

n -out-of- K 融合规则下增量式协作感知算法

张晓格, 张士兵, 邱恭安

(南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 该算法把协作中继分为前 N 个与后 $K-N$ 个两部分, 首先在前 N 个中继中感知, 若不多于 m_L 个中继检测到主用户或不少于 m_H 个中继检测到主用户, 则全局判定为存在或不存在频谱空洞; 否则继续在后 $K-N$ 个中继中感知, 只有当前后两次感知不少于 n 个中继检测到主用户时则才全局判定不存在频谱空洞。在满足虚警概率与检测概率的前提下, 构建最小化时隙消耗的目标函数, 优化参数 m_L 、 m_H 与 N 。模拟表明, 通过合理设置这些参数, 在保证感知性能的前提下, 所提增量协作算法的平均时隙消耗明显低于传统协作感知。

关键词: 认知无线电; 频谱感知; 增量协作; 时隙消耗

中图分类号: TN929.53

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)Z2-0111-07

Incremental cooperative spectrum sensing algorithm with n -out-of- K fusion rule

ZHANG Xiao-ge, ZHANG Shi-bing, QIU Gong-an

(College of electronic and information, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The algorithm divided the total relays into two subsections. The front subsection included N number of relays, and the later one included $K-N$ number of relays. Firstly, the front N relays sensed the spectrum. If no more than m_L number of relays had detected the existing of the primary user, the global detection was that the spectrum holes existed. If more than m_H number of relays had detected the existing of the primary user, the global detection was that no spectrum holes existed. Otherwise, the later $K-N$ number of relays continued to sense the spectrum. The global detection was that the spectrum holes existed only when there were totally over n number of relays having detected the existing of the primary user in the two sensing stages. The object function was built for minimizing the time-slot consumption by adjusting the parameters m_L , m_H and N with the limit of detection probability and false probability. Simulation results show that the proposed incremental cooperative spectrum sensing algorithm has much lower time-slot consumption than the traditional one by properly setting the parameters with high sensing performance kept.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; incremental cooperative; time-slot consumption

1 引言

目前, 授权(主)用户固定占据频谱的管理体制使得宝贵的频谱资源使用效率很低, 而对于频谱

资源的渴求则随着无线通信的发展越来越迫切。由于频谱资源是有限的, 所以提高现有频谱资源的利用效率是解决频谱资源不足的有效途径。认知无线电就是这样一种技术^[1]。为了利用闲置频谱资源,

收稿日期: 2012-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(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 (61071086); Nantong Applied Research Project (BK2011064); Collegiate Natural Science Fund of Jiangsu Province (11KJB510021, 11KJB510020)

非授权（次）用户必须准确感知频谱空洞并接入。可见，频谱感知^[2]是认知无线电中的关键技术之一。

频谱感知可以分为本地感知和协作感知。能量检测^[3]是本地感知的典型代表，实现简单且无需主用户的先验知识，其缺点是在低信噪比和深衰落环境中单个节点的感知能力不足。基于能量检测的协作感知^[4]则利用认知用户间的相互协作提高了感知能力。但是，协作感知能力的提高是以资源消耗的增加为代价的。对于采用多个中继的协作感知系统，在中继过程中为避免互相干扰而采用正交信道（常为不同时隙），资源消耗明显高于本地感知。

因此，如何在保证协作感知能力的前提下有效降低时隙消耗是迫切需要解决的问题。一种常用的方法是中继选择。文献[5,6]提出基于最佳中继选择的多用户协作频谱感知，其原理是在若干中继用户中选择最佳者参与协作，可在感知能力与资源消耗之间取得较好的平衡。文献[7]则研究了更为一般的基于第 N 佳中继选择的频谱感知。不过，该方案有 2 个缺点，一是中继选择需要预先知道信道状态信息，这在实现时可能较为困难；二是虽然选择最佳者（或第 N 佳）参与协作，但毕竟只有一个协作用户，感知能力还是受到较大限制。在协作通信中，还有一种所谓的增量协作方式^[8,9]，也是减少协作中继数量的方法，其思想是先采用少量中继协作，然后根据某种规则，判断是否需要增加额外的中继协作，从而达到减少资源消耗且保证性能的目的。不过，到目前为止，就作者所知，有关增量协作方式在频谱感知中的研究仍然是空白。

