

# 最优认知用户配对与协作感知算法研究

包志华, 张士兵, 张晓格, 邱恭安  
(南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019)

**摘要:** 针对协作算法频谱感知和时隙消耗方面的不足, 提出一种最优用户配对与协作感知算法。采用接收信噪比最优的认知用户为感知用户且以接收信噪比次优的认知用户为其中继的配对准则, 获得最佳频谱感知性能。通过优化设置协作门限, 选择性地采用非协作或协作模式, 获得更低的时隙消耗。同时, 推导了在瑞利平坦衰落环境下该算法的频谱检测概率下界与时隙消耗。数值计算结果表明, 与原有算法相比, 该算法不仅检测概率更高且时隙消耗更低。

**关键词:** 频谱感知; 协作分集; 检测概率; 时隙消耗

中图分类号: TN925

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)01-0128-08

## Research on cognitive user pairing and cooperative sensing

BAO Zhi-hua, ZHANG Shi-bing, ZHANG Xiao-ge, QIU Gong-an  
(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** Aim at the shortages of the cooperative algorithm in sensing and time slot spent, an optimal cognitive users pairing and cooperative sensing algorithm was proposed. To achieve the best sensing performance, the pairing criterion was adopted where the one with the best receive SNR was used for the sense user and the one with the second-best receive SNR was used for the relay. According to optimizing cooperation threshold, non-cooperative or cooperative mode was selected, which made time slot spent much lower but sensing ability slight decreasing. Meanwhile, a lower bound of the detection probability and the time slot spent were derived in Rayleigh flat fading channels. Numerical results show the proposed algorithm has higher detection probability and lower time slot spent than the existing one.

**Key words:** spectrum sensing; cooperative diversity; detection probability; time slot spending

### 1 引言

无线通信的迅猛发展使得授权用户的低频谱占用率与短缺的无线频谱资源之间的矛盾成为事实。非授权用户通过各种方法寻找频谱空洞并接入是利用闲置频谱资源的有效方法<sup>[1]</sup>, 但前提是非授权用户能够准确感知授权用户是否存在。可见, 频谱感知<sup>[2]</sup>是利用频谱空洞最为关键的技术之一。有

关频谱感知的研究可以分为 2 类: 本地感知和协作感知。本地感知方面以能量检测为代表, 因其实现简单且无需授权用户的先验知识而得到广泛使用。但单个节点的感知能力毕竟有限, 尤其是在低信噪比和深衰落环境中, 认知用户无法获得足够的授权用户信息。为此, 人们提出协作感知<sup>[3]</sup>, 利用认知用户间的相互协作, 使得单个认知用户可以从其他认知用户获得协助, 从而提高感知能力。文献[4,5]

收稿日期: 2011-07-30; 修回日期: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872002, 61071086); 南通市应用研究计划基金资助项目(BK2011064); 江苏省高校自然科学基金资助项目(11KJB510021, 11KJB510020)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China (60872002, 61071086); Nantong Applied Research Project(BK2011064); Collegiate Natural Science Fund of Jiangsu Province (11KJB510021, 11KJB510020)

提出基于放大转发的协作频谱感知模型，提高对授权用户的检测能力，并减少感知时间；文献[6]研究了基于放大转发和基于译码转发的两用户协作频谱感知方案。更多关于协作感知的研究可以参考综述文献[7,8]。

与本地感知相比，这些协作感知也存在明显不足。对于采用多个中继的感知系统，在中继过程中为避免互相干扰而采用正交信道(不同时隙或不同频段)，所以占用较多的资源。这一方面与认知无线电提高频谱效率的初衷相违背，另一方面也加重了系统负荷。因此，如何在保证感知效果的前提下有效降低中继用户数量值得研究。为此，文献[9,10]提出了基于最佳中继选择的多用户协作频谱感知方案，在若干中继用户中选择最佳者与感知用户配对，两者协作感知授权用户是否存在。这种安排一方面不至于大幅度降低感知能力，另一方面可减少资源消耗，从而在感知能力与资源消耗之间取得较好的平衡。

不过在文献[9,10]的方案中，感知用户是预先确定的，即为欲接入频谱空洞的非授权用户，其他认知用户只能作为它的中继与其配对并协作感知。这样一种安排会浪费分集资源，尤其是感知用户不能在所有时隙都分享多用户分集资源。事实上，其他认知用户也可以与欲接入频谱空洞的非授权用户一样担当感知任务，同时，欲接入频谱空洞的非授权用户与其他认知用户一样也可以担当中继的角色。这样一种安排不仅大大增加了感知用户的选择自由度，并且也一定程度上增加了中继用户的选择自由度，从而有效提高所有时隙的感知能力。同时，因为文献[9]中算法的一个时隙的频谱检测可信度较低，所以系统的频谱检测能力依赖于另一个时隙，这意味着从检测频谱的角度来说，浪费了宝贵的时隙资源。采用新的配对方法，所有时隙的检测可信度提高。因而可以通过设置门限，选择性地采用非协作检测和协作检测模式，可以减少感知阶段对时隙资源的占用，同时也不过多地降低感知能力。

