

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.10.011

引用格式: 邴雨晨, 刘红, 杨建波, 等. 一种空中联合作战频谱感知方法[J]. 电讯技术, 2014, 54(10): 1372-1377. [BING Yu-chen, LIU Hong, YANG Jian-bo, et al. A Spectrum Sensing Method for Joint Air Operations[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(10): 1372-1377.]

一种空中联合作战频谱感知方法*

邴雨晨**, 刘红, 杨建波, 刘麟

(空军航空大学, 长春 130022)

摘要: 现代联合作战中, 有效的频谱感知可以提高电磁态势感知能力, 避免自扰互扰问题的出现。通过将传统集中式频谱感知架构中的非指挥节点拆分为次级节点和三级节点, 以能量感知为基本方法并对感知信息进行二次融合, 形成了分布式频谱感知模型。仿真结果表明, 分布式频谱感知模型不但在感知性能上较传统感知模型提高 5% 左右, 而且在感知性能相同的条件下, 指挥节点的带宽拥堵率仅为传统模型的 10% ~ 20%, 达到了提高频谱利用率的目的。

关键词: 空中联合作战; 认知无线电; 频谱感知; 能量检测; 信息融合

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2014)10-1372-06

A Spectrum Sensing Method for Joint Air Operations

BING Yu-chen, LIU Hong, YANG Jian-bo, LIU Lin

(Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: Spectrum sensing can effectively improve the electromagnetic situation awareness and avoid self interference in modern joint operations. This paper proposes a distributed spectrum sensing model which splits the non-command nodes of traditional spectrum sensing model into the secondary nodes and the thirdly nodes. Then a two times information fusion method based on energy sensing is used to reach the goal. The simulation results indication that this model improves the performance of spectrum sensing about 3% and also greatly reduces the bandwidth congestion rates about 10% ~ 20% of command nodes under the same conditions so that the spectrum utilization is improved.

Key words: joint air operations; cognitive radio; spectrum sensing; energy detection; information fusion

1 引言

目前已有大量研究证实, 认知无线电技术可以提高频谱利用率且已经大量应用于民用通信系统, 而动态频谱感知是其中的重点研究方向。动态频谱感知主要指次级用户实时感知指定频段内是否有主用户接入, 并利用主用户空闲时的频谱进行通信, 以缓解频谱拥挤的现状^[1]。现代信息化条件下的空中联合作战电磁环境极为复杂, 使得战略电磁频谱资源显得愈加紧张^[2]。通过对比发现, 由各种空中作战平台组成的联合空中战场可以使用与民用通信

系统相似的频谱感知技术以保证战场关键节点的频谱使用不受己方和敌方干扰。此外, 感知信息还可以结合其他情报信息, 为获取制信息权奠定基础。

在频谱感知领域, 国内外学者做了大量基础理论研究^[3-5], 本文所用的大部分理论都以此为参考。文献[6-8]具体分析了针对 OFDM、DVB-T 等信号的频谱感知理论, 其给出的感知方法和信道环境非常有实用价值。文献[9]提出了基于簇划分的频谱感知模型, 与本文的思路非常吻合, 有很大参考价值。文献[10-14]根据不同的具体应用背景, 提出

* 收稿日期: 2014-01-06; 修回日期: 2014-06-06 Received date: 2014-01-06; Revised date: 2014-06-06

** 通讯作者: 69661604@qq.com Corresponding author: 69661604@qq.com

了多跳、团划分以及对抗篡改频谱感知数据攻击 (Spectrum Sensing Data Falsification, SSDF) 等基于不同架构的频谱感知模型。以上这些文献都广泛应用于民用通信领域,但是针对具体军用或空中作战平台的频谱感知研究相对较少。文献[15]提出了门限可变的无人机的频谱感知方法,可以作为联合空战中局部频谱感知模型的参考。

本文研究意义旨在提高空中作战整体态势感知能力,减少自扰互扰现象发生。在现有认知无线网络架构基础上,结合作战具体实际,提出了空中联合作战分布式频谱感知模型。对传统的战场频谱感知架构和感知信息融合方法进行了改善。经过仿真验证,该方法能够在提升感知效果的同时,降低指挥节点带宽拥堵率,进而有效提高频谱利用率。