传统的基于决策融合的协作感知包括 3 个过程^[10]：所有协作用户本地感知；通过控制信道向融合中心传递本地感知结果；融合中心根据某种融合规则作出全局判定。减少时隙消耗的途径之一是减少通过控制信道向融合中心传递本地感知结果的数量。现把协作中继分为前后两部分，分析发现，如果在第一部分检测到主用户存在的中继数量很少，则最后全局判决主用户存在的概率很低；如果在第一部分检测到主用户存在的中继数量很多，则最后全局判决主用户存在的概率很高。根据这一事实，可以认为，如果第一部分检测到主用户存在的中继数量很少，并全局判定不存在主用户，则相对于传统算法判决的错误率是很低的，这样，第二部分的中继通过控制信道向融合中心传递本地感知结果的意义并不大；同样，如果在第一部分检测到

主用户存在的中继数量很多，并全局判定存在主用户，也同样道理。基于以上分析，提出一种增量协作感知算法，基本思想如下：如果第一部分检测到主用户的中继过多或过少则感知结束，否则在第二部分中进行增量协作感知。同时，为了充分利用增量协作感知算法减少时隙消耗，并保证感知能力，进一步构建了在虚警概率与检测概率受限情形下最小化时隙消耗的目标函数，以优化相关参数。

2 系统模型

如图 1 所示，考虑含有一个主用户、一个融合中心和 K 个次用户（协作中继）的认知无线网络。考虑采用决策融合，每个中继用户分别独立地进行基于能量检测的本地感知，然后把本地判决结果通过不存在传输差错的正交（时分）控制信道发送到融合中心，由融合中心得出全局的判决结果。

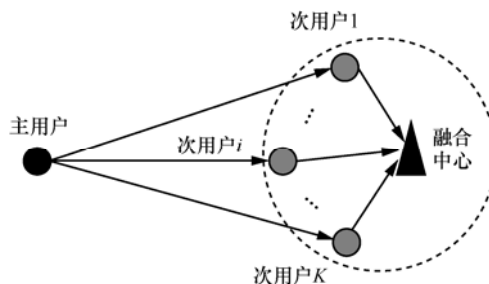


图 1 基于决策融合的认知无线频谱感知系统

在 AWGN 信道下，单个用户虚警概率和检测概率分别为^[11]

$$P_f = \frac{\Gamma\left(\mu, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(\mu)} \tag{1}$$

$$P_d = Q_\mu\left(\sqrt{2\gamma}, \sqrt{\lambda}\right) \tag{2}$$

其中， μ 是能量检测器的时间带宽之积， $\Gamma(a, x) = \int_x^\infty t^{a-1} e^{-t} dt$ 是不完全伽马函数， $\Gamma(a)$ 是伽马函数， $Q_\mu(a, b) = \frac{1}{a^{\mu-1}} \int_b^\infty x^\mu e^{-\frac{x^2+a^2}{2}} I_{\mu-1}(ax) dx$ 是广义马库姆 Q 函数^[12]。

设单个中继 i 在本地感知完成后，通过控制信道向融合中心发送感知结果 G_i ， $G_i=0$ 表示存在频谱空洞， $G_i=1$ 表示不存在频谱空洞。根据 n -out-of- K 融合规则作出全局判决，即^[11]

$$\sum_{i=1}^K G_i \begin{cases} \geq n, H_1 \\ < n, H_0 \end{cases} \tag{3}$$

3 增量式协作感知

3.1 算法的提出

基于 n -out-of- K 融合规则的传统算法的全局检测概率为^[10]

$$Q_d = \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} P_d^l (1-P_d)^{K-l} \quad (4)$$

全局虚警概率为^[10]

$$Q_f = \sum_{l=n}^K \binom{K}{l} P_f^l (1-P_f)^{K-l} \quad (5)$$

为了直观,下面以一个实例分析传统算法。设 $K=12, n=7, P_d=0.6, P_f=0.1$, 现把 12 个中继分为前 6 个与后 6 个两部分, 根据 n -out-of- K 融合规则, 全局判定检测到主用户的情形有如表 1 所示。

