# 基于时频资源分配的认知无线中继网络物理层安全研究

高锐锋[1,2] 倪丹艳[2] 包志华[2] 胡英东[2]
(南通大学交通学院 南通 226001)[1] (南通大学电子信息学院 南通 226001)[2]

**摘 要** 提出了一种在认知无线中继网络物理层安全意义下的最优时频资源分配方案。在该方案中,主用户通过次用户的协作进行通信;作为回馈,允许次用户接入该频段传输信息。在次用户网络中,选择两个最优次用户,一个用作协作转发,一个用作协作干扰,同时在保证次用户网络传输速率的条件下,通过寻求系统的最优带宽分配因子、时隙分配因子以及次用户的协作功率,来最大化主用户的安全容量。仿真结果表明,提出的方案切实可行,能够显著提高主用户的安全容量。

**关键词** 认知无线中继网络,物理层安全,时隙分配,带宽分配
**中图法分类号** TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2016.4.033

## Time-bandwidth Allocation Scheme for Physical Layer Security in Cooperative Cognitive Radio Networks

GAO Rui-feng[1,2] NI Dan-yan[2] BAO Zhi-hua[2] HU Ying-dong[2]
(School of Transportation, Nantong University, Nantong 226001, China)[1]
(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226001, China)[2]

**Abstract** Cognitive radio (CR) technology is one of the strong candidate technologies to solve the spectrum scarcity problems. We proposed a time-bandwidth allocation scheme for physical layer security in cognitive radio networks, in which the primary users (PUs) communicate with the help of the secondary users (SUs). As feedback, PUs share the bandwidth with SUs for the communication of the secondary network. Particularly, we selected two SUs, a relay SU and a jammer SU, to maximize the physical secrecy capacity of the PUs on the premise of meeting the lowest transmission rate requirement of the SUs. The optimal bandwidth allocation factor, time allocation factor and the cooperative power allocation of the SUs were given in this paper. Numerical results show that the proposed scheme can improve the secrecy capacity of the PUs significantly.

**Keywords** Cooperative cognitive radio networks, Physical security, Time allocation, Bandwidth allocation

## 1 引言

随着无线通信技术的飞速发展,频谱资源变得越来越紧张。当前频谱资源采用固定分配方式,由政府指定或者拍卖划分,缺乏灵活性,存在着频谱资源利用率较低的缺点。针对这一问题,认知无线电作为一种新兴的技术,在不影响授权用户(主用户)通信的基础上,未授权用户(次用户)可以按照某种方式动态接入已授权频段,从而有效缓解了频谱资源短缺与不断增长的无线接入需求之间的矛盾[1,2]。

无线信道的广播特性给无线通信带来了诸多安全问题。传统的解决方法是通过密钥加密方式来确保信息安全传输,如RSA等。尽管密钥加密方法能够提高通信的安全性能[3],但是它是建立在一定的计算复杂度基础上的,而且这种方式并不能保证通信的绝对安全。同时随着量子计算机的发展以及计算能力的不断提高,破解传统的密钥加密方式所需要的时间越来越短[4]。与传统加密方式不同,物理层安全是利用无线信道的物理特性保证通信安全的一种方式,它基于香农有关绝对安全的概念[5]。Wyner从信息论的角度出发,引入窃听信道模型,从而得出信道的安全容量。Wyner证明源节点和目标节点的信道增益比源节点到窃听节点的信道增益好时,信息能以非零速度传输,此时窃听节点将不能窃听到任何信息[6]。但是,当源节点与目标节点之间的信道增益比源节点与窃听节点之间的信道增益差时,信号将存在被窃听的风险,不能实现安全传输。为解决上述问题,通过运用多节点之间的协作技术可以提高系统的物理层安全性能[7]。文献[8]通过系统的带宽分配和功率分配使得在DF和AF两种协议下均能够获得更加可靠的保密容量。文献[9]分析了中继干扰和波束成形两种机制下的最优功率分配问题。文献[10]分析了人工噪声、波束成形等技术对无线通信物理层安全的影响。文献[11]提出了一种协作接入固定频谱的模型,主用户和次用户之间通过回馈的方式进行带宽的分配,提高了系统的保密容量。

上述工作假设从源节点到中继和中继到目的节点所消耗的时隙都是相等的,但在实际情况中并不能保证系统能够达

到稿日期:2015-02-08 返修日期:2015-06-09 本文受国家自然科学基金项目(61371111,61371112)资助。
高锐锋(1987—),男,博士生,主要研究方向为认知无线网络通信安全;倪丹艳(1990—),女,硕士生,主要研究方向为认知无线网络;包志华(1955—),男,硕士,教授,主要研究方向为无线通信网络及宽带无线通信系统。