2 空中战场频谱感知基本模型

2.1 传统集中式频谱感知架构

联合空中战场主要由作战任务不同的各种空中平台组成,通过在每个作战单元上加装感知设备,可以做到大纵深的战场频谱感知。

传统空中作战集中式频谱感知架构,其简化结构如图 1 所示,大体可以分为指挥节点 (Command Node, CN) 和非指挥节点 (Non-Command Node, NCN)。指挥节点包括预警机、通信指挥机等,负责统筹和分发战场态势、战场情报以及相应的指挥情报;非指挥节点 (Non-Command Node, NCN) 涵盖了远距离/随队电子战飞机、飞行编队、无人机等,主要根据各自作战职能和战场部署的不同完成各自的作战任务。由于整个感知体系分布于空中作战空间,可以实现大范围感知覆盖,很好地形成对战场各区域频谱使用情况的实时感知。

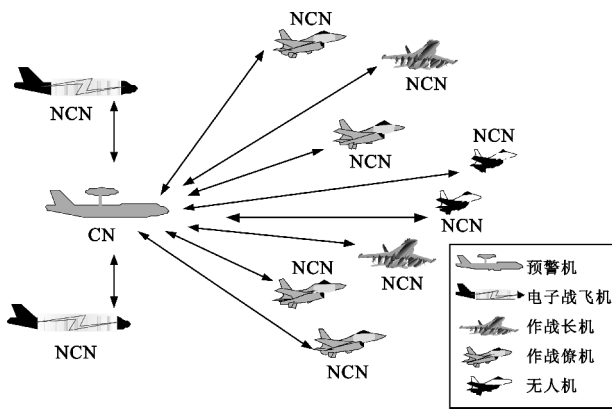


图 1 传统频谱感知架构

Fig. 1 Traditional spectrum sensing architecture

由图 1 可知,传统架构中全部的 NCN 作为感知节点,将感知信息统一传递给 CN, CN 进行融合判决,做出频谱感知最终判决。因篇幅所限,本文仅研究在信号的能量域对其进行感知。

2.2 频谱感知方法与融合判决准则

在空中战场,指挥节点的通信流畅度直接影响着作战指令的传输。为了降低各级节点传递感知信息给 CN 带来的信道负担并加快信息处理速率,选择算法简单、实现容易的能量感知方法,通过感知频段内目标频段是否有能量出现,来判断频谱是否被占用^[3]。基本方法是设立一个假设检验问题,并进行统计判决来实现。假设 H_0 事件为该频段没被占用, H_1 事件为该频段已被占用,则能量感知问题为

$$H_0: y = w$$

$$H_1: y = s + w$$

其中, y 是对该频段的 K 个点的采样值, w 是服从 $N(0, \sigma^2 I)$ 的加性高斯白噪声, s 是该频段用户信号。

对于每级节点感知,单阈值的方法实现简单,时效性强,适用于空中作战的频谱感知^[16]。如图 2 所示,将感知到的能量值 M_i 与预先设定的阈值 λ 进行比较得出判决结果。

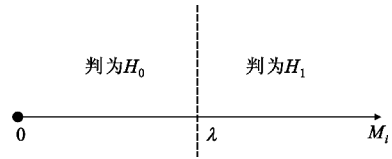


图 2 单阈值能量感知判决

Fig. 2 Single threshold energy sensing judgment

对于第 i 个感知节点的感知能量值为

$$M_i = \|y_i\|^2 = \sum_{m=0}^K |y(m)|^2 \quad (1)$$

其中, M_i 为服从 $2u$ 自由度的 χ^2 分布的统计量:

$$M_i \sim \begin{cases} \chi_{2u}^2(\gamma), & H_1 \\ \chi_{2u}^2, & H_0 \end{cases} \quad (2)$$

式中, γ 为信噪比 (SNR)。对于 M_i 进行如下判决:

- (1) 判决 $H_1: M_i > \lambda$;
- (2) 判决 $H_0: M_i \leq \lambda$ 。

感知性能可以通过两个概率来衡量,即感知概率 P_D 表示在该时刻感知到该频段被占用的概率;虚警概率 P_F 表示在该时刻该频段没有被占用却感知为被占用的概率,表示如下:

$$\begin{cases} P_D = P\{H_1 | H_1\} = P\{M_i > \lambda | H_1\} \\ P_F = P\{H_1 | H_0\} = P\{M_i > \lambda | H_0\} \end{cases} \quad (3)$$