表 1 传统算法检测到主用户的情形分析

第一部分 (前 6 个中继)		第二部分 (后 6 个中继)	
本地检测到主用户的中继数量	概率	本地检测到主用户的中继数量	概率
0	0.004 096	7 (含) 个以上	0
1	0.036 864	6 (含) 个以上	0.046 656
2	0.138 24	5 (含) 个以上	0.233 28
3	0.276 48	4 (含) 个以上	0.544 32
4	0.311 04	3 (含) 个以上	0.820 8
5	0.186 624	2 (含) 个以上	0.959 04
6	0.046 656	1 (含) 个以上	0.995 904

根据表 1, 如果在第一部分检测到主用户存在的中继数量很少, 最后判决主用户存在的概率很低, 例如第一部分 1 个中继检测到主用户, 则在第二部分超过 6 个以上中继检测到主用户的概率为 0.046 656; 如果在第一部分检测到主用户存在的中继数量很多, 最后判决主用户存在的概率很高, 例如第一部分 5 个中继检测到主用户, 则在第二部分超过 2 个以上中继检测到主用户的概率为 0.959 04。

现在设想如果第一部分 1 个中继检测到主用户, 由于第二部分超过 6 个以上中继检测到主用户的概率为 0.046 656, 即仅 0.046 656 的可能全局判决为主用户存在, 所以不妨在第一部分感知结束后全局判决为主用户不存在, 不再进行第二部分的感知。同样, 第一部分 5 个中继检测到主用户, 则在第二部分有 0.959 04 的可能全局判决为主用户存在, 所以不妨在第一部分感知结束后全局判决为主

用户存在, 不再进行第二部分的感知。当然, 如果第一部分有 3 个中继检测到主用户, 则在第二部分有 0.544 32 的可能全局判决为主用户存在, 此时还是需要进行第二部分的感知, 否则误差较大。这样的安排, 检测误差在可控范围之内, 但时隙消耗可有效降低。

由此可见, 若把协作中继分为前 N 个与后 $K-N$ 个两部分, 从节约时隙消耗的角度, 可以提出如下的增量协作感知算法。

1) 前 N 时隙

①前 N 个中继本地感知并把感知结果送至融合中心, 其中 x 个中继检测到主用户;

②若 $x \leq m_L$, 则全局判定为不存在主用户, 感知结束;

③若 $x \geq m_H$, 则全局判定为存在主用户, 感知结束;

④否则, 前往 2) 进行增量协作。

2) 后 $K-N$ 时隙

①后 $K-N$ 个中继本地感知并把感知结果送至融合中心, 其中 y 个中继检测到主用户;

②若 $x+y \geq n$, 则全局判定为存在主用户, 感知结束;

③若 $x+y < n$, 则全局判定为不存在主用户, 感知结束。

3.2 算法的性能分析

增量协作感知算法全局判定主用户存在有如如下情形: 1) 前 N 个中继中有 $x(x \geq m_H)$ 个中继检测到主用户; 2) 前 N 个中继中有 $x(m_L < x < m_H)$ 个中继检测到主用户, 且后 $K-N$ 个中继中有 $y(x+y \geq n)$ 个中继检测到主用户。故检测概率为

$$\begin{aligned} & \Pr(H_1|H_1) \\ &= \Pr\{N \geq x \geq m_H|H_1\} + \\ & \Pr\{m_L < x < m_H|H_1\} \Pr\{n-x \leq y \leq K-N|x, H_1\} \\ &= \sum_{x=m_H}^N \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} + \\ & \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \left[\binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} \sum_{y=n-x}^{K-N} \binom{K-N}{y} P_d^y (1-P_d)^{K-N-y} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

同理, 虚警概率为

$$\Pr(H_1|H_0) = \sum_{x=m_H}^N \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} +$$

$$\sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \left[\binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} \sum_{y=n-x}^{K-N} \binom{K-N}{y} P_f^y (1-P_f)^{K-N-y} \right] \quad (7)$$

增量协作感知算法的时隙消耗有如下情形：1) 若主用户存在，则非增量协作消耗时隙 $[1 - \Pr(m_L < x < m_H | H_1)]N$ ，增量协作消耗时隙 $\Pr(m_L < x < m_H | H_1)K$ ；2) 若主用户不存在，则非增量协作消耗时隙 $[1 - \Pr(m_L < x < m_H | H_0)]N$ ，增量协作消耗时隙 $\Pr(m_L < x < m_H | H_0)K$ 。所以时隙消耗

$$\begin{aligned} T = & \Pr(H_1) \left\{ \left[1 - \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} \right] N + \right. \\ & \left. \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} K \right\} + \\ & \Pr(H_0) \left\{ \left[1 - \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} \right] N + \right. \\ & \left. \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} K \right\} \\ = & \Pr(H_1) \left[N + (K-N) \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} \right] + \\ & \Pr(H_0) \left[N + (K-N) \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

