无线网络中通过贝叶斯架构提出一种信任度建立的方法，从而获取每个中继节点的纯信任值；文献[5]在 Ad Hoc 网络中，提出了一种基于自我监督机制的信任激励模型，并加入信任缩放因子来降低虚假二手信息对信任值准确度的影响；文献[6]为车联网提出新的信任模型，引入伙伴车辆的概念，在邻近车辆中过滤并选择最可信节点。此外，研究有效的发送策略也可以保证通信的安全性和可靠性；文献[7]研究了双向中继情况下中继不可靠时存在的物理层安全问题，证明了有效保密通信容量的存在并通过功率联合优化给出了最优发射功率向量；文献[8]在可能存在恶意中继的分布式协作中继网络中应用网络编码技术，通过不完全信息博弈实现节点秩序的稳定；文献[9]得到了两跳放大转发网络中的不可信中继存在下渐近的安全容量；文献[10]对于协作认知网络中存在的恶意次级节点的场景进行分析计算可达安全速率。但是，现有文献都是针对恶意中继进行研究的，通过建立信任模型或检测机制发现网络中恶意中继存在并对其惩罚，或者是在恶意中继存在的情况下通过设计发送策略使用户信息对其保密，没有考虑客观原因导致的恶意中继的利用方法。现实网络环境复杂，由于长期使用或环境等因素很可能造成中继设备老化和损坏，并由此引起转发信号错误。此时如果继续使用，将影响合法用户对信息的接收；直接剔除或者更换中继又会增加网络成本，同时影响用户通信安全。

针对中继转发时窃听的问题，本文提出一种基于斯塔克伯格博弈的协作功率分配机制，通过网络中空闲用户的协作干扰，保证私密信息安全传输。由于用户自私性，需要发送用户付出一定的代价来交换协作功率，空闲用户提供有偿转发服务以获得报酬。在这种情况下建立斯塔克伯格博弈模型，定义合法发送方为买方，空闲用户和窃听中继为卖方，并计算各自收益函数。然后，得到功率和单位功率价格的迭代函数，通过循环迭代得到功率分配和单位功率价格的最优解，即斯塔克伯格博弈的均衡解，此时网络中每个节点效益都是最优。最后，通过仿真表明，本文所提联合功率分配方案会在数次迭代后收敛，收敛到所有节点收益最大值，同时也是发送方通信安全容量的最大值，比中继全功率发送时提高了 0.2 $(\text{bit}\cdot\text{s}^{-1})\cdot\text{Hz}^{-1}$，提高用户安全性能。

1　系统模型及安全性能

1.1　系统模型

协作中继网络中有一个合法发送方 A，一个合法接收方 B 和一个窃听中继 R，如图 1 所示。由于环境所限，A 和 B 之间没有直接链路通信，只能向 R 购买功率协作转发信号。同时为了保证安全通信，A 向网络中空闲用户 J 购买功率进行协作干扰，影响 R 的窃听。网络中所有节点都是半双工模式下单天线发送/接收，信道之间相互正交且服从瑞利衰落，各节点处噪声是均值为 0、方差为 1 的高斯白噪声。

通信中继过程包括两个主要时隙，如图 1 所示。

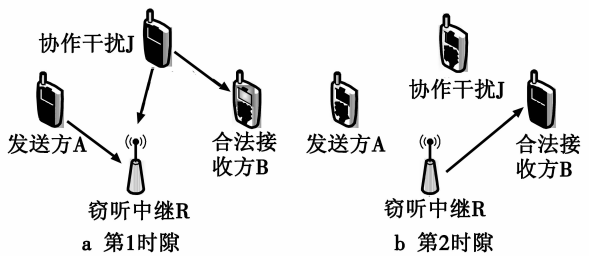

图 1　两恶意中继协作转发网络

Fig. 1　Two malicious relay cooperative forwarding network

第 1 个时隙中，A 发送信息 x，J 发送干扰信号 s_J。此时，R 接收到来自 A 和 J 的混合信号，B 能接收到 J 发送的干扰，R 和 B 接收到的信号 $y_{R,1}$，$y_{B,1}$ 分别表示为