如果感知概率 P_D 过低,会导致各节点无法感知到

该频段使用情况;而 P_f 过高则会导致错误上报感知信息。一般情况下我们考虑在一定虚警概率下,尽可能地提高感知概率,即 Neyman-Pearson 准则。如果通信条件为 AWGN 信道,第 i 个感知节点的感知概率、虚警概率可以进一步表示为^[5]

$$P_d = P\{M_i > \lambda | H_1\} = 1 - F_{\chi^2_{2u}}\left(\frac{2\lambda}{1+\gamma}\right) \tag{4}$$

$$P_f = P\{M_i > \lambda | H_0\} = 1 - F_{\chi^2_{2u}}(2\lambda) \tag{5}$$

式中,函数 $F_{\chi^2_{2u}}(\cdot)$ 是 $2u$ 自由度的 χ^2 分布的累积分布函数, u 是时宽带宽积。

指挥节点处理所有感知节点的感知信息并进行融合判决。融合判决方法主要包含软判决和硬判决等,软判决算法需要传输感知源信息,需要大量带宽,在节点较少时较实用。硬判决中简单融合准则(与、或、多数)时效性强且不需要占用大量带宽。

根据不同的判决准则,指挥节点感知概率 Q_d 和虚警概率 Q_f 可以统一表示为^[17]

$$Q_d = P\{H_1 | H_1\} = \sum_{l=k}^N \binom{N}{l} P_d^l (1-P_d)^{N-l} \tag{6}$$

$$Q_f = P\{H_1 | H_0\} = \sum_{l=k}^N \binom{N}{l} P_f^l (1-P_f)^{N-l} \tag{7}$$

式中,当 k 分别取值 1 和 N 时,分别为“或”和“与”准则;当 $k \geq N/2$ 时,就是“多数”准则。

3 联合空战频谱感知模型

3.1 三级分布式频谱感知架构

随着现代空战规模不断扩大,传统感知方法因隐终端、电子干扰、信道衰落等原因^[18],很难保证整个战场频谱信息的完整性。同时,传统方法还增加了指挥节点通信流量,导致信道拥堵。

通过改进传统感知架构,本文建立了联合空战分布式频谱感知架构,其简化结构如图 3 所示。

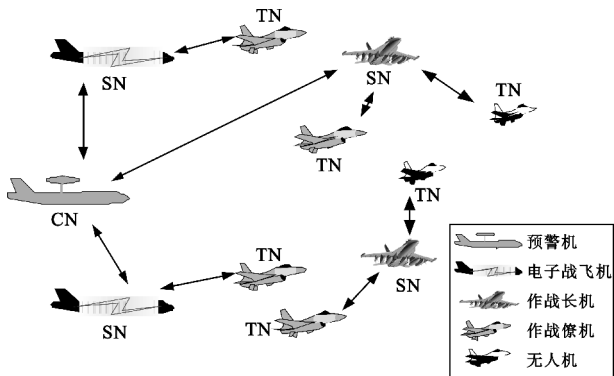


图 3 分布式频谱感知架构

Fig. 3 Distributed spectrum sensing architecture

依据作战任务轻重,将传统架构中 NCN 拆分为次级节点(Secondary Node, SN)和三级节点(Thirdly Node, TN)。次级节点包括飞行编队长机、远距离/随队电子战飞机等,三级节点包括无人机、飞行编队僚机等。由于根据节点等级分为三级传输,很大程度上避免了由于信道不理想带来的感知信息不完整以及指挥节点通信拥堵等问题。

3.2 基于能量感知的二次融合判决准则

本文利用分布式频谱感知的优势,设计了二次融合判决准则:首先若干个 TN 将感知信息发送给对应的 SN 融合后进行一次判决,而后各 SN 将感知信息发送给 CN 融合后进行二次判决形成感知结果。

在一次判决中,设有 N_1 个 SN,每个 SN 分别掌控 N_2 个 TN 的传输信息, M_i^{TN} 代表第 i 个 TN 的接收能量,可由式(1)计算。 D_i^{TN} 为第 i 个 TN 的判决输出,判决准则为

$$D_i^{TN} = \begin{cases} 1, & M_i^{TN} > \lambda \quad \text{判决 } H_1 \\ 0, & M_i^{TN} \leq \lambda \quad \text{判决 } H_0 \end{cases} \tag{8}$$