到最大安全容量，同时未见综合考虑认知无线网络中带宽分配以及时隙分配的研究。本文在文献[8-11]的基础上，提出了一种在 Underlay 认知无线网络中既考虑带宽又考虑时隙资源分配的协作策略：主用户网络选择一个协作转发次用户和一个协作干扰次用户来提高主用户链路通信的安全性能；作为回报，主用户将所用的部分带宽分给次用户，使其接入该频谱进行信息传输；在保证满足次用户最低传输速率要求的条件下，通过最优化系统带宽分配因子、时隙分配因子以及次用户的协作功率，来最大化主用户的安全容量。

## 2 系统模型

如图 1 所示，系统由一个主用户源节点 $PS$、一个主用户目的节点 $PD$、一个窃听节点 $E$ 和一组可供选择的次用户节点 $SUs$ 组成，在整个通信周期内，假设各个节点处于静止状态。在协作过程中，选择两个最优次用户参与协作，假设次用户 $R$ 和 $J$ 是被选择到参与协作的节点。如图 2 所示，整个认知无线电网络中，$PS$ 和 $PD$ 在 $t+T$ 时隙之间进行通信。在时隙 $t$ 内，主用户 $PS$ 首先广播请求，在其周围的 $SUs$ 接收到 $PS$ 的请求后，运用正交频分信道将它们接收到的信道状态信息(Channel State Information，CSI)以单播的形式返回给 $PS$，$PS$ 从中选择出最佳协作转发节点 $R$ 以及协作干扰节点 $J$ 参与协作通信。在时隙 $T$ 内，分为两个子时隙：在时隙 $(1-\beta)T$ 内，主用户节点 $PS$ 通过组播方式将传输的信息发送给协作节点 $R$、$J$ 以及目标节点 $PD$；节点 $R$ 在剩下的时隙 $\beta T$ 内以解码转发(DF)的方式[12]将解码的信息单播转发给目标节点 $PD$，同时协作干扰节点 $J$ 随机发送干扰信息，此时目的节点 $PD$ 和窃听节点 $E$ 都会同时接收到 $R$ 和 $J$ 发送的信息。作为回报，主用户网络将剩下的 $(1-\alpha)w$ 带宽用于次用户网络的信息传输。

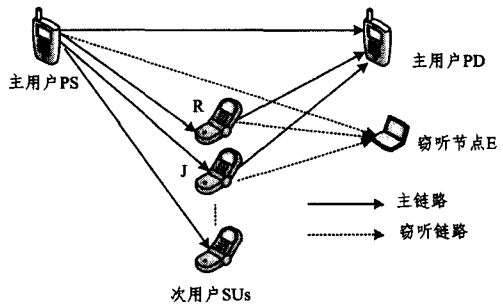


图 1 系统模型

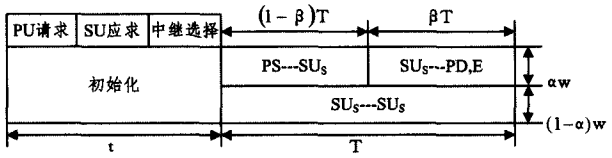


图 2 协作框图

## 3 系统安全通信分析

### 3.1 PU 用户的安全容量

安全容量是衡量物理层安全通信的一个重要指标。在信息论中，安全容量定义为存在窃听者的情况下，源节点到目标节点的信道容量与源节点到窃听节点信道容量的差值。假设次用户 $R$ 和 $J$ 是被选择到参与协作的节点。

在时隙 $(1-\beta)T$ 内，$R$ 处接收 $PS$ 发送信息的最大可达速率为：

$$R_{RC}=\alpha w\log_2\left(1+\frac{P|h_{SR}|^2}{\alpha wN_0}\right) \tag{1}$$

式中，$\alpha$ 为带宽分配因子，$w$ 为带宽，$P$ 为主用户的传输功率，$h_{SR}$ 为源节点 $PS$ 到中继节点 $R$ 的信道增益，$N_0$ 为高斯白噪声的功率。