## 2 系统模型

协作感知模型如图 1 所示<sup>[6,9,10]</sup>，在含有授权用户  $P$  的认知无线网络中，有  $n$  个认知用户  $\{U_0, U_1, U_2, \dots, U_n\}$ ，它们均具有在感知阶段作为感知用户的权利，也均具有作为感知用户的中继的义

务，且假定  $U_0$  是需要与授权用户共享频谱的非授权用户。根据各个认知用户的信道状态信息，从中选取 2 个认知用户配对，一个认知用户为感知用户，另一个认知用户作为其中继用户，并采用能量检测器协作感知授权用户是否存在信号，感知用户把结果通知需要与授权用户共享频谱的非授权用户。

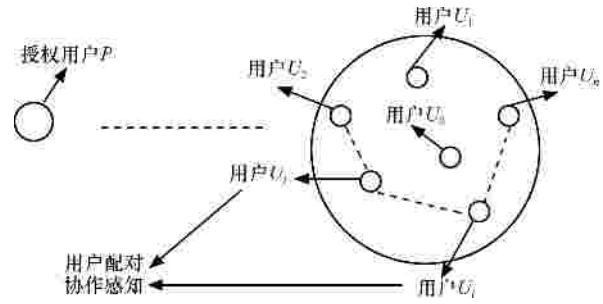


图 1 用户配对与协作频谱感知系统模型

不妨设感知用户为  $U_i$ ，中继用户为  $U_j$ 。协作感知过程如下：在时隙  $S_1$ ，感知用户  $U_i$ 、中继  $U_j$  均接收来自授权用户  $P$  的信号，根据感知用户  $U_i$  的能量检测器的输出功率大小可以分为以下 2 种感知模式。非协作感知模式：如果  $U_i$  的能量检测器的输出功率大于协作门限(定义为时隙  $S_1$  时的检测门限  $\gamma^{(1)}$  的  $\beta$  ( $\beta > 1$ ) 倍)，则判定授权用户信号存在。协作感知模式：否则，继续下一个时隙  $S_2$ ， $U_j$  根据放大重传策略，将其在  $S_1$  收到的信号放大转发(放大系数同文献[6,9,10])给用户  $U_i$ ，同时用户  $U_i$  也接收来自授权用户  $P$  的信号， $U_i$  合并这 2 个信号，若其能量检测器的输出功率大于时隙  $S_2$  时的检测门限  $\gamma^{(2)}$ ，则判定授权用户信号存在。如果在时隙  $S_1$  感知用户的能量检测器的输出功率明显大于检测门限  $\gamma^{(1)}$  的概率较高(存在授权用户信号时)，可以通过设置协作门限  $\beta\gamma^{(1)}$ ，把输出功率大于  $\beta\gamma^{(1)}$  的情形直接判定为存在授权用户信号且可信度高，而输出功率小于或等于  $\beta\gamma^{(1)}$  的情形则需要时隙  $S_2$  的协作感知进一步判定，这样就减少了时隙消耗。

假定信道状态信息和信道噪声在 2 个时隙内不变。记  $E_s$  为授权用户  $P$  的信号功率，即  $E_s > 0$  表示授权用户  $P$  需要使用无线频谱， $E_s = 0$  则表示不需要使用。定义  $T_i^{(1)}(H_0)$  和  $T_i^{(1)}(H_1)$  分别为时隙  $S_1$  时感知用户  $U_i$  的能量检测器在假设条件  $H_0$  (授权用户  $P$  不存在) 和  $H_1$  (授权用户  $P$  存在) 下的输出功率，则<sup>[6,9,10]</sup>

$$T_i^{(1)}(H_0) = |n_i|^2 \tag{1}$$

$$T_i^{(1)}(H_1) = |h_{pi}|^2 E_s + N_i \tag{2}$$

同理，定义  $T_i^{(2)}(H_0)$  和  $T_i^{(2)}(H_1)$  分别为时隙  $S_2$  时  $U_i$  的能量检测器在假设条件  $H_0$  和  $H_1$  下的输出功率，则<sup>[6,9,10]</sup>

$$T_i^{(2)}(H_0) = |n_i|^2 + |n_j|^2 \tag{3}$$

$$T_i^{(2)}(H_1) = |h_{pi}|^2 E_s + |h_{pj}|^2 E_s + N_i + N_j \tag{4}$$

其中，下标  $pi$  和  $pj$  分别表示  $P$  到  $U_i$  和  $P$  到  $U_j$ ， $h_{pi}$  和  $h_{pj}$  分别表示为对应的信道衰落因子(为了与文献[9]中的方案进行对比，假定平坦且服从瑞利分布，所有信道相互统计独立)，其方差分别为  $s_{pi}^2$  和  $s_{pj}^2$ ， $n_i$ 、 $n_j$  表示均值为零和双边功率谱密度分别为  $N_i$ 、 $N_j$  的加性复高斯白噪声，它们之间相互统计独立。类似于文献[9,10]，本文假定所有噪声方差相等，即  $N_1=N_2=\dots=N_n=N_0$ ，且假定授权用户  $P$  到认知用户  $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  的信道衰落因子的方差均相等。这种情形通常发生在  $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  到授权用户  $P$  之间较远的距离而言)，因此所受路径损失可相比拟<sup>[11]</sup>，可假设  $s_{p1}^2 = s_{p2}^2 = \dots = s_{pn}^2 = s^2$ 。