N_2 个 TN 将判决结果传输给对应的 SN,利用“多数”准则进行一次融合判决,则第 j 个 SN 的输出结果为

$$D_j^{SN} = \begin{cases} 1, & D_j + \sum_{i=1}^{N_2} D_i^{TN} \geq \frac{N_2}{2} + 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{9}$$

式中, D_j 为该 SN 自身对于同样频段的判决信息,条件与上述判决准则相同。

在次级判决时, N_2 个 SN 将判决结果传输给对应的 CN 进行最终融合判决,同样采用“多数”准则:

$$D^{CN} = \begin{cases} 1, & D + \sum_{j=1}^{N_1} D_j^{SN} \geq \frac{N_1}{2} + 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{10}$$

式中, D 为 CN 自身对该频段的感知结果, D^{CN} 为最终的感知结果。

下面讨论各节点的感知性能,一次融合时,所有 TN 将感知信息传递给 SN,设 TN 的感知信噪比为 γ^{TN} 并代入式(4)~(5)得到第 i 个 TN 的感知概率 $P_{d,i}^{TN}$ 和虚警概率 $P_{f,i}^{TN}$,再代入式(6)~(7)得

$$Q_d^{TN} = \sum_{l=\frac{N_2}{2}+1}^{N_2} \binom{N_2}{l} (P_{d,i}^{TN})^l (1-P_{d,i}^{TN})^{N_2-l} \tag{11}$$

$$Q_f^{TN} = \sum_{l=\frac{N_2}{2}+1}^{N_2} \binom{N_2}{l} (P_{f,i}^{TN})^l (1-P_{f,i}^{TN})^{N_2-l} \tag{12}$$

式中, Q_d^{TN} 和 Q_f^{TN} 是每个 SN 收到的全部 TN 协同感知和虚警概率。当各 SN 加入自身感知信息时,一

次融合的感知概率 $Q_{d,j}^{\text{SN}}$ 与虚警概率 $Q_{f,j}^{\text{SN}}$ 为

$$\begin{aligned} Q_{d,j}^{\text{SN}} &= P\{D_j^{\text{SN}} = 1 | H_1\} = \\ &P\{D_j = 0 | H_1\} P\left\{\sum_{i=1}^{N_2} D_i^{\text{TN}} \geq \frac{N_2}{2} + 1 | H_1\right\} + \\ &P\{D_j = 1 | H_1\} P\left\{\sum_{i=1}^{N_2} D_i^{\text{TN}} \geq \frac{N_2}{2} | H_1\right\} = \\ &(1 - P_{d,j}^{\text{SN}}) Q_D^{\text{TN}} \Big|_{k=\frac{N_2}{2}+1} + P_{d,j}^{\text{SN}} \cdot Q_D^{\text{TN}} \Big|_{k=\frac{N_2}{2}} \quad (13) \\ Q_{f,j}^{\text{SN}} &= P\{D_j^{\text{SN}} = 1 | H_0\} = \\ &P\{D_j = 0 | H_0\} P\left\{\sum_{i=1}^{N_2} D_i^{\text{TN}} \geq \frac{N_2}{2} + 1 | H_0\right\} + \\ &P\{D_j = 1 | H_0\} P\left\{\sum_{i=1}^{N_2} D_i^{\text{TN}} \geq \frac{N_2}{2} | H_0\right\} = \\ &(1 - P_{f,j}^{\text{SN}}) Q_F^{\text{TN}} \Big|_{k=\frac{N_2}{2}+1} + P_{f,j}^{\text{SN}} \cdot Q_F^{\text{TN}} \Big|_{k=\frac{N_2}{2}} \quad (14) \end{aligned}$$

式中, $P_{d,j}^{\text{SN}}$ 、 $P_{f,j}^{\text{SN}}$ 为第 j 个 SN 自身的感知概率和虚警概率, 可以令 SN 感知信噪比为 γ^{SN} 并代入式(4) ~ (5) 得到。