$$y_{R,1}=\sqrt{P_A}h_{AR}x+\sqrt{P_J}h_{JR}s_J+n_R \tag{1}$$

$$y_{B,1}=\sqrt{P_J}h_{JB}s_J+n_{B,1} \tag{2}$$

在第 2 个时隙中，R 放大转发上一时刻接收到的混合信号 $y_{R,1}$，放大系数设为 β。此时，B 接收 R 转发的混合信号表示为

$$y_{B,2}=\sqrt{P_R}h_{RB}\beta y_{R,1}+n_{B,2}\ 。 \tag{3}$$

1.2　安全性能分析

由通信过程分析可知，B 通过 2 个时隙接收到的信息可以解码出正确的发送信息，而转发同时窃听的中继 R 会受到干扰信号的影响。S 发送信号至 B 的信道为主信道，A 至 R 的信道为窃听信道，A 发送信号被 R 解码的信息量为窃听信道容量。

由式(1)代入式(3)并化简可以发现，$y_{B,2}=\sqrt{P_R}h_{RB}\cdot\beta y_{R,1}+n_{B,2}=\sqrt{P_R}h_{RB}\beta(\sqrt{P_A}h_{AR}x+\sqrt{P_J}h_{JR}s_J+n_R)+n_{B,2}=(\sqrt{P_A}\sqrt{P_R}h_{AR}h_{RB}\beta)x+(\sqrt{P_J}\sqrt{P_R}h_{JR}h_{RB}\beta)s_J+(\sqrt{P_R}h_{RB}\beta n_R+n_{B,2})$，结合 $y_{B,1}$ 可消除干扰信号 s_J 影响，得到主信道信噪比为 $\gamma_B=(P_AP_R|h_{RB}|^2|h_{AR}|^2\cdot\beta^2)/(P_R|h_{RB}|^2\beta^2+1)$ 。

对于窃听中继 R 来说,接收到混合信号 $y_{R,I}$,则窃听信道信噪比 γ_E 为 $\gamma_E=\dfrac{P_A|h_{AR}|^2}{P_J|h_{JR}|^2+1}$,此系统安全容量表示为

$$C_S=\frac{1}{2}\left[\mathrm{lb}\left(\frac{1+\gamma_B}{1+\gamma_E}\right)\right]^+ \tag{4}$$

式中,$[x]^+=\max\{0,x\}$。

本文中,A 通过向空闲用户和窃听中继支付虚拟货币换取协作功率,同时协作节点计算协作的收益和成本来确定是否参与协作。因此,在此场景下的关键问题是确定如何通过适当的价格向中继购买协作功率以尽可能提高各节点效益。

2 基于斯塔克伯格博弈的联合协作中继和干扰的功率分配算法

斯塔克伯格博弈问题也称为主从递阶决策问题,最初是德国经济学家 VON STACKELBERG 于 1952 年针对市场经济问题进行研究时提出的[11]。

斯塔克伯格博弈问题通常是由多个具有层次性的决策者组成的,当组成这种系统的上下级关系不止一个时,称为多级博弈系统。当只有一个上下级关系时,称为两级博弈系统。在两级博弈系统中,上级决策者也称为主方,下级决策者也称为从方,相应地,上级决策者问题称为主方问题,下级决策者问题称为从方问题[12]。

两级博弈系统是最简单的主从递阶博弈系统,也可以直接看作是买卖双方之间的交互博弈。卖方(或主方)试图通过为每个买家设置最优的单位商品价格来最大化自己的收益;对买方(或从方)而言,当卖方策略固定后,各买家单独地调整自己的策略,使自己的收益最大化。