其中， $\Pr(H_1)$ 与 $\Pr(H_0)$ 分别表示 H_1 与 H_0 的先验概率。

3.3 算法的参数优化

注意到，在优化问题中， m_L 、 m_H 与 N 是主要参数，合理设置这 3 个参数，可以获得符合要求的增量协作感知算法。作为一个感知系统，应优先保证检测概率与虚警概率，所以有如下优化问题。

$$\begin{aligned} \min & T(m_L, m_H, N) \\ \text{subject to} & \begin{cases} \Pr(H_1 | H_1) \geq \bar{Q}_d \\ \Pr(H_1 | H_0) \leq \bar{Q}_f \end{cases} \quad (9) \end{aligned}$$

其中， \bar{Q}_d 、 \bar{Q}_f 分别为全局目标检测概率与全局目标虚警概率。该优化问题的优化对象及限制条件均是关于 m_L 、 m_H 与 N 的非线性方程，求解相当困难。不过，上述优化参数都是整数型离散值，因此，全搜索方法的计算量并不是很大，不失为一种办法。

通过下面的分析还可以进一步缩小参数的取值范围，以降低计算量。

根据式(9)，因为 $\sum_{y=n-x}^{K-N} \binom{K-N}{y} P_d^y (1-P_d)^{K-N-y} \leq 1$ ，所以

$$\begin{aligned} \bar{Q}_d & \leq \sum_{x=m_H}^N \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} + \\ & \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \left[\binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} \sum_{y=n-x}^{K-N} \binom{K-N}{y} P_d^y (1-P_d)^{K-N-y} \right] \\ & \leq \sum_{x=m_H}^N \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} + \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} \\ & = \sum_{x=m_L+1}^N \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\text{又 } \sum_{x=m_L+1}^N \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} \leq \sum_{x=1}^N \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x},$$

故

$$\bar{Q}_d \leq \sum_{x=1}^N \binom{N}{x} P_d^x (1-P_d)^{N-x} \quad (11)$$

根据式(9)，还有

$$\begin{aligned} \bar{Q}_f & \geq \sum_{x=m_H}^N \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} + \\ & \sum_{x=m_L+1}^{m_H-1} \left[\binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} \sum_{y=n-x}^{K-N} \binom{K-N}{y} P_f^y (1-P_f)^{K-N-y} \right] \\ & \geq \sum_{x=m_H}^N \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} \quad (12) \end{aligned}$$

又 $\sum_{x=m_H}^N \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} \geq \sum_{x=n}^N \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x}$ ， m_H 的最大值为 n ，故

$$\bar{Q}_f \geq \sum_{x=n}^N \binom{N}{x} P_f^x (1-P_f)^{N-x} \quad (13)$$

根据式(11)，可得到 N 的最小值，根据式(13)，可得到 N 的最大值。当给定 N 时，由式(10)可以得到 m_L 的最大值，由式(12) 可以得到 m_H 的最小值。

综上，参数优化过程如下。

- 1) 根据式(11)与式(13)，得到 N 的取值范围。
- 2) 针对每一个可能的 N 值：

① 根据式(10)，结合 m_L 的最小值 0，得到 m_L 的取值范围；

② 根据式(13), 结合 m_H 的最大值 n , 得到 m_H 的取值范围。

3) 对所有可能的 $\{m_L, m_H, N\}$ 组合, 若符合约束条件则根据式(8)计算时隙消耗。

4) 时隙消耗最小的组合即为最佳 $\{m_L, m_H, N\}$ 组合。

4 模拟结果与分析

计算机模拟过程中, $\Pr(H_1) = \Pr(H_2) = \frac{1}{2}$, $\mu = 10$, $\lambda = 20$, $K=12$, $n=7$, (或 $K=20$, $n=12$), $\bar{Q}_d = Q_d \times 99\%$, $\bar{Q}_f = Q_f \times 101\%$ (或 $\bar{Q}_d = Q_d \times 90\%$, $\bar{Q}_f = Q_f \times 110\%$)。