二级融合情况类似于一级融合, 根据式(13) 和 (14) 可以直接得到 CN 的感知概率 Q_d^{CN} 与虚警概率 Q_f^{CN} 为

$$\begin{aligned} Q_d^{\text{CN}} &= P\{D_j^{\text{CN}} = 1 | H_1\} = \\ &P\{D = 0 | H_1\} P\left\{\sum_{j=1}^{N_1} D_j^{\text{SN}} \geq \frac{N_1}{2} + 1 | H_1\right\} + \\ &P\{D = 1 | H_1\} P\left\{\sum_{j=1}^{N_1} D_j^{\text{SN}} \geq \frac{N_1}{2} | H_1\right\} = \\ &(1 - P_d^{\text{CN}}) Q_D^{\text{SN}} \Big|_{k=\frac{N_1}{2}+1} + P_d^{\text{CN}} \cdot Q_D^{\text{SN}} \Big|_{k=\frac{N_1}{2}} \quad (15) \\ Q_f^{\text{CN}} &= P\{D_j^{\text{CN}} = 1 | H_0\} = \\ &P\{D = 0 | H_0\} P\left\{\sum_{j=1}^{N_1} D_j^{\text{SN}} \geq \frac{N_1}{2} + 1 | H_0\right\} + \\ &P\{D = 1 | H_0\} P\left\{\sum_{j=1}^{N_1} D_j^{\text{SN}} \geq \frac{N_1}{2} | H_0\right\} = \\ &(1 - P_f^{\text{CN}}) Q_F^{\text{SN}} \Big|_{k=\frac{N_1}{2}+1} + P_f^{\text{CN}} \cdot Q_F^{\text{SN}} \Big|_{k=\frac{N_1}{2}} \quad (16) \end{aligned}$$

式中, P_d^{CN} 、 P_f^{CN} 为 CN 自身的感知概率和虚警概率, 可以令 CN 感知信噪比为 γ^{CN} 并代入式(4) ~ (5) 得到。

通常情况, 频谱资源与信息传输速率成正相关, 相同时间内传输信息量越大所需带宽越大。当带宽一定时, 传输信息量越大则 CN 需处理信息越多。为了对比两种模型下 CN 的拥堵情况, 定义带宽拥堵率

$$\eta = \frac{n \sum_{i=1}^{N_1} R_i \xi_i}{B}$$

式中, B 为 CN 接收带宽, n 是 SN 感知的频段数, R_i 是 SN 上传的信息速率, $\xi_i \in [0, 1]$ 是描述信道环境的影响因子。

4 模型仿真及性能对比

仿真假设 CN 的数量为 1, 本文模型 $N_1 = 20$, $N_2 = 50$, 传统模型 $N = N_1 \times N_2 = 1\,000$, 三类节点 $\gamma^{\text{CN}} = \gamma^{\text{SN}} = \gamma^{\text{TN}} = 10\text{ dB}$, $\sigma^2 = 1$, $u = 5$ 。

空中作战电磁环境复杂, 主要是敌方干扰比较严重, 为了模拟复杂电磁环境下模型的工作性能, 我们随机选定 m ($m < N_1 \times N_2$) 个 TN (传统模型中为 m 个 NCN), 通过设置较低的信噪比 γ_m^{TN} 来模拟其遭受电子干扰等负面影响, 即 m 越小或 γ_m^{TN} 越大, 信道环境越好。通过绘制接收机工作特性曲线 (ROC) 对仿真结果进行对比, 如图 4 所示。