在时隙 $T$ 中，$PD$ 会接收到来自转发节点的转发信息、干扰节点的干扰信息以及来自源节点直接发送的信息。采用最大比融合(MRC)准则[13]，则 $PD$ 处的最大可达速率为：

$$R_D=\alpha w\log_2\left(1+\frac{P|h_{SD}|^2}{\alpha wN_0}+\frac{P_{RC}|h_{RD}|^2}{\alpha wN_0+P_{JC}|h_{JD}|^2}\right) \tag{2}$$

其中，$P_{RC}$ 为转发节点 $R$ 用于转发时的功率；$P_{JC}$ 为干扰节点 $J$ 用于协作干扰时的功率；$h_{SD}$、$h_{RD}$、$h_{JD}$ 分别为源节点 $PS$ 到目的节点 $PD$、转发节点 $R$ 到目的节点 $PD$、干扰节点 $J$ 到目的节点 $PD$ 的信道增益。

同理，窃听节点 $E$ 处的最大可达速率为：

$$R_E=\alpha w\log_2\left(1+\frac{P|h_{SE}|^2}{\alpha wN_0}+\frac{P_{RC}|h_{RE}|^2}{\alpha wN_0+P_{JC}|h_{JE}|^2}\right) \tag{3}$$

式中，$h_{RE}$ 和 $h_{JE}$ 分别为转发节点 $R$ 到窃听节点 $E$ 以及干扰节点 $J$ 到窃听节点 $E$ 的信道增益。

在协作通信的过程中，转发节点 $R$ 采用 DF 协议转发源节点 $PS$ 发送的信息，在 $PD$ 和 $E$ 两处的通信速率等效于在两个时隙中的最小值，即：

$$\bar{R}_D=\min\{(1-\beta)R_{RC},\beta R_D\} \tag{4}$$

$$\bar{R}_E=\min\{(1-\beta)R_{RC},\beta R_E\} \tag{5}$$

根据物理层安全容量的定义及式(4)和式(5)，主用户的安全容量为：

$$\begin{aligned}\bar{R}_{sec}&=[\bar{R}_D-\bar{R}_E]^+\\&=[\min\{(1-\beta)R_{RC},\beta R_D\}-\beta R_E]^+\end{aligned} \tag{6}$$

其中 $[x]^+$ 表示 $x$ 和 0 之间的最大值。

### 3.2 SU 次用户网络的信道容量

在次用户网络中，只有当满足最小的传输速率 $R_{\min}$ 时，SU 用户才参与 PU 用户的协作。假设 $P_{RS}$ 和 $P_{JS}$ 分别代表转发节点 $R$ 和干扰节点 $J$ 在 $(1-\alpha)w$ 频段中用于次用户网络自身进行数据传输的功率。同时，SU 用户满足功率限制：

$$P_{RS}+P_{RC}\leqslant P_{\max},P_{JS}+P_{JC}\leqslant P_{\max}$$

在节点 $R$ 和节点 $J$ 处的传输速率分别为：

$$\begin{aligned}R_{RS}&=(1-\alpha)w\log_2\left(1+\frac{P_{RS}|h_{RS}|^2}{(1-\alpha)wN_0}\right)\\R_{JS}&=(1-\alpha)w\log_2\left(1+\frac{P_{JS}|h_{JS}|^2}{(1-\alpha)wN_0}\right)\end{aligned} \tag{7}$$

其中，$h_{RS}$ 和 $h_{JS}$ 分别代表 $R$ 和 $J$ 与各自目标节点间的信道增益。

### 3.3 最大化安全容量

当被选中的两个次用户满足其各个传输的 $R_{\min}$ 时，通过选择合适的参数最优化主用户网络的安全容量。根据上述可归结为：

$$\max \bar{R}_{sec}(\alpha,\beta,P_{RC},P_{JC})$$
$$\text{subject to: } 0<\alpha<1$$
$$0<\beta<1$$
$$P_{RS}+P_{RC}\leqslant P_{\max} \tag{8}$$
$$P_{JS}+P_{JC}\leqslant P_{\max}$$
$$R_{RS}\geqslant R_{\min}$$
$$R_{JS}\geqslant R_{\min}$$

## 4 参数选择

根据式(8),解决上述问题的关键就是最优化协作过程中带宽分配因子 $\alpha$、时间分配因子 $\beta$、中继转发节点的转发功率 $P_{RC}$ 和干扰节点的干扰功率 $P_{JC}$。为了方便分析,将整个过程分成两部分:1)固定带宽因子 $\alpha$,选择协作过程中的最优时间分配因子 $\beta$ 和功率分配;2)使用步骤 1)中的结果,选择最优的带宽因子 $\alpha$,使得主用户的安全容量最大化。