### 3 用户配对与协作感知算法流程

#### 3.1 用户配对准则

显然，感知用户  $U_i$  的接收信噪比为  $SNR_i = |h_{pi}|^2 \gamma_s$ ，中继用户  $U_j$  的接收信噪比为  $SNR_j = |h_{pj}|^2 \gamma_s$ ，其中  $\gamma_s = E_s/N_0$ 。根据式(2)，时隙  $S_1$  时应该选取  $|h_{pi}|^2$  最大的用户  $U_i$ 。根据式(4)，时隙  $S_2$  时应该选取  $|h_{pi}|^2 + |h_{pj}|^2$  最大的用户  $U_i$  和中继用户  $U_j$ 。如果假定  $|h_{pi}|^2 > |h_{pj}|^2$ ，则时隙  $S_2$  时选择的感知用户也就是时隙  $S_1$  时选取的感知用户。所以，只需关注时隙  $S_2$  时的选取即可。而选择  $|h_{pi}|^2 + |h_{pj}|^2$  最大的感知用户  $U_i$  和中继  $U_j$ ，也就是在所有认知用户中选取接收信噪比最优的用户作为  $U_i$ ，选取接收信噪比次优的用户作为中继用户  $U_j$ ，所以配对准则为

$$\begin{cases} is = \arg 1^{th} \max_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} |h_{pi}|^2 \\ js = \arg 2^{th} \max_{j \in \{1, 2, \dots, n\}} |h_{pj}|^2 \end{cases} \tag{5}$$

其中， $1^{th} \max$  表示最优， $2^{th} \max$  表示次优， $is$ 、 $js$  分

别是被选取的感知用户和中继用户的编号，且  $is \neq js$ 。

考虑授权用户  $P$  到非授权用户  $U_0$  的信道衰落因子的方差，存在 3 种情形：1)  $h_{p0}$  的方差明显大于  $s^2$ ，则  $|h_{p0}|^2$  最大的可能性很高，即感知用户是  $U_0$  的可能性非常大，可以近似认为选取的感知用户就是  $U_0$ ，配对的中继用户从  $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  中选取，此情形即为文献[9,10]中的方法；2)  $h_{p0}$  的方差明显小于  $s^2$ ，则  $|h_{p0}|^2$  最小的可能性很高，感知用户是  $U_0$  的可能性很低，可以近似认为感知用户不会是  $U_0$ ，感知用户和中继用户从  $\{U_1, U_2, \dots, U_n\}$  中选取配对；3)  $h_{p0}$  的方差接近于  $s^2$ ，则感知用户和中继用户从  $\{U_0, U_1, U_2, \dots, U_n\}$  中选取配对。2)和 3)的不同仅在于参与配对的认知用户范围不同。

#### 3.2 用户配对与协作感知算法流程

综上所述，可给出最优认知用户配对与协作感知算法流程，如图 2 所示。

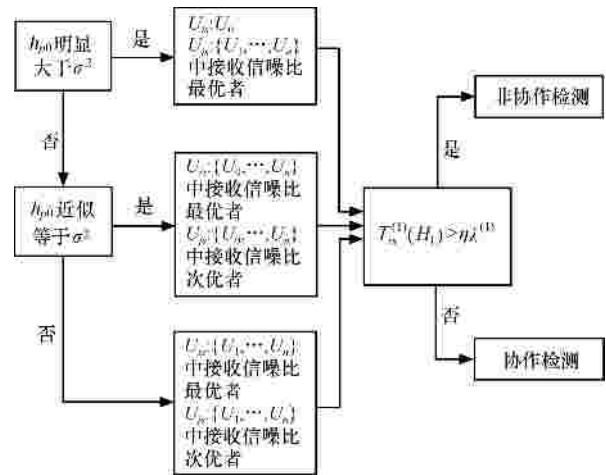


图 2 认知用户配对与协作感知流程

### 4 性能分析

#### 4.1 时隙 $S_1$ 时感知用户 $U_{is}$ 的检测概率

假定时隙  $S_1$  时的能量检测门限为  $\gamma^{(1)}$ ，根据式(2)，在时隙  $S_1$  感知用户  $U_{is}$  的检测概率为

$$P_{is}^{(1)} = \Pr \{ T_{is}^{(1)}(H_1) > \gamma^{(1)} \} = 1 - \Pr \left\{ |h_{pis}|^2 < \frac{\gamma^{(1)} - N_0}{E_s} \right\} \tag{6}$$

令  $y_i = |h_{pi}|^2$ ， $0, i=1, 2, \dots, n$ ，则

$$\begin{aligned} & \Pr \left\{ |h_{pis}|^2 < \frac{\gamma^{(1)} - N_0}{E_s} \right\} \\ &= \Pr \left\{ 1^{th} \max_{i \in \{1, 2, \dots, n\}} y_i < \max \left( \frac{\gamma^{(1)} - N_0}{E_s}, 0 \right) \right\} \end{aligned}$$

$$= \left\{ \Pr \left\{ y_i < \max \left( \frac{\gamma^{(1)} - N_0}{E_s}, 0 \right) \right\} \right\}^n \quad (7)$$