本文通过斯塔克伯格博弈模型来解决中继和干扰的功率分配问题,建立买卖双方交易:将提供协作功率的恶意中继 R 和恶意干扰者 J 分别建模为卖方,将合法发送 - 接收用户对建模为买方,此时存在两个斯塔克伯格博弈,下文进行详细分析。

2.1 斯塔克伯格博弈模型定义

斯塔克伯格博弈模型主要由买方、卖方构成,本节对应进行建模:合法发送 - 接收用户对作为买方通过支付分别获得 R 和 J 的协作功率,R 和 J 各自根据 A 的功率需求上报单位功率价格,详细定义如下。

2.1.1 买方(合法发送 - 接收用户对)博弈

作为买方,目标是以最小的代价获得最多的收益,本文中的买方是合法发送 - 接收用户对,其收益是安全速率,但要付出一定代价。因此,最终收益 U_A 是可达安全速率与支付的差值,即

$$\max_{\{P_i\}} U_A=\omega C_S-\lambda_R P_R-\lambda_J P_J \tag{5}$$
$$\text{s.t.}\quad 0<\{P_i\}_{i=R,J}<P$$

式中:ω 为单位信道容量收益因子;$\{\lambda_i\}_{i=R,J}$ 为 A 分别向恶意中继 R 和恶意干扰者 J 购买单位功率的价格;$\{P_i\}_{i=R,J}$ 为购买功率大小,则 $\sum_{i=R,J}\lambda_i P_i$ 为买方购买协作功率付出的全部代价。

2.1.2 卖方(中继节点)博弈

作为卖方,最基本的目标是获取最大的利益,但在本文的场景中,R 和 J 各有额外目标需求。

首先对于恶意中继 R,其协作转发的目的是为了窃听合法用户的通信内容,因此,其收益应包括窃听信道容量收益和提供协作功率收益两部分,即

$$U_R=\omega C_E+(\lambda_R-c_R)P_R \tag{6}$$

式中:$C_E=\dfrac{1}{2}\mathrm{lb}(1+\gamma_E)$ 表示窃听信道容量;c_R 为 R 单位功率协作成本。

而对于恶意干扰者 J 来说,其收益仅来自于提供协作功率所得的收益,即

$$U_J=(\lambda_J-c_J)P_J \tag{7}$$

式中,c_J 为 J 单位功率协作成本。

根据以上分析可知,买卖双方之间需要交换的信息只有单位功率价格$\{\lambda_i\}_{i=R,J}$和所需功率$\{P_i\}_{i=R,J}$,其他数据都是已知且独立计算的。因此,可以基于最优响应函数,为本文所提斯塔克伯格博弈模型设计一种分布式功率分配算法。下文对该算法进行具体分析。

2.2 斯塔克伯格博弈均衡

2.2.1 斯塔克伯格博弈均衡定义

典型的斯塔克伯格博弈最终必将收敛到斯塔克伯格均衡(Stackelberg Equilibrium,SE),SE 是斯塔克伯格博弈的稳定均衡解,其定义为:当主方策略 x^{SE} 固定时,从方策略 y^{SE} 满足其效用函数 f 最优;同时,当从方策略 y^{SE} 固定时,主方策略 x^{SE} 满足其效用函数 F 最优。可以简单理解为:当主方策略固定时,所有从方的策略使得从方之间达到纳什均衡,同时主方的效用函数也达到最优。

根据定义,本文场景下的斯塔克伯格博弈均衡定义如下。

定义 1 博弈均衡点 $SE(\lambda_R^{SE},\lambda_J^{SE};P_R^{SE},P_J^{SE})$ 满足以下条件:

当 $\lambda_R^{SE},\lambda_J^{SE}$ 固定时

$$U_A(P_R^{SE},P_J^{SE})=\sup_{\substack{0<P_R<P\\0<P_J<P}}U_A(P_R,P_J)\ ; \tag{8}$$