### 4.1 时隙分配

根据式(6),分情况进行讨论:

(1)当 $(1-\beta)R_{RC}>\beta R_D$ 时,$\beta\leqslant\frac{R_{RC}}{R_{RC}+R_D}$,此时 $\bar{R}_{sec}=[\beta(R_D-R_E)]^+$,安全容量 $\bar{R}_{sec}$ 是关于 $\beta$ 的单调增函数,所以在 $\beta$ 取得最大值时,系统的安全容量 $\bar{R}_{sec}$ 达到最大,即:

$$\bar{R}_{sec}=[\frac{R_{RC}(R_D-R_E)}{R_{RC}+R_D}]^+ \tag{9}$$

(2)当 $(1-\beta)R_{RC}<\beta R_D$ 时,$\beta\geqslant\frac{R_{RC}}{R_{RC}+R_D}$,此时 $\bar{R}_{sec}=[(1-\beta)R_{RC}-\beta R_E]^+=[R_{RC}-\beta(R_{RC}+R_E)]^+$,安全容量 $\bar{R}_{sec}$ 是关于 $\beta$ 的单调递减函数,所以在 $\beta$ 取得最小值时安全容量最大,即:

$$\bar{R}_{sec}=[R_{RC}-\frac{R_{RC}(R_{RC}+R_E)}{R_{RC}+R_D}]^+ \tag{10}$$

综上所述,最优时间分配因子为:

$$\beta^*=\frac{R_{RC}}{R_{RC}+R_D} \tag{11}$$

### 4.2 传输功率分配

转发节点 $R$ 的作用是增大传输速率,假设选择的节点 $R$ 满足 $|h_{RD}|>|h_{RE}|$。而用户 $J$ 用于增加 $E$ 处的干扰,假设选择的节点 $J$ 满足 $|h_{JE}|>|h_{JD}|$。针对一个给定的带宽因子 $\alpha$,为了满足系统最小的传输速率 $R_{\min}$,用户 $R$ 和 $J$ 必须选择合适的传输功率。为了简化,假设 $h_{RS}$ 和 $h_{JS}$ 相等,记为 $h$,由式(7)可得出用户 $R$ 和 $J$ 用于次用户网络数据传输的最小功率为:

$$P_S=P_{RS}=P_{JS}$$
$$=\frac{(1-\alpha)w\cdot N_0}{|h|^2}\cdot(2^{\frac{R_{\min}}{(1-\alpha)w}}-1) \tag{12}$$

假设每个节点总发射功率固定为 $P_{\max}$,则剩下的 $P_{\max}-P_s$(记为 $P_{\max}^C$)则作为次用户参与协作的最大发射功率。当带宽分配因子 $\alpha$ 给定时,同时已知节点的传输总功率为 $P_{\max}$,则可通过式(1)确定转发节点的转发传输速率 $R_{RC}$,此时式(10)可以等效为:

$$f(P_{RC},P_{JC})=\frac{R_{RC}+R_E}{R_{RC}+R_D} \tag{13}$$

即最大化主用户安全容量等效为最小化式(13)。当 $snr\gg1$ 时,$\log_2(1+snr)\approx snr$,将式(1)—式(3)代入式(13)可得:

$$f(P_{RC},P_{JC})=\frac{\Phi_E+\frac{P_{RC}|h_{JE}|^2}{\alpha wN_0+P_{JC}|h_{JE}|^2}}{\Phi_D+\frac{P_{RC}|h_{RD}|^2}{\alpha wN_0+P_{JC}|h_{JD}|^2}} \tag{14}$$

其中,$\Phi_E=\frac{P|h_{SR}|^2}{\alpha wN_0}+\frac{P|h_{SE}|^2}{\alpha wN_0}$,$\Phi_D=\frac{P|h_{SR}|^2}{\alpha wN_0}+\frac{P|h_{SD}|^2}{\alpha wN_0}$。

(1)协作转发节点 $R$:当带宽分配因子 $\alpha$ 给定时,$R$ 满足 $|h_{RD}|>|h_{RE}|$,根据式(14)可得 $P_{RC}$ 是关于 $f(P_{RC},P_{JC})$ 的单调递增函数。对于给定的带宽因子 $\alpha$,满足最大安全容量的最优协作功率 $P_{RC}^*$ 即为最大的协作功率 $P_{\max}^C$,所以最优协作功率 $P_{RC}^*$ 为:

$$P_{RC}^*=P_{\max}-\frac{(1-\alpha)\cdot N_0}{|h|^2}(2^{\frac{R_{\min}}{(1-\alpha)w}}-1) \tag{15}$$