又

$$\Pr \left\{ y_i < \max \left( \frac{\gamma^{(1)} - N_0}{E_s}, 0 \right) \right\} = 1 - \exp \left( - \max \left( \frac{\gamma^{(1)} - N_0}{s^2 E_s}, 0 \right) \right) \quad (8)$$

利用二项式定理进一步可得

$$\begin{aligned} \Pr \left\{ |h_{pis}|^2 < \frac{\gamma^{(1)} - N_0}{E_s} \right\} &= \left\{ 1 - \exp \left( - \max \left( \frac{\gamma^{(1)} - N_0}{s^2 E_s}, 0 \right) \right) \right\}^n \\ &= 1 + \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} (-1)^k \exp \left( - \max \left( \frac{k\gamma^{(1)} - kN_0}{s^2 E_s}, 0 \right) \right) \quad (9) \end{aligned}$$

设时隙  $S_1$  的虚警概率为  $a$ ，则  $\gamma^{(1)}$  由下式确定<sup>[6,9,10]</sup>

$$\gamma^{(1)} = -2N_0 \ln a \quad (10)$$

故

$$P_{is}^{(1)} = \sum_{k=1}^n \binom{n}{k} (-1)^{k+1} \exp \left( - \frac{\max(-2k \ln a - k, 0)}{s^2 g_s} \right) \quad (11)$$

#### 4.2 时隙 $S_2$ 认知用户 $U_{is}$ 的检测概率

假定时隙  $S_2$  的能量检测门限为  $\gamma^{(2)}$ ，虚警概率也为  $a$ ，则<sup>[6,9,10]</sup>

$$\gamma^{(2)} = -2[W(-ae^{-1}) + 1]N_0 \quad (12)$$

其中， $W(\cdot)$  表示兰伯特函数。在时隙  $S_2$  感知用户  $U_{is}$  的检测概率为

$$\begin{aligned} P_{is}^{(2)} &= \Pr \{ T_{is}^{(2)}(H_1) > \gamma^{(2)} \} \\ &= \Pr \left\{ \left( |h_{pis}|^2 + |h_{pjs}|^2 \right) E_s + 2N_0 > \gamma^{(2)} \right\} \quad (13) \end{aligned}$$

令  $z = \max[(\gamma^{(2)} - 2N_0)/E_s, 0] = \max[(-2W(-ae^{-1}) - 4)/\gamma_s, 0]$ ，并令集合  $\{y_{(1)}, y_{(2)}, \dots, y_{(n)}\}$  为集合  $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  的从小到大的排列，即  $y_{(1)} < y_{(2)} < \dots < y_{(n)}$ ，则

$$\begin{aligned} 1 - P_{is}^{(2)} &= 1 - \Pr \{ y_{(n)} + y_{(n-1)} > z \} \\ &= \Pr \{ y_{(n)} + y_{(n-1)} < z \} \\ &= \Pr \left\{ 0 \leq y_{(n-2)} \leq y_{(n-1)} \leq \frac{z}{2}, y_{(n-1)} \leq y_{(n)} < z - y_{(n-1)} \right\} \quad (14) \end{aligned}$$

由于上式中积分的上下限均是变化的，所以尽管已知  $y_{(1)}, y_{(2)}, \dots, y_{(n)}$  的联合概率密度函数<sup>[12]</sup>，但很

难得到精确的闭合表达式，故转而计算其上界，即

$$\begin{aligned} &[1 - P_{is}^{(2)}] \\ &\Pr \left\{ 0 \leq y_{(n-1)} \leq \frac{z}{2}, y_{(n-1)} \leq y_{(n)} < z - y_{(n-1)} \right\} \\ &= \int_0^{\frac{z}{2}} \int_{y_{(n-1)}}^{z-y_{(n-1)}} f(y_{(n)}, y_{(n-1)}) dy_{(n)} dy_{(n-1)} \quad (15) \end{aligned}$$

$y_{(n-1)}$  与  $y_{(n)}$  的联合概率密度函数<sup>[12]</sup>为

$$f(y_{(n)}, y_{(n-1)}) = n(n-1)f(y_{(n-1)})f(y_{(n)})[F(y_{(n-1)})]^{n-2} \quad (16)$$

其中

$$f(y_{(n-1)}) = \frac{1}{s^2} \exp \left( - \frac{y_{(n-1)}}{s^2} \right) \quad (17)$$

$$f(y_{(n)}) = \frac{1}{s^2} \exp \left( - \frac{y_{(n)}}{s^2} \right) \quad (18)$$

$$F(y_{(n-1)}) = 1 - \exp \left( - \frac{y_{(n-1)}}{s^2} \right) \quad (19)$$

所以

$$\begin{aligned} f(y_{(n)}, y_{(n-1)}) &= \frac{n(n-1)}{s^4} \exp \left( - \frac{y_{(n-1)}}{s^2} \right) \\ &\exp \left( - \frac{y_{(n)}}{s^2} \right) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{y_{(n-1)}}{s^2} \right) \right]^{n-2} \quad (20) \end{aligned}$$