表 2 给出了在不同信噪比下传统协作感知算法与增量协作感知算法平均时隙消耗 (也即传送感知信息所发送的比特数) 及参数优化情况 ($\bar{Q}_d = Q_d \times 99\%$, $\bar{Q}_f = Q_f \times 101\%$)。由于在传递本地感知结果时, 通常在一个时隙中采用比特“1”表示本地感知到主用户存在, 比特“0”表示本地没有感知到主用户存在, 因此时隙消耗数量与传送感知信息所发送的信息量 (比特数) 相等。对于表 2 中 $K=12$, $n=7$ 情形, 传统算法的时隙消耗是 12 个时隙, 增量算法的时隙消耗明显低于传统算法。例如, 0dB 时, 增量算法的时隙消耗平均为 10.522 0 个时隙, 降低 1.478 个时隙; 6dB 时, 增量算法的时隙消耗平均为 8.308 0 个时隙, 降低 3.692 个时隙。随着信噪比的增加, 增量算法的时隙消耗越来越低, 当到达一定信噪比时, 时隙消耗不再降低。因为随着信噪比的增加, 本地检测概率提高, 导致增量算法需要后 $K-N$ 时隙的增量感知的可能性减少, 而当本地检测概率提高到很高时, 几乎不再需要增量感知, 再提高信噪比, 增量感知再减少已没有空间。例如, 信噪比为 8dB 时, N 为 6, 时隙消耗也为 6, 这意味着没有增量感知, 因此, 信噪比为增

加到 10dB 时, 时隙消耗仍为 6。表 2 还显示 N 值基本上在 n 值附近很小的范围之内变动, 这是符合最小化时隙消耗这个目标的。 N 过高, 虽然增量协作很少, 但由于 N 大时隙消耗仍然很高; N 过低, 则增量协作很多, 时隙消耗也很高。表 2 进一步显示低信噪比下, m_L 与 m_H 相差较大, 高信噪比时相差较小, 这是因为低信噪比时, 本地感知能力弱, 所以 m_L 到 m_H 的范围要大, 以便更多地增量协作, 而高信噪比时, 本地感知能力强, m_L 到 m_H 的范围即使较小也可以满足感知能力要求。这些经验有助于在优化这些参数时, 进一步缩小范围, 减少计算量。对于表 2 中 $K=20$, $n=12$ 情形, 也有类似结果。

表 3 给出了在不同信噪比下传统协作感知算法与增量协作感知算法平均时隙消耗及参数优化情况 ($\bar{Q}_d = Q_d \times 90\%$, $\bar{Q}_f = Q_f \times 110\%$)。与表 2 不同的是, 表 3 降低了全局目标检测概率, 增加了全局目标虚警概率, 即降低了对感知能力的要求。表 3 显示, 感知能力要求的放松导致时隙消耗的降低。例如, 表 3 中信噪比为 4dB 时, 时隙消耗为 8 ($K=12$, $n=7$) 及 13.823 7 ($K=20$, $n=12$), 而表 2 中信噪比为 4dB 时, 时隙消耗为 9.585 4 ($K=12$, $n=7$) 及 16.477 8 ($K=20$, $n=12$), 这样的结果显而易见, 因为感知能力的放松给了 m_L 、 m_H 与 N 更多的自由度, 从而有可能获得更低的时隙消耗。当目标检测概率降低时, 根据式(6) m_L 增加与 m_H 减少可降低检测概率, 根据式(7)也可同时降低虚警概率。而根据式(8), m_L 增加或 m_H 减少均可降低时隙消耗。因此在满足约束条件的前提下, 理论上 m_L 应该尽可能增加且 m_H 应该尽可能减少。在相同信噪比下比较表 2 与表 3, 发现在较低信噪比下 m_L 、 m_H 有明显变化, 表现为 m_L 增加且 m_H 减少, 这与理论一致; 而在高信噪比下两种算法的检测概率均趋于 1, 故 m_L 、 m_H 无明显差别。同时, 在相同信噪比下比较表 2 与表 3,

表 2 增量协作感知算法时隙消耗及参数优化 ($\bar{Q}_d = Q_d \times 99\%$, $\bar{Q}_f = Q_f \times 101\%$)