(2)协作干扰节点 $J$:选择式(14)中的 $f(P_{RC},P_{JC})$ 作为目标函数 $f$,对目标函数求导,可得:

$$\frac{\partial f}{\partial P_{JC}}\propto\varphi_1\cdot P_{JC}^2+\varphi_2\cdot P_{JC}+\varphi_3 \tag{16}$$

其中:

$$\varphi_1=|h_{JE}|^2|h_{JD}|^2P_{RC}(|h_{RD}|^2\Phi_E|h_{JE}|^2-|h_{RE}|^2\Phi_D\cdot|h_{JD}|^2)$$
$$\varphi_2=2|h_{JD}|^2|h_{JE}|^2\alpha wN_0P_{RC}(|h_{RD}|^2\Phi_E-|h_{RE}|^2\Phi_D)$$
$$\varphi_3=P_{RC}\alpha^2w^2N_0^2(|h_{JD}|^2|h_{RD}|^2\Phi_E-|h_{JE}|^2|h_{RE}|^2\Phi_D)+P_{RC}^2\alpha wN_0|h_{RD}|^2|h_{RE}|^2(|h_{JD}|^2-|h_{JE}|^2)$$

根据 $|h_{RD}|>|h_{RE}|$ 且 $|h_{JE}|>|h_{JD}|$,可得 $\varphi_1>0$,$\varphi_2>0$,方程 $\varphi_1\cdot P_{JC}^2+\varphi_2\cdot P_{JC}+\varphi_3=0$ 的根就是偏导数 $\frac{\partial f}{\partial P_{JC}}$ 的极值点。当 $\varphi_3>0$ 时,方程无实根,偏导数的值恒大 0,函数 $f$ 单调递增,$P_{JC}^*$ 的取值为 0;当 $\varphi_3<0$ 时,根据求根公式方程,有一个实根 $P_{JC}=\frac{-\varphi_2+\sqrt{\varphi_2^2-4\varphi_1\varphi_3}}{2\varphi_1}$,若该实根的值大于 $P_{\max}^C$,$\frac{\partial f}{\partial P_{JC}}<0$,所以 $f$ 关于 $P_{JC}$ 单调递减,$P_{JC}^*=P_{\max}^C$;否则 $P_{JC}^*=\frac{-\varphi_2+\sqrt{\varphi_2^2-4\varphi_1\varphi_3}}{2\varphi_1}$。

### 4.3 带宽分配

根据最优的协作功率 $P_{RC}^*$ 和 $P_{JC}^*$,最优带宽因子 $\alpha^*$ 的取值如下:

$$\alpha^*=\arg\min f(P_{RC}^*,P_{JC}^*) \tag{17}$$

其中,$P_{RC}^*$ 和 $P_{JC}^*$ 都是与 $\alpha$ 有关的参数,代入式(14)中即可得到仅与 $\alpha$ 有关的函数表达式,通过选择最优 $\alpha^*$ 使得式(14)取最小值,即主用户安全容量最大。

## 5 数值分析

本文通过仿真来验证所提时频分配方案的安全性能。在仿真中,设定高斯白噪声的功率为 1mw,带宽 $W$ 为 1Hz,系统最大的传输功率为 2mw。图 3 是干扰节点 $J$ 的最优干扰功率 $P_{JC}$ 随着 $R$、$D$ 两节点间信道增益变化的曲线图,分别设 $|h_{RD}|^2$ 的值为 0.7、0.8、0.9。

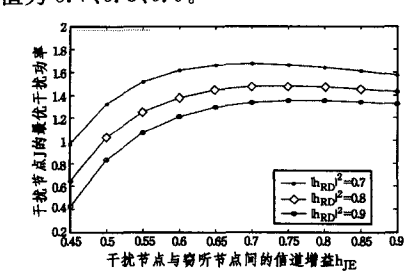


图 3 不同 $h_{RD}$ 下的最优协作干扰功率 $P_{JC}$

从图 3 可以看出，随着 $|h_{JE}|^2$ 的增大，协作干扰的最优功率 $P_{JC}$ 也同时增大。此外，随着 $|h_{RD}|^2$ 的增大，协作干扰的功率 $P_{JC}$ 减小。由于 $|h_{JE}|^2$ 越大或 $|h_{RD}|^2$ 越小代表干扰节点和窃听节点之间的信道状态与干扰节点与目的节点间的信道状态的比值越高，干扰信号可通过占用更多的功率来干扰窃听节点，从而增大主用户链路的保密容量。