把式(20)代入式(16)，得

$$\begin{aligned} &\int_0^{\frac{z}{2}} \int_{y_{(n-1)}}^{z-y_{(n-1)}} f(y_{(n)}, y_{(n-1)}) dy_{(n)} dy_{(n-1)} \\ &= \int_0^{\frac{z}{2}} \int_{y_{(n-1)}}^{z-y_{(n-1)}} \frac{n(n-1)}{s^4} \exp \left( - \frac{y_{(n-1)}}{s^2} \right) \\ &\exp \left( - \frac{y_{(n)}}{s^2} \right) \left[ 1 - \exp \left( - \frac{y_{(n-1)}}{s^2} \right) \right]^{n-2} dy_{(n-1)} dy_{(n)} \\ &= \frac{n(n-1)}{s^2} \int_0^{\frac{z}{2}} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{y_{(n-1)}}{s^2} \right) \right]^{n-2} \exp \left( - \frac{2y_{(n-1)}}{s^2} \right) dy_{(n-1)} \\ &\frac{n(n-1)}{s^2} \exp \left( - \frac{z}{s^2} \right) \int_0^{\frac{z}{2}} \left[ 1 - \exp \left( - \frac{y_{(n-1)}}{s^2} \right) \right]^{n-2} dy_{(n-1)} \quad (21) \end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned} & \frac{n(n-1)}{s^2} \int_0^{\frac{z}{2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{y_{(n-1)}}{s^2}\right) \right]^{n-2} \exp\left(-\frac{2y_{(n-1)}}{s^2}\right) dy_{(n-1)} \\ &= \frac{n(n-1)}{s^2} \int_0^{\frac{z}{2}} \left[ \sum_{k=0}^{n-2} \binom{n-2}{k} (-1)^k \exp\left(-\frac{ky_{(n-1)}}{s^2}\right) \right] \\ & \quad \exp\left(-\frac{2y_{(n-1)}}{s^2}\right) dy_{(n-1)} \\ &= n(n-1) \sum_{k=0}^{n-2} \binom{n-2}{k} \frac{(-1)^k}{k+2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{(k+2)z}{2s^2}\right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

以及

$$\begin{aligned} & \frac{n(n-1)}{s^2} \exp\left(-\frac{z}{s^2}\right) \int_0^{\frac{z}{2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{y_{(n-1)}}{s^2}\right) \right]^{n-2} dy_{(n-1)} \\ &= \frac{n(n-1)}{s^2} \exp\left(-\frac{z}{s^2}\right) \int_0^{\frac{z}{2}} \sum_{k=0}^{n-2} \binom{n-2}{k} (-1)^k \cdot \\ & \quad \exp\left(-\frac{ky_{(n-1)}}{s^2}\right) dy_{(n-1)} \\ &= n(n-1) \exp\left(-\frac{z}{s^2}\right) \cdot \\ & \quad \left\{ \frac{z}{2s^2} + \sum_{k=1}^{n-2} \binom{n-2}{k} \frac{(-1)^k}{k} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{kz}{2s^2}\right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (23)$$

式(22)与式(23)的推导利用了二项式定理。利用上述推导结果可得

$$\begin{aligned} & \int_0^{\frac{z}{2}} \int_{y_{(n-1)}}^{z-y_{(n-1)}} f(y_{(n)}, y_{(n-1)}) dy_{(n)} dy_{(n-1)} = \\ & n(n-1) \left\{ \sum_{k=0}^{n-2} \frac{\binom{n-2}{k} (-1)^k \left[ 1 - \exp\left(-\frac{(k+2)z}{2s^2}\right) \right]}{k+2} - \right. \\ & \quad \left. \exp\left(-\frac{z}{s^2}\right) \left\{ \frac{z}{2s^2} + \sum_{k=1}^{n-2} \frac{\binom{n-2}{k} (-1)^k \left[ 1 - \exp\left(-\frac{kz}{2s^2}\right) \right]}{k} \right\} \right\} \end{aligned} \quad (24)$$

所以最后得

$$\begin{aligned} & [P_{is}^{(2)}]_{\text{下界}} \\ &= 1 - n(n-1) \left\{ \sum_{k=0}^{n-2} \frac{\binom{n-2}{k} (-1)^k \left[ 1 - \exp\left(-\frac{(k+2)z}{2s^2}\right) \right]}{k+2} - \right. \end{aligned}$$

$$\left. \exp\left(-\frac{z}{s^2}\right) \left\{ \frac{z}{2s^2} + \sum_{k=1}^{n-2} \frac{\binom{n-2}{k} (-1)^k \left[ 1 - \exp\left(-\frac{kz}{2s^2}\right) \right]}{k} \right\} \right\} \quad (25)$$

### 4.3 算法的检测概率与感知时隙消耗

在用户配对完成后,根据在时隙  $S_1$  感知用户的能量检测器的输出功率大小决定是否需要协作感知。不需要协作感知的概率为  $\Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h^{(1)}\}$ , 需要协作感知的概率为  $1 - \Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h^{(1)}\}$ 。所提算法的检测概率下界(该下界作为所提算法检测概率的近似值)为

$$\begin{aligned} [P_{is}]_{\text{下界}} &= \Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h^{(1)}\} P_{is}^{(1)} + \\ & \quad (1 - \Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h^{(1)}\}) [P_{is}^{(2)}]_{\text{下界}} \end{aligned} \quad (26)$$