当 P_R^{SE},P_J^{SE} 固定时

$$\begin{cases}U_R(\lambda_R^{SE})=\sup\limits_{\lambda_R}U_R(\lambda_R)\\ U_J(\lambda_J^{SE})=\sup\limits_{\lambda_J}U_J(\lambda_J)\end{cases}。 \tag{9}$$

2.2.2　买方(合法发送－接收用户对)博弈分析

由前面的分析可知,当 R 和 J 设置的单位功率价格固定后,A 通过优化所需协作功率值以最大化自己的收益。根据定义 1,当 λ_R,λ_J 固定后,分别将 U_A 关于 P_R 和 P_J 求导得到

$$\begin{cases}\dfrac{\partial U_A}{\partial P_R}=\dfrac{\omega P_A|h_{RB}|^2|h_{AR}|^2\beta^2}{2\ln 2(1+\gamma_E)(P_R|h_{RB}|^2\beta^2+1)^2}-\lambda_R\\ \dfrac{\partial U_A}{\partial P_J}=\dfrac{\omega(1+\gamma_B)|h_{JR}|^2\alpha^2}{2\ln 2(1+\gamma_E)^2(P_J|h_{JR}|^2\alpha^2+1)^2}-\lambda_J\end{cases}\tag{10}$$

再对 U_A 关于 P_R 和 P_J 求二阶导,可以得到

$$\begin{cases}\dfrac{\partial^2 U_A}{\partial P_R^2}=-\dfrac{\omega P_A|h_{RB}|^4|h_{AR}|^2\beta^4}{\ln 2(1+\gamma_E)(P_R|h_{RB}|^2\beta^2+1)^3}<0\\ \dfrac{\partial^2 U_A}{\partial P_J^2}=-\dfrac{\omega(1+\gamma_B)\gamma_E|h_{JR}|^4\alpha^4}{\ln 2(1+\gamma_E)^3(P_J|h_{JR}|^2\alpha^2+1)}<0\end{cases}\tag{11}$$

很明显,买方效用函数是凸函数,令式(10)等于 0 即可得到最优功率(P_R^*,P_J^*)。令 $X=P_A|h_{AR}|^2$,$Y=|h_{RB}|^2\beta^2$,$Z=|h_{JR}|^2\alpha^2$,则

$$\begin{cases}\dfrac{\partial U_A}{\partial P_R}=\dfrac{\omega XY}{2\ln 2(1+\gamma_E)(2P_RY+1)^2}-\lambda_R=0\\ \dfrac{\partial U_A}{\partial P_J}=-\dfrac{\omega(1+\gamma_B)\gamma_E^2Z}{2\ln 2(1+\gamma_E)^2X}-\lambda_J=0\end{cases}\tag{12}$$

化简式(12),得到

$$a\gamma_E^3+b\gamma_E^2+c\gamma_E+d=0\tag{13}$$

式中:$a=2\ln 2\lambda_RZ$;$b=2\ln 2\lambda_RZ-\omega XYZ-2\omega YZ+4\ln 2XY\lambda_J$;$c=d=-8\ln 2XY\lambda_J$。

将 $\gamma_E=Y-\dfrac{b}{3a}$代入式(13),得到

$$aY^3+\left(c-\frac{b^2}{3a}\right)Y+\left(\frac{2b^3}{27a^3}-\frac{bc}{3a}+d\right)=0\tag{14}$$

。

根据卡丹公式得到式(14)的解为

$$Y^*(1)=\sqrt[3]{-\frac{q}{2}+\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{p}{3}\right)^3}}+\sqrt[3]{-\frac{q}{2}-\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{p}{3}\right)^3}},$$

$$Y^*(2)=\mu\sqrt[3]{-\frac{q}{2}+\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{p}{3}\right)^3}}+\mu^2\sqrt[3]{-\frac{q}{2}-\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{p}{3}\right)^3}},$$

$$Y^*(3)=\mu^2\sqrt[3]{-\frac{q}{2}+\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{p}{3}\right)^3}}+\mu\sqrt[3]{-\frac{q}{2}-\sqrt{\left(\frac{q}{2}\right)^2+\left(\frac{p}{3}\right)^3}},$$