图 4 描述了在不同次用户网络信道增益 $|h|^2$ 下，主用户安全容量 $R_{sec}$ 随带宽因子 $\alpha$ 的变化。仿真过程中，设置 *SUs* 的最小传输速率 $R_{\min}$ 为 0.36bit/s/Hz。从图中可看出，一开始 $R_{sec}$ 的值随着 $\alpha$ 的增大而增大，当 $R_{sec}$ 增到到一定程度时，$R_{sec}$ 的值随着 $\alpha$ 的增大而减小。达到最大安全速率 $R_{sec}$ 时的最优 $\alpha$ 分别为 0.4、0.6 和 0.8。同时还可以看出，最优 $\alpha$ 和主用户保密容量 $R_{sec}$ 随着 $|h|^2$ 的上升而增加。这是由于当次用户网络的信道条件较好时，所需分配的带宽减少，意味着有更多的带宽用于主用户网络通信以及次用户协作，主用户安全容量随之增加。

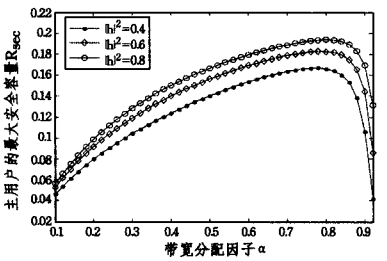


图 4　不同次用户网络信道增益下的主用户安全容量 $R_{sec}$

图 5 描述了在 *SUs* 的最小传输速率分别为 0.25、0.3 和 0.4bit/s/Hz 的情况下，主用户安全容量 $R_{sec}$ 随带宽因子 $\alpha$ 的变化情况。当 $R_{sec}$ 达到最大值时，$\alpha$ 值即为最优。从图中可以看出，最优 $\alpha$ 和主用户保密容量 $R_{sec}$ 随着 $R_{\min}$ 取值变小而增加。这是由于较小的 $R_{\min}$ 导致系统分配给次用户网络通信的带宽变小，意味着有更多的带宽用于主用户网络通信，中继 $R$ 协作干扰的功率增大，主用户安全容量随之增加。

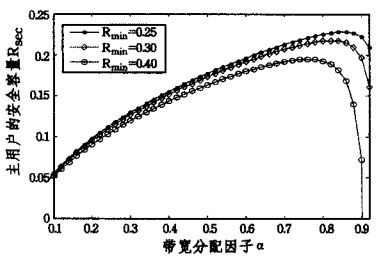


图 5　不同 $R_{\min}$ 下的主用户安全容量 $R_{sec}$

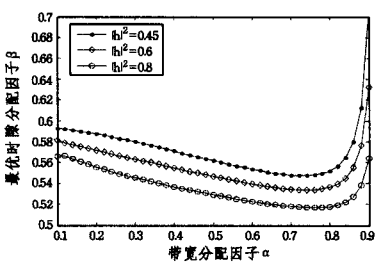


图 6　不同带宽因子 $\alpha$ 下的最优时间 $\beta$

图 6 给出了不同带宽分配因子 $\alpha$ 下的最优 $\beta$。从图中可以看出，在给定 $\alpha$ 值时，最优时隙分配因子 $\beta$ 会随着次用户网络信道状态的变好而减小，这是由于当次用户网络信道状态较好时，用于协作转发的功率 $P_{RC}$ 会增加，结合式(2)和式(11)，此时最优时隙分配因子 $\beta$ 变小。

图 7 给出了在 4 种协作模型下主用户安全容量的对比。其中 CC 代表传统的协作模型，即不考虑窃听信道的情况下，选择到目标节点信道状态最好的节点作为转发节点；CNJ 表示在协作过程中不使用干扰用户 $J$；PPS 为文献中所提出的方案，即只考虑带宽分配[8]；PS 是本文提出的方案。从图中可以看出，相比其他 3 种方案，本文所提的时频分配方案获得了最大主用户的安全容量。