SNR(dB)		0	2	4	6	8	10
时隙消耗	$K=12, n=7$	10.522 0	10.454 1	9.585 4	8.308 0	6	6
	$K=20, n=12$	17.231 7	17.159 6	16.477 8	13.478 4	11	11
N	$K=12, n=7$	7	7	8	6	6	6
	$K=20, n=12$	11	11	11	12	11	11
m_L	$K=12, n=7$	2	2	3	2	3	3
	$K=20, n=12$	4	4	4	6	7	7
m_H	$K=12, n=7$	6	6	6	5	4	4
	$K=20, n=12$	9	9	9	9	8	8

表 3 增量协作感知算法时隙消耗及参数优化 ($\bar{Q}_d = Q_d \times 90\%$, $\bar{Q}_f = Q_f \times 110\%$)

SNR(dB)		0	2	4	6	8	10
时隙消耗	$K=12, n=7$	8.347 0	8.300 5	8	6	6	6
	$K=20, n=12$	14.489 1	14.407 41	13.823 7	11.895 8	11	11
N	$K=12, n=7$	7	7	8	6	6	6
	$K=20, n=12$	11	11	11	11	11	11
m_L	$K=12, n=7$	3	3	4	3	3	3
	$K=20, n=12$	5	5	5	6	7	7
m_H	$K=12, n=7$	5	5	5	4	4	4
	$K=20, n=12$	8	8	8	8	8	8

发现 N 值并无明显变化, 则说明 N 值对于算法的影响要小于 m_L 、 m_H 。

图 2 给出了在不同信噪比下传统协作感知算法与增量协作感知算法的检测概率比较。其中 (12,7) 表示 $K=12, n=7$, (99%,101%) 表示 $\bar{Q}_d = Q_d \times 99\%$, $\bar{Q}_f = Q_f \times 101\%$, 其他类似。图 2 显示, 传统算法的检测概率大于增量协作感知算法, 主要原因是增量协作感知算法参与协作的中继平均数量减少了。对于 (99%,101%) 情形, 增量协作感知算法的检测概率仅稍低于传统算法, 差距非常小。当全局目标检测概率放松后, 即 (90%,110%) 情形, 增量协作感知算法的检测概率则明显低于传统算法, 这是由于算法的优化目标是最小化时隙开销, 必然会牺牲检测概率。然而, 这种检测概率的降低相比时隙消耗的更大幅度的降低还是值得的。例如, 4dB 时, (12,7)、(99%,101%) 情形时隙消耗是 (12,7)、(90%,110%) 情形时隙消耗的 1.20 倍, 而 (12,7)、(99%,101%) 情形检测概率是 (12,7)、(90%,110%) 情形检测概率的 1.07 倍。又如, 4dB 时, (20,12)、(99%,101%) 情形时隙消耗是 (20,12)、(90%,110%) 情形时隙消耗的 1.20 倍, 而 (20,12)、(99%,101%) 情形检测概率是 (20,12)、(90%,110%) 情形检测概率的 1.02 倍。图 2 还显示, 随着信噪比的增加, 由于本地检测概率越来越高, 导致 2 种算法的检测概率趋于相同。

图 3 给出了在不同信噪比下传统协作感知算法与增量协作感知算法的虚警概率比较。图 3 显示, 如果优化时全局目标检测概率和全局目标虚警概率与传统算法的检测概率与虚警概率非常接近, 则增量协作感知算法所获得的虚警概率低于传统

算法, 原因也是参与协作的中继平均数量减少了。例如, 观察 (99%,101%) 情形, 无论是 (12,7) 还是 (20,12) 时, 虚警概率均低于传统算法, 而且在高信噪比时, 虚警概率低于传统算法更明显, 原因是本地检测概率的提高使得高信噪比时参与协作的中继平均数量(时隙消耗)更少。图 3 还显示, 如果优化时全局目标检测概率和全局目标虚警概率与传统算法的检测概率与虚警概率差距较大时(如 (90%,110%) 情形), 则增量协作感知算法所获得的虚警概率在低信噪比时会高于传统算法, 但是在高信噪比时仍然明显低于传统算法。原因是尽管全局目标的明显降低使得增量算法的虚警概率增加, 但是信噪比的增加使得本地检测概率提高, 参与协作的中继平均数量呈下降趋势, 虚警概率最终降低至传统算法以下。