其中,$\mu=\dfrac{-1+\sqrt{3}i}{2}$,$p=\dfrac{c}{a}-\dfrac{b^2}{3a^2}$,$q=\dfrac{2b^3}{27a^4}-\dfrac{bc}{3a^2}+\dfrac{d}{a}$。

已知 $\gamma_E=Y-\dfrac{b}{3a}$,则得到最优功率解为

$$\begin{cases}P_R^*=\dfrac{WX}{4\ln 2\lambda_R\left(1+Y^*-\dfrac{b}{3a}\right)}-\dfrac{1}{2Y}\\ P_J^*=\dfrac{X}{\left(Y^*-\dfrac{b}{3a}\right)Z}-\dfrac{2}{Z}\end{cases}\tag{15}$$

最后比较理论结果和约束条件以确定最终 A 所需协作功率(P_R^*,P_J^*)为

$$\begin{cases}P_R^*=\min(P_R^*,P)\\ P_J^*=\min(P_J^*,P)\end{cases}\tag{16}$$

。

2.2.3　卖方(中继节点)博弈分析

R 和 J 通过优化单位功率价格来最大化自身收益,根据定义 1,当 P_R^{SE},P_J^{SE} 固定时,分别将 U_R 关于 λ_R 求导,U_J 关于 λ_J 求导,得到

$$\begin{cases}\dfrac{\partial U_R}{\partial\lambda_R}=P_R^*+\lambda_R\dfrac{\partial P_R^*}{\partial\lambda_R}=0\\ \dfrac{\partial U_J}{\partial\lambda_J}=P_J^*+\lambda_J\dfrac{\partial P_J^*}{\partial\lambda_J}=0\end{cases}\tag{17}$$

结合(P_R^*,P_J^*)可以得到$(\lambda_R^*,\lambda_J^*)$表达式,此处用参数简单表示为

$$\begin{cases}\lambda_R^*=\lambda_R^*(X,Y,Z)\\ \lambda_J^*=\lambda_J^*(X,Y,Z)\end{cases}\tag{18}$$

。

2.3　斯塔克伯格博弈均衡性质

首先给出基于斯塔克伯格博弈的联合协作中继和干扰的功率分配算法的主要步骤,然后研究探讨斯塔克伯格博奕均衡的性质——存在性和唯一性。

对式(17)整理后可得

$$\lambda_i=F_i(\lambda_i)=-\frac{P_i^*}{\partial P_i^*/\partial\lambda_i}\quad i=R,J\tag{19}$$

式中,$F_i(\lambda_i)$表示的是功率分配算法的更新函数,也可以表示为

$$\lambda_i(t+1)=F_i(\lambda_i(t))\quad i=R,J\tag{20}$$

式中,t 表示迭代次数。

2.3.1　联合功率分配算法主要步骤

1) 初始化。中继节点 R 和空闲用户 J 初始化单位功率价格 λ_i^0 并广播给 A,然后 A 初始化最优功率 P_R^0 和 P_J^0。设置迭代初始值 $t=1$。

2) 合法发送－接收用户对更新。在第 t 次迭代过程中,A 根据式(16)计算得到最优功率$[P_R^*(t),P_J^*(t)]$。

3) 中继节点更新。合法发送－接收用户对更新完毕后将结果发送至中继节点,中继节点 R 和空闲用户J 根据式(20)结合$[P_R^*(t),P_J^*(t)]$更新自己的单位功率价格得到 $\lambda_i(t+1)$,同时更新迭代次数至 $t+1$。