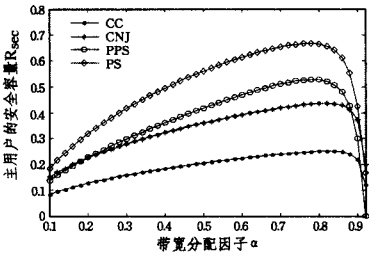


图 7　不同协作模型下的最优 $R_{sec}$

**结束语**　本文提出了一种基于两个次用户(SU)相互协作来提高主用安全容量的时频分配方案，两个次用户分别进行协作转发和协作干扰，在满足次用户网络最低安全传输速率需求的条件下，通过本文给出的方法选择出最优的带宽分配因子 $\alpha$、时隙分配因子 $\beta$、协作转发节点 $R$ 和协作干扰节点 $J$ 在协作过程中的功率，从而最大化安全容量。仿真结果表明，本文所提方案能使主用户链路获得最大的安全容量。

## 参 考 文 献


[1] Wei Ji-bo, Wang Shan, Zhao Hai-tao. Cognitive wireless networks: key techniques and sate of the art [J]. Journal on Communications, 2011(11): 147-158(in Chinese)
魏急波，王杉，赵海涛. 认知无线网络：关键技术与研究现状[J]. 通信学报，2011(11)：147-158

[2] Zhou Xian-wei, Meng Tan, Wang Li-na, et al. Summary of the Research on Cognitive Radio[J]. Telecommunication Engineering, 2006(6): 1-6(in Chinese)
周贤伟，孟潭，王丽娜，等. 认知无线电研究综述[J]. 电讯技术，2006(6)：1-6

[3] Kartalopoulos S V. A primer on cryptography in communications[J]. Communications Magazine, IEEE, 2006, 44(4): 146-51

[4] Zhou Jian, Zhou Xian-wei, Sun Li-yan. Key exchange protocols of cognitive radio based on self certified[J]. Computer Science, 2010, 37(6): 94-96(in Chinese)
周健，周贤伟，孙丽艳. 基于自认证的认知无线电密钥交换协议研究[J]. 计算机科学，2010，37(6)：94-96

[5] Shannon C E. Communication theory of secrecy systems[J]. Bell System Technical Journal, 1949, 28(4): 656-715

[6] Wyner A D. The wire-tap channel [J]. Bell System Technical Journal, 1975, 54(8): 1355-1387

[7] Lun D, Zhu H, Petropulu A P, et al. Improving Wireless Physical Layer Security via Cooperating Relays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3): 1875-1888


(下转第 187 页)

## 参 考 文 献


[1] Agrawal R, Aliamaki A, Bernstein P A, et al. The Claremont Report on Database Research, 2008 [C/OL]. http://db. cs. berkeley. edu/claremont

[2] Bhalotia G, Hulgeri A, Nakhe C, et al. Keyword Searching and Browsing in Databases Using BANKS[C]// Proc. of the 18th Int'l Conf. on Data Engineering, 2002(ICDE 2002). San Jose: IEEE Computer Society Press, 2002: 431-440

[3] Agrawal S, Chaudhuri S, Das G. DBXplorer: A System for Keyword-based Search over Relational Databases[C]// Proc. of the 18th Int'l Conf. on Data Engineering, 2002(ICDE 2002). San Jose: IEEE Computer Society Press, 2002: 5-16

[4] Hristidis V, Papakonstantinou Y. DISCOVER: Keyword Search in Relational Databases[C]// Proc. of the 28th Int'l Conf. on Very Large Data Bases, 2002(VLDB 2002). Hong Kong: Morgan Kaufmann Publishers, 2002: 670-681

[5] Hristidis V, Papakonstantinou Y. Efficient IR-style Keyword Search over Relational Databases[C]// Proc. of the 29th Int'l Conf. on Very Large Data Bases, 2003(VLDB 2003). Berlin: Morgan Kaufmann Publishers, 2003: 850-861

[6] Kacholia V, Pandit S, Chakrabarti S, et al. Bidirectional Expansion for Keyword Search on Graph Databases[C]// Proc. of the 31st Int'l Conf. on Very Large Data Bases, 2005(VLDB 2005). Trondheim: ACM Press, 2005: 505-516

[7] He Hao, Wang Hai-xun, Yang Jun, et al. Binks: Ranked Keyword Searches on Graphs[C]// Proc. of the 2007 ACM SIGMOD Conf. on Management of Data, 2007(SIGMOD 2007). Beijing: ACM, 2007: 305-316

[8] Li Guo-liang, Ooi B C, Feng Jian-hua, et al. EASE: An Effective 3-in-1 Keyword Search Method for Unstructured, Semi-structured and Structured Data[C]// Proc. of the 2008 ACM SIGMOD Conf. on Management of Data, 2008(SIGMOD 2008). Vancouver: ACM, 2008: 903-914