同理,感知的时隙消耗为

$$\begin{aligned} t_{ise} &= 1 \times \Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h^{(1)}\} + 2 \times (1 - \Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h^{(1)}\}) \\ &= 2 - \Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h^{(1)}\} \end{aligned} \quad (27)$$

在式(6)中,用  $\gamma^{(1)}$  代替  $\gamma^{(1)}$ , 即可得到  $\Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h^{(1)}\}$  的值。通过设置  $\gamma$  的值,可以得到不同的频谱检测概率与感知时隙消耗。

## 5 数值模拟与分析

为了直观地观察所提算法的感知性能以及所需时隙,根据推导结果,对该算法(第3种情形)进行了模拟仿真。对于文献[9]中的算法,为提高其检测概率,不同于原文中考虑所有时隙的检测概率,仅采用更好的偶数时隙协作感知的检测概率作为原算法的检测概率。假定  $s^2=1$ ,  $SNR=\gamma_s$ 。

图3给出了  $a=0.005$ 、不同信噪比下(0~6dB)所提算法  $S_1$  时隙与原算法奇数时隙的检测概率比较。两者均为非协作感知。但前者感知用户由所有认知用户中接收信噪比最大者担当,所以其感知性能远远大于后者。例如,在信噪比为 5dB 时,后者的检测概率约为 5%,而前者在  $n=8$  时检测概率约为 33%,在  $n=10$  时检测概率约为 39%。由于后者奇数时隙的感知用户不选择,导致不能分享多用户分集,所以增加认知用户数量不会改善其检测概率。相反,前者由于  $S_1$  时隙的感知用户是在所有认知用户中选择的最佳用户,能充分分享多用户分集,所

以增加认知用户数量会改善其检测概率，如后者在  $n=8$  时检测概率约为 33%，在  $n=10$  时检测概率约增加为 39%。

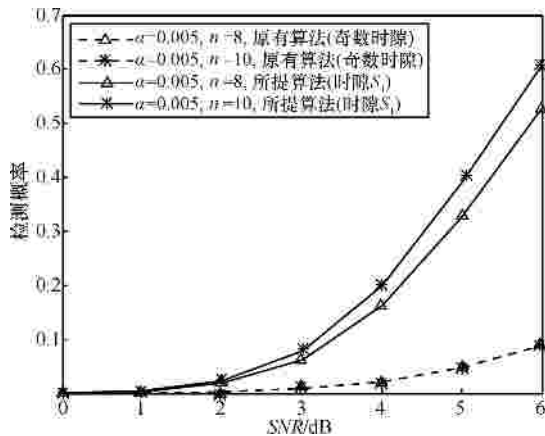


图 3  $\alpha=0.005$ 、 $SNR=0\sim 6\text{dB}$ ，所提算法  $S_1$  时隙与原算法奇数时隙的检测概率比较

图 4 给出了  $\alpha=0.005$ 、 $n=8$  和 10、不同信噪比下(0~6dB)所提算法  $S_2$  时隙与原算法偶数时隙的检测概率比较。两者均为协作感知，其检测概率均随着认知用户数  $n$  的增加而提高。不同的是，前者的感知用户及其中继用户是在所有  $n$  个认知用户中选择接收信噪比位于前两者配对，而后者的感知用户固定，中继用户为在剩余  $n-1$  个用户中选择的接收信噪比最大者。这直接导致前者的选择自由度高于后者。例如，当  $n=8$  时，后者感知用户是预先确定的，所以在 7 个用户中选取最佳的一个中继与该感知用户配对，共有 7 种选择的可能；而前者是在 8 个用户中选取最佳的用户作为感知用户，以及选择次佳的用户作为该感知用户的中继，共有 56 种选择的可能。因此，前者的接收信噪比要大于后者，导致前者的检测概率大于后者。例如，在 4dB 处，前者的检测概率要比后者多出约 7%。另外，在低信噪比下，就检测概率而言，前者相对于后者的提高还不明显，这是因为在低信噪比下，虽然选择自由度优势明显，但由于检测门限高，检测概率提高有限。随着信噪比的提高，这种提高将越来越明显，这是因为随着信噪比的提高，检测门限不断降低，前者不再受制于高检测门限而逐渐显示出其优势。但是，随着信噪比的进一步提高，这种提高又将越来越不明显，因为在高信噪比下，检测门限低，协作分集的重要性降低，即使低  $n$  值时，检测概率也不会低。

图 4 还给出了  $\alpha=0.005$ 、 $\gamma=1.2$ 、 $n=8$  和 10，不

同信噪比下(0~6dB)所提算法与所提算法  $S_2$  时隙的检测概率比较。图 5 给出了  $\alpha=0.005$ 、 $\gamma=1.2$ 、 $n=8$  和 10，不同信噪比下(0~6dB)所提算法与原算法的时隙消耗的比较。由图 4 可以发现，在低信噪比时，两者的检测概率相差不多，高信噪比(约大于 5dB)时，所提算法  $S_2$  时隙的检测概率明显大于所提算法。这是因为高信噪比时检测门限  $\gamma^{(1)}$  低，导致所提算法较多地采用非协作模式，检测概率较所提算法  $S_2$  时隙下降明显。不过，此时所提算法的时隙消耗也相当低。例如，在 6dB 处，所提算法检测概率低于所提算法  $S_2$  时隙约 10%，但时隙消耗也下降了 0.35 (如图 5 所示)。从总体上讲，所提算法的检测概率较所提算法  $S_2$  时隙的检测概率略低，但时隙消耗下降明显。