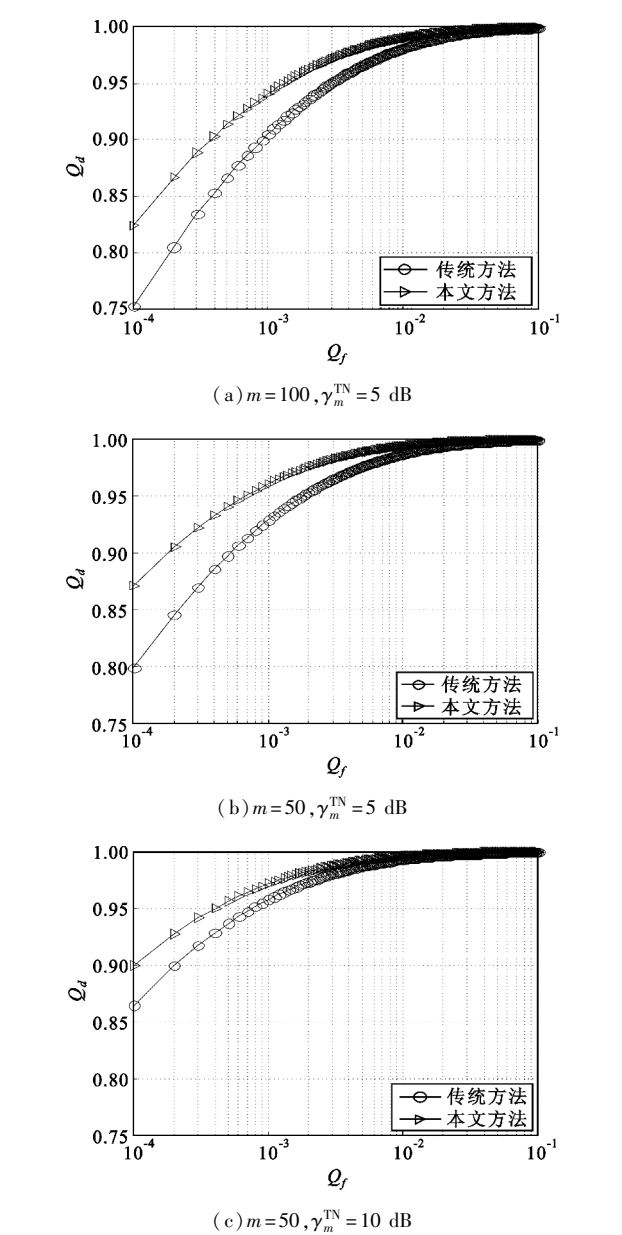


图 4 不同电磁环境下感知性能对比
Fig. 4 Sensing performance comparison in different electromagnetic environment

由图中结果可以看出,在 3 种不同电磁环境下,无论是改变 m 还是改变 γ_m^{TN} ,本文感知模型性能均优于传统感知模型。本文模型感知性能提升的主要原因是分布式感知降低了 TN 感知结果对 CN 判决的直接影响。

感知时间性能上,假设 CN 和 SN 拥有相同的数据处理能力,且感知信息大小相同,则感知时间对比如表 1 所示。可以看出当 N_1 、 N_2 较大时,本文方法在感知时间上会明显快于传统方法。

表 1 感知时间性能对比	
Table 1 Comparison of sensing time performance	
方法	时间
本文方法	N_1+N_2
传统方法	$N_1\times N_2$

如果我们假设感知的频段数 $n=20$,感知带宽 $B=10\text{ MHz}$, $\xi_i\sim N(0,1)$ 。传统方法 $R_i=100\text{ b/s}$,本文方法 $R_i=1\text{ kb/s}$,其他参数不变以保证相同的感知性能。通过设置不同的 N_1 和 N_2 ,以 CN 的拥堵率作为仿真结果来对比两种方法的频谱利用率,结果如图 5 所示。

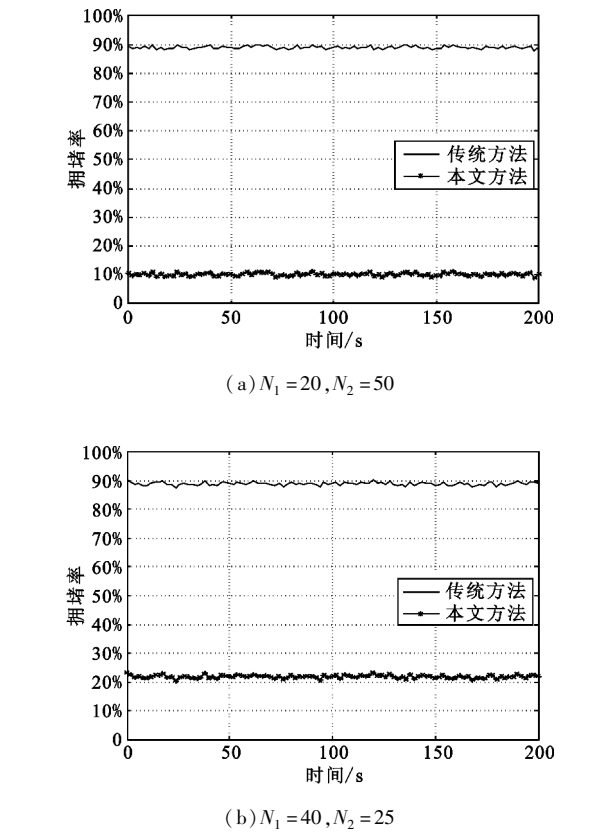


图 5 CN 拥堵率对比
Fig. 5 Congestion rates comparison of CN

通过对比可以看出,传统模型由于将全部感知信息汇总给 CN,使其始终处于拥堵状态,频谱带宽严重不足。本文模型的拥堵率受 SN 数目影响,在文中所设的相同感知性能前提下,其拥堵率明显小于传统模型,因此本文模型可以达到优化频谱利用率的效果。