4) 重复 2)和 3),由合法发送－接收用户对和中继节点依次轮流更新直至 $\lambda_i(t)$和$[P_R^*(t),P_J^*(t)]$不再改变,则该斯塔克伯格博弈收敛到$(\lambda_R^{SE},\lambda_J^{SE};P_R^{SE},P_J^{SE})$,即中继节点 R 和空闲用户 J 获取最优单位功率价格,A 得到最优功率分配值。

2.3.2　斯塔克伯格博奕均衡的性质分析

定理 1　本文所提斯塔克伯格博弈模型至少存在

一个斯塔克伯格博弈均衡点。

证明 由斯塔克伯格博弈均衡定义可知,式(16)和式(20)所示为本文所提斯塔克伯格博弈模型的斯塔克伯格博弈均衡点,由此证明斯塔克伯格博弈均衡的存在性,定理 1 得证。

定义 2 更新函数 $F_i(\lambda_i)$ 是标准的,当 $\lambda_i(i=\mathrm{R},\mathrm{J})$,满足以下条件:

1) 正性,$F_i(\lambda_i)>0$;

2) 单调性,如果 $\lambda_{i,1}\geqslant\lambda_{i,2}$,总有 $F_{i,1}(\lambda_{i,1})\geqslant F_{i,2}(\lambda_{i,2})$ 或者 $F_{i,1}(\lambda_{i,1})\leqslant F_{i,2}(\lambda_{i,2})$;

3) 可扩展性,$\forall\eta>1,\eta F_i(\lambda_i)\geqslant F_i(\eta\lambda_i)$。

定理 2 如果更新函数 $F_i(\lambda_i)$ 是标准的,那么斯塔克伯格博弈均衡就是唯一的。

推论 本文场景下斯塔克伯格博弈的斯塔克伯格博弈均衡是唯一的。

证明 将式(16)代入式(19)中可证明正性和单调性成立,由于篇幅所限,此处不再赘述。对于可扩展性,由于 $\eta>1$,则

$$\frac{F_i(\eta\lambda_i)}{\eta F_i(\lambda_i)}=\frac{-\dfrac{P_i^*}{\partial P_i^*/\partial(\eta\lambda_i)}}{-\dfrac{\eta P_i^*}{\partial P_i^*/\partial\lambda_i}}=\frac{\partial P_i^*/\partial\lambda_i}{\eta\partial P_i^*/\partial(\eta\lambda_i)}\tag{21}$$

同样将式(16)代入式(21)可得 $\dfrac{F_i(\eta\lambda_i)}{\eta F_i(\lambda_i)}<1$,因此可扩展性成立。

根据定义 2 可知,更新函数 $F_i(\lambda_i)$ 是标准的,则斯塔克伯格博弈均衡是唯一的,推论得证。本文斯塔克伯格博弈均衡就是唯一的。

3 仿真分析

通过数值仿真分析所提功率分配机制的有效性。仿真假设和参数如下:假设合法用户发送功率 $P_{\mathrm{A}}=0.1$ W,中继节点最大功率值 $P=0.1$ W;各节点处噪声为服从(0,1)的高斯白噪声;R 放大倍数 $\beta=10$;安全容量收益因子 $\omega=100$;J 单位功率协作成本 $c_{\mathrm{J}}=10$,R 单位功率协作成本 $c_{\mathrm{R}}=10$;循环起始定价 $\lambda_{\mathrm{J}}=1,\lambda_{\mathrm{R}}=1$;信道增益服从瑞利分布,且 $h_{\mathrm{AR}}\sim\mathrm{CN}(0,1)$,$h_{\mathrm{RB}}\sim\mathrm{CN}(0,0.5)$,$h_{\mathrm{JR}}\sim\mathrm{CN}(0,2)$。