由图 4 还可知，在小于 5dB 内，所提算法的检测概率总是高于原有算法，大于 5dB 后，所提算法的检测概率要低于原有算法，但所提算法的时隙消耗高信噪比时总是低于低信噪比时。其原因也是在低信噪比下，检测门限  $\gamma^{(1)}$  高，不需要协作感知的概率  $\Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h \gamma^{(1)}\}$  低，所以所提算法更多地采用协作感知模式，这导致检测概率相对较高且需要 2 个时隙协作感知的概率也高。例如，在  $n=8$ 、 $SNR=3\text{dB}$  处，检测概率比原有算法高出约 5%，时隙消耗少了 0.025。而在高信噪比下，检测门限  $\gamma^{(1)}$  低，不需要协作感知的概率  $\Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h \gamma^{(1)}\}$  高，所以所提算法更多地采用非协作感知模式，这导致检测概率相对较低(甚至低于原有算法)且需要 2 个时隙协作感知的概率也低。例如，在  $n=8$ 、 $SNR=5\text{dB}$  处，检测概率与原有算法差不多，但时隙消耗少了 0.18。

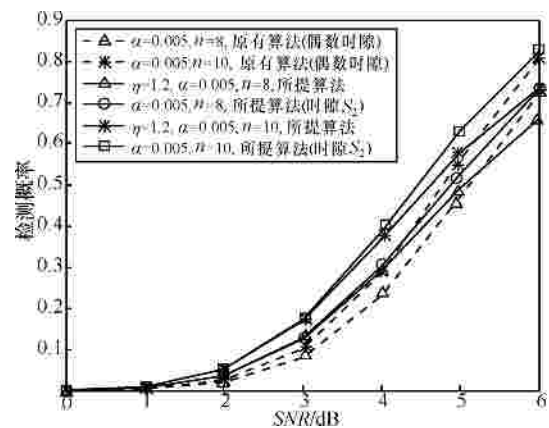


图 4  $\alpha=0.005$ 、 $SNR=0\sim 6\text{dB}$ ，所提算法、所提算法  $S_2$  时隙与原算法偶数时隙的检测概率比较

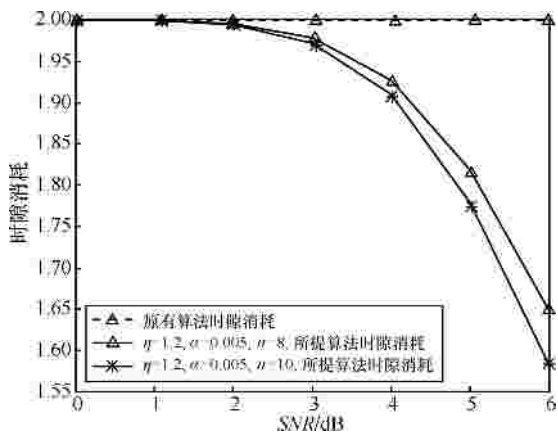


图 5  $\alpha=0.005$ 、 $\eta=1.2$ 、 $SNR=0\sim 6$ dB, 所提算法与原算法的时隙消耗的比较

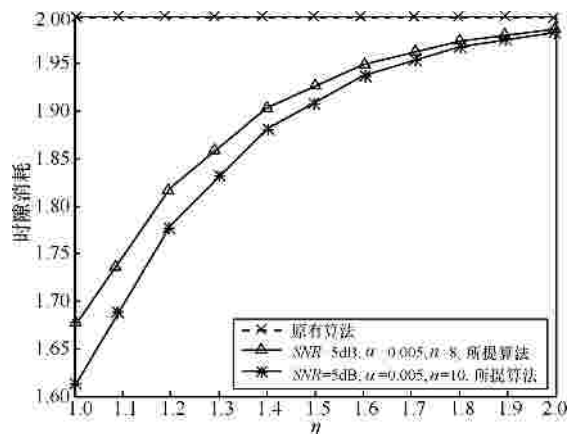


图 7  $\alpha=0.005$ 、 $\eta=1\sim 2$ 、 $SNR=5$ dB, 所提算法与原算法的时隙消耗的比较

图 6 和图 7 给出了  $\alpha=0.005$ 、 $\eta=1\sim 2$ 、 $n=8$  和 10、 $SNR=5$ dB, 所提算法与原算法的检测概率与时隙消耗的比较。由图 6 可知, 随着  $\eta$  的增加, 协作感知的概率增加, 导致检测概率增加以及时隙消耗增加。例如,  $n=8$ ,  $\eta$  从 1.4 增加到 1.6, 图 6 中检测概率从 50.5% 增加到 51.9%, 而图 7 中时隙消耗从 1.9 增加到 1.94。由图 6 还可知, 在  $\eta < 1.1$  时, 所提算法检测概率小于原有算法, 反之则大于原有算法。这是因为低协作门限时, 所提算法更多地进行非协作感知, 性能较低, 可能低于原有算法, 而高协作门限时, 所提算法更多地进行协作感知, 性能较高。还可以从图 6 和图 7 看到, 当认知用户数量增加时, 所提算法在检测概率增加的同时, 时隙消耗也随之降低。因为增加认知用户数量, 导致时隙  $S_1$  获得更多的分集资源, 所以概率  $\Pr\{T_{is}^{(1)}(H_1) > h \eta^{(1)}\}$  增加, 结果所提算法采用非协作感知模式的概率增加, 导致时隙消耗的降低。