5 结 论

本文提出了一种适用于空中联合作战的频谱感知架构,将传统架构中 NCN 拆分为 SN 和 TN,形成三级节点分布式频谱感知架构;设计了二次融合的频谱感知信息融合方法,通过实现 TN-SN-CN 的两次判决融合过程确定最终感知结果。仿真结果显示,在感知性能上本文模型相比于传统模型提高 5% 左右,但带宽拥堵率仅为传统模型的 10% ~ 20%,且时间复杂度远低于传统模型。本文仅在能量域进行研究,没有涉及具体信号形式。下一步研究重点主要是增加对信号调制类型和参数的感知识别。

参考文献:

[1] Bruce A F. Cognitive Radio Technology[M]. San Diego, USA:Elsevier Inc. ,2006:118-122.

[2] 郭庆丰,崔贤良. 空军电子对抗作战中频谱管理初探[J]. 空军工程大学学报(军事科学版),2005,5(4):33-34.

GUO Qing-feng, CUI Xian-liang. Study of Spectrum Management in Air Force Electronic Warfare[J]. Journal of Air Force Engineering University(Military Science Edition),2005,5(4):33-34. (in Chinese)

[3] Axell E, Leus G, Larsson E G. Overview of spectrum sensing for cognitive radio[C]// Proceedings of 2010 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing (CIP). Elba: IEEE, 2010: 322-327.

[4] Axell E, Leus G, Larsson E G, et al. Spectrum sensing for cognitive radio: State-of-the-art and recent advances[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2012, 29(3): 101-116.

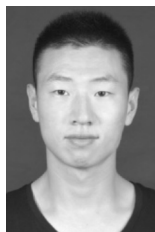
[5] Kay S M. Fundamentals of statistical signal processing (Vol. II: Detection Theory) [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998: 113-117.

[6] Danev D, Axell E, Larsson E G. Spectrum sensing methods for detection of DVB-T signals in AWGN and fading channels[C]// Proceedings of 2010 IEEE 21st International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications(PIMRC). Istanbul, Turkey: IEEE, 2010: 2721-2726.

[7] Axell E, Larsson E G. Optimal and near-optimal spectrum

- sensing of OFDM signals in AWGN channels[C]// Proceedings of 2010 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing (CIP). Elba Island, Italy: IEEE, 2010:128-133.
- [8] Axell E, Larsson E G. Optimal and sub-optimal spectrum sensing of OFDM signals in known and unknown noise variance[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2): 290-304.
- [9] Sun C, Zhang W, Ben K. Cluster-based cooperative spectrum sensing in cognitive radio systems[C]// Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Communications. Glasgow, Scotland: IEEE, 2007: 2511-2515.
- [10] Rawat A S, Anand P, Chen H, et al. Collaborative spectrum sensing in the presence of Byzantine attacks in cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(2): 774-786.
- [11] 胡罡, 徐明, 刘丽霞, 等. 无线认知网络中一种团划分的频谱感知算法[J]. 软件学报, 2011, 22(2): 298-312.
- HU Gang, XU Ming, LIU Li-xia, et al. Spectrum Sensing Algorithm Based on Clique Partition for Wireless Cognitive Networks[J]. Journal of Software, 2011, 22(2): 298-312. (in Chinese)
- [12] 陈小波, 陈红, 蔡晓霞, 等. 基于分形盒维数的双门限合作频谱感知方法[J]. 电讯技术, 2011, 51(8): 75-79.
- CHEN Xiao-bo, CHEN Hong, CAI Xiao-xia, et al. Double Threshold Cooperative Spectrum Sensing Method Based on Fractal Box Dimension[J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(8): 75-79. (in Chinese)
- [13] 栾红志, 李鸥. 基于删除的协作频谱感知分析与优化[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11): 2566-2571.
- LUAN Hong-zhi, LI Ou. Analysis and Optimization of