图 2 所示为在本文所提联合功率分配方案下进行迭代时的用户效益,其中,U_{A} 为发送用户效益值,U_{R} 为窃听中继效益值,U_{J} 为空闲用户效益值。从图 2 中可以看到:1) 该功率分配机制迭代一定次数后,网络中所有节点的效益将收敛于一个定值,该值为各节点效益最优值,对应功率和单价的斯塔克伯格博弈的均衡点;2) 在前几次迭代时,U_{J} 和 U_{R} 的效益值小于 0,是由于迭代定义的单位功率成本高于出售单价;3) U_{R} 一直处于较低水平,保证了安全性能,同时对于 U_{R} 来说,协作 A 的发送为其带来一定的收益,以此促进其参与协作。

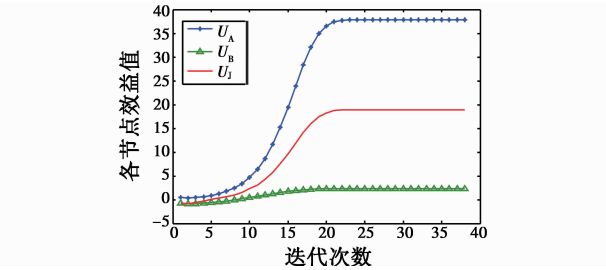

图 2 网络中各节点效益值

Fig. 2 The benefits of each node in the network

图 3 所示为本文所提联合功率优化方案为用户带来的安全容量与协作节点全功率发送时用户的安全容量进行对比。

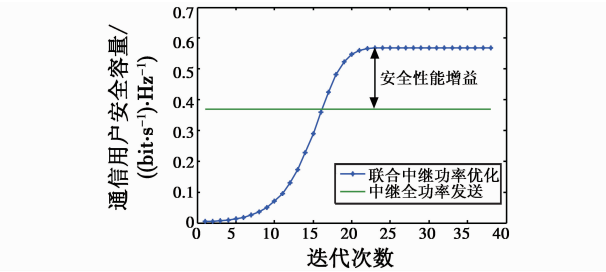

图 3 本文功率优化方案与全功率发送方案对比

Fig. 3 Comparison of power optimization scheme with full-power transmission scheme

从图 3 中可以看到,联合功率分配方案经过迭代达到均衡之后安全容量比全功率发送时提高了 0.2 (bit·s^{-1})·Hz^{-1},证明了本文所提算法可以有效提高用户安全性能,同时使用更少的功率。在本文所提方案下,中继可以为更多的用户提供功率进行协作,大大提高了功率利用率。

4 结束语

网络中部署的中继节点独立存在,可靠性难以保证,很容易被窃听者收买而窃取用户信息,协作干扰能够抑制中继的窃听。在多用户网络中存在大量空闲用户,其闲置的网络资源可以为通信用户协作干扰,保证其通信安全,提高网络资源利用率。由于获取协作功率需要发送方支付一定报酬,因此建立斯塔克伯格博弈模型,定义合法发送方为买方,空闲用户和窃听中继为卖方,有效刻画安全性能与节点效益的折中。在此模型下计算各自收益函数,然后得到功率和单位功率价格的迭代函数,通过循环迭代得到功率分配和单位功率价格的最优解,即斯塔克伯格博弈的均衡解,此时网络中每个节点效益都是最优。最后,通过仿真表明,本文所提联合功率分配方案会在数次迭代后收敛,收

敛到所有节点收益最大值,同时也是发送方通信安全容量的最大值,比中继全功率发送时提高了 0.2 (bit · s^{-1}) · Hz^{-1},增强用户安全性能。

参 考 文 献

[1] HOU W K, WANG X B, REFAEY A. Misbehavior detection in amplify-and-forward cooperative OFDM systems [C]//IEEE International Conference on Communications (ICC), 2013:5345-5349.

[2] CHEN M H, LIN S C, HONG Y W P, et al. On cooperative and malicious behaviors in multi-relay fading channels[J]. IEEE Transactions on Information Forensics & Security, 2013, 8(7):1126-1139.