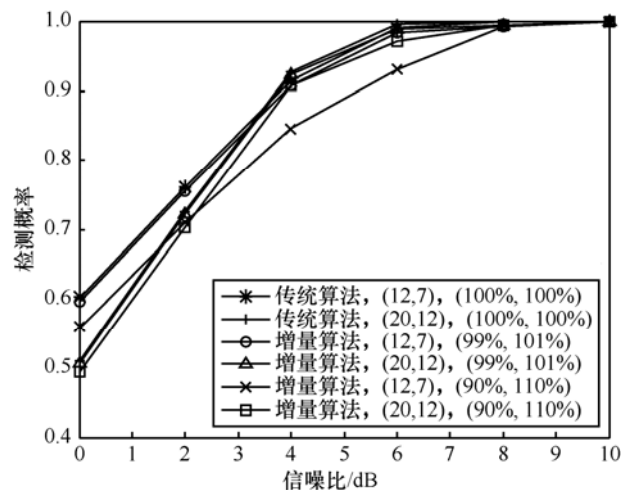


图 2 两种算法的检测概率比较

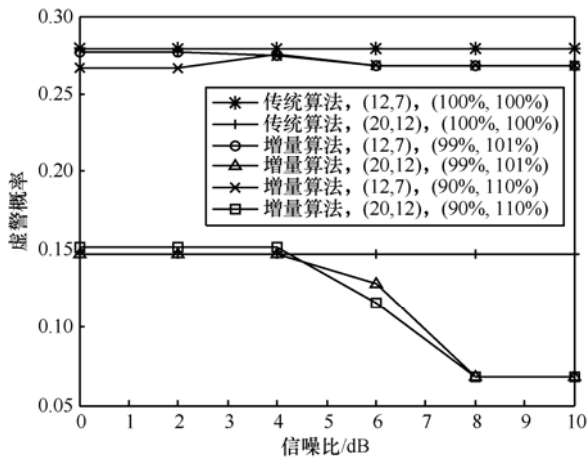


图 3 两种算法的虚警概率比较

5 结束语

本文研究了如何在保证感知能力的前提下减少协作感知时隙消耗。首先,把协作中继分为前后 2 部分,举例分析了存在主用户时传统的基于 n -out-of- K 融合规则的协作感知算法中本地检测到主用户的概率。然后,根据分析结果提出了增量协作感知算法,该算法把协作中继分为 2 部分,依据第一部分中继感知情况决定是否需要第二部分的感知。接着,分析了该算法的检测概率、虚警概率以及平均时隙消耗。为了优化算法,在满足虚警概率与检测概率的前提下,进一步构建最小化时隙消耗的目标函数。最后,进行了计算机模拟,结果表明,增量协作算法的平均时隙消耗明显低于传统协作感知,同时,算法的检测概率接近传统算法,而虚警概率则在某些情形下低于传统算法。

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, VURAN M C, et al. Next generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey[J]. Computer Networks, 2006, 50(13): 2127-2159.
- [3] URKOWITZ H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(4):523-531.
- [4] MYUNG K B, JIN Y K. Effective signal detection using cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems[A]. International Conference on Advanced Communication Technology[C]. Gangwoh-Do, Korea, 2009. 1746-1750.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [7] 张晓格, 张士兵, 邱恭安. 基于第 N 佳中继选择的协作频谱感知检测概率分析[J]. 通信学报, 2011,32(11):176-182.
- ZHANG X G, ZHANG S B, QIU G A. Detection probability analysis of cooperative spectrum sensing with the N th best relay selection[J]. Journal on Communications, 2011,32(11):176-182.
- [8] KYUSUNG H, YOUNGCHAI K, MOHAMEDSLIM A. Performance analysis of incremental opportunistic relaying over identically and non-identically distributed cooperative paths[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(4):1953-1961.
- [9] WAN C, DONG I K, BYOUNGHOON K. Adaptive multi-node incremental relaying for hybrid-ARQ in AF relay networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(2):505-511.
- [10] 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.
- [11] DIGHAM F F, ALOUINI M S, SIMON M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(1):21-24.
- [12] ZWILLINGER D, KOKOSKA S. Standard Probability and Statistics Tables and Formulae[M]. New York: Chapman & Hall/CRC, 2000.

作者简介:



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。



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。

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。