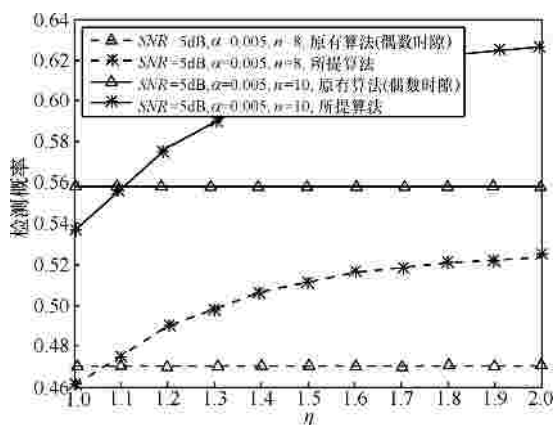


图 6  $\alpha=0.005$ 、 $\eta=1\sim 2$ 、 $SNR=5$ dB, 所提算法与原算法的检测概率的比较

### 6 结束语

为了提高频谱感知能力和减少不必要的时隙消耗, 本文提出了一种最优用户配对与协作感知算法, 给出了相关的配对准则和采用协作或非协作感知模式的判定方法, 推导了在瑞利平坦衰落环境下算法的频谱检测概率下界与时隙消耗。最后对不同信噪比、不同协作门限下、不同认知用户数量下的检测概率与时隙消耗进行了数值模拟和分析。结果显示所提算法可以更加充分利用用户分集资源, 大大提高非协作时感知用户的感知能力, 也一定程度上提高了协作时感知用户的感知能力。与原有算法相比, 在低信噪比下, 所提算法检测概率更高而时隙消耗也更低, 在高信噪比下所提算法检测概率略低但时隙消耗很低; 在低协作门限下, 所提算法检测概率略低但时隙消耗很低, 在高协作门限下, 所提算法检测概率更高而时隙消耗也较低。

### 参考文献:

- [1] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal Selected Area Communication, 2005,23(2): 201-220.
- [2] AKYILDIZ I F, LEE W Y. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [3] SAHAI A, HOVEN N, TANDRA R. Some fundamental limits on cognitive radio[A]. Allerton Conference on Communication, Control and Computing [C]. Monticello, USA, 2004.16-21.
- [4] GANESAN G, LI Y G. Cooperative spectrum sensing in cognitive

radio-part I: two user networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2007, 6: 2204-2213.

- [5] GANESAN G, LI Y G. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio-part II: multiuser networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2007, 6: 2214-2222.
- [6] ZHU J, ZOU Y L, ZHENG B Y. Cooperative detection for primary user in cognitive radio networks[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2009,8:1-12.
- [7] LETAIEF K B, ZHANG W. Cooperative communications for cognitive radio networks[J]. Proceedings of the IEEE, 2009,97(5):878-893.
- [8] WANG B B, LIU K J R. Advances in cognitive radio networks: a survey[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2011, 5(1):5-23.
- [9] 朱佳, 郑宝玉, 邹玉龙. 基于最佳中继选择的协作频谱感知方案研究[J]. 电子学报, 2010, 38(1): 92-98.  
ZHU J, ZHENG B Y, ZOU Y L. Cooperative spectrum sensing in multiuser cognitive radio networks with best relay selection[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(1): 92-98.
- [10] 朱佳, 郑宝玉, 邹玉龙. 一种新的多用户协作频谱感知方案及其检测时间分析[J]. 中国科学:信息科学, 2010,40(3):481-491.  
ZHU J, ZHENG B Y, ZOU Y L. A new multiuser cooperative spectrum sensing scheme and analysis of detection time[J]. Science in China Series F: Information Science, 2010,40(3):481-491.
- [11] ZHANG W, RANJAN K. Optimization of cooperative spectrum sensing with energy detection in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12):5761-5766.
- [12] ZWILLINGER D, KOKOSKA S. Standard Probability and Statistics Tables and Formulae[M]. New York: Chapman & Hall/CRC, 2000.

#### 作者简介：



包志华 (1955-), 男, 江苏南通人, 南通大学教授, 主要研究方向为现代通信理论与技术、通信专用集成电路设计等。



张士兵 (1962-), 男, 江苏南通人, 博士, 南通大学教授, 主要研究方向为宽带数字通信、通信信号处理。



张晓格 (1975-), 男, 江苏海门人, 博士, 南通大学讲师, 主要研究方向为现代通信中的信号与信息处理。



邱恭安 (1973-), 男, 湖北浠水人, 博士, 南通大学副教授, 主要研究方向为宽带通信网、认知无线协作网络。