[9] Luo Yi, Lin Xue-min, Wang Wei, et al. Spark: Top-k Keyword Query in Relational Databases[C]// Proc. of the 2007 ACM SIGMOD Conf. on Management of Data, 2007(SIGMOD 2007). Beijing: A. CM, 2007: 115-126

[10] Ding B, Yu J X, Wang S, et al. Finding Top-k Min-cost Connected Trees in Databases[C]// Proc. of the 23rd Int'l Conf. on Data Engineering, 2007(ICDE 2007). Istanbul: IEEE Computer Society Press, 2007: 836-845

[11] Su Q, Widom J. Indexing Relational Database Content Offline for Efficient Keyword-based Search[C]// Proc. of the 9th Int'l Data Engineering and Applications Symposium, 2005. Montreal: IEEE Computer Society Press, 2005: 297-306

[12] Zhan Jiang, Wang Shan. ITREKS: Keyword Search over Relational Database by Indexing Tuple Relationship[C]// Proc. of the 12th Int'l Conf. on Database Systems for Adavanced Applications, 2007. Bangkok: Springer-Verlag, 2007: 67-78

[13] Li Guo-liang, Feng Jian-hua, Zhou Li-zhu. Retune: Retrieving and Materializing Tuple Units for Effective Keyword Search over Relational Databases[C]// Proc. of the 27th Int'l Data on Conceptual Modeling, 2008. Barcelona: Springer-Verlag, 2008: 469-483

[14] Dixon P. Basics of Oracle Text Retrieval [J]. Bulletin of the Technical Committee on Data Engineering, 2001, 24(4): 11-14

[15] Maier A, Simmen D E. DB2 Optimization in Support of Full Text Search[J]. Bulletin of the Technical Committee on Data Engineering, 2001, 24(4): 3-6

[16] Hamilton JR, Nayak TK. Microsoft SQL Server Full-text Search [J]. Bulletin of the Technical Committee on Data Engineering, 2001, 24(4): 7-10

[17] Reich G, Widmayer P. Beyond Steiner's Problem: A VLSI Oriented Generalization[C]// Proc. of the 15th Int'l Workshop on Graph-Theoretic Concepts in Computer Science, 1989. Castle Rolduc: Springer-Verlag, 1989: 196-210

[18] Nie Z, Zhang Y, Wen J, et al. Object-Level Ranking: Bringing Order to Web Objects[C]// Proc. of the World Wide Web. 2005

[19] Zhang J, Shao R J, Zeng Y M. Research on Object-level Information Retrieval over Relational Databases [J]. Computer Science, 2012, 39(1): 142-147(in Chinese)
张俊, 邵仁俊, 曾一鸣. 对象级别的关系数据库信息检索技术研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(1): 142-147

[20] Owda M, Bandar Z, Crockett K. Conversation-Based Natural Language Interface to Relational Databases[C]// 2007 IEEE/WIC/ACM/ International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology Workshops. 2007: 363-367

[21] Li H, Tian J W, Wang Y Y, et al. Ontology-based Natural Language Interface to Relational Databases [J]. Computer Science, 2010, 37(6): 200-205(in Chinese)
李虎, 田金文, 王缓缓, 等. 基于 Ontology 的数据库自然语言查询接口的研究[J]. 计算机科学, 2010, 37(6): 200-205


---

(上接第 166 页)


[8] Maric I, Yates R D. Bandwidth and Power Allocation for Cooperative Strategies in Gaussian Relay Networks[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(4): 1880-1889

[9] Haohao Q, Xiang C, Yin S, et al. Optimal Power Allocation for Joint Beamforming and Artificial Noise Design in Secure Wireless Communications[C]// 2011 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). 2011: 5-9

[10] Zou Y, Zhu J, Wang X, et al. Improving physical-layer security in wireless communications using diversity techniques [J]. Network, IEEE, 2015, 29(1): 42-48

[11] Ning Z, Ning L, Nan C, et al. Towards secure communications in cooperative cognitive radio networks[C]// 2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). 2013: 12-14

[12] Jain A, Kulkarni S R, Verdu S. Energy Efficiency of Decode-and-Forward for Wideband Wireless Multicasting[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2011, 57(12): 7695-713

[13] Ning K, et al. Performance Comparison Among Conventional Selection Combining[C]// 2009 IEEE International Conference on Optimum Selection Combining and Maximal Ratio Combining (ICC'09). 2009: 14-18