[3] JARROLD S L, MOORE D, POTTER U. Intrusion detection system to detect malicious misbehavior nodes in MANET [C]//International Conference on Acoustics, Speech, & Signal Processing, ICASSP, 1996:6-7.

[4] WANG X J, ZHANG H, DUONG T Q, et al. Secure cooperative communication with *N*th best relay selection[C]// IEEE 79th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2014:23-27.

[5] CHANGIZ R, HALABIAN H, YU F R, et al. Trust management in wireless mobile networks with cooperative communications [C]//IEEE/IFIP International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing , IEEE Computer Society, 2010:498-503.

[6] ABDELAZIZ K C, LAGRAA N, LAKAS A. Trust model with delayed verification for message relay in VANETs [C]//IEEE Wireless Communications and Mobile Computing Conference, 2014:700-705.

[7] ZHANG R Q, SONG L Y, ZHU H, et al. Physical layer security for two-way untrusted relaying with friendly jammers[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(8):3693-3704.

[8] HYNEK T, SYKORA J. Wireless physical layer network coding in potential presence of malicious relays-incomplete information game approach[J]. Electronics Letters, 2015, 51(16):1292-1294.

[9] WANG L F, ELKASHLAN M, HUANG J, et al. Secure transmission with optimal power allocation in untrusted relay networks[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2014, 3(3):289-292.

[10] JEON H, MCLAUGHLIN S W, KIM I M, et al. Secure communications with untrusted secondary nodes in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2014, 13(4):1790-1805.

[11] ABRAMSON G, KUPERMAN M. Social games in a social network[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2000, 63(3):339-347.

[12] 王安. 协同无线网络物理层安全中的博弈资源管理研究[D]. 南京:解放军理工大学,2013.

(上接第 36 页)

4　总结

本文针对基于阵列结构的含噪盲源分离模型雷达信号分选问题,建立了基于均匀线阵的含噪模型,提出了 SURE-DSS 算法。该算法采用基于 Stein 无偏风险估计的奇异值阈值方法,在 Stein 无偏风险估计的原则下选择最优的阈值,对数据的奇异值进行紧缩,达到了去噪的效果,提高了观测数据的信噪比,然后根据预白化结果可以选择不同的去噪函数,完成信号的盲分离。仿真结果表明,该算法可以对基于含噪阵列结构的雷达信号进行盲分离。

参 考 文 献

[1] 肖文书,张兴敢,都思丹. 雷达信号的盲分离[J]. 南京大学学报:自然科学版,2006,42(1):39-43.

[2] 蒋海荣,张玉,冉金和. 一种基于盲源分离的 MIMO 雷达侦察识别方法[J]. 电光与控制,2013,20(12):46-50.

[3] 吴微,彭华,周正康. 一种改进的 FastICA 算法及其在含噪盲源分离中的应用[J]. 信息工程大学学报,2013,14(6):708-712.

[4] 孟宗,马钊,刘东,等. 基于小波半软阈值消噪的盲源分离方法[J]. 中国机械工程,2016,27(3):337-342.

[5] 赵知劲,李淼,尚俊娜. 基于矩阵填充和三阶相关的长短码 DS-CDMA 信号多伪码盲估计[J]. 电子与信息学报,2016,38(7):1788-1793.

[6] CANDES E J, SING-LONG C A, TRZASKO J D. Unbiased risk estimates for singular value thresholding and spectral estimators[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(19):4643-4657.

[7] SÄRELÄ J, VALPOLA H. Denoising source separation [J]. Journal of Machine Learning Research, 2005(6): 233-272.

[8] 王益艳. 基于特征均值的 SVD 信号去噪算法[J]. 计算机应用与软件,2012,29(5):121-123.

[9] AMARI S, CICHOCKI A, YANG H H. A new learning algorithm for blind signal separation[C]//Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS), Colorado, 1995:757-763.

[10] HYARINEN A, OJA E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1997, 9(7):1483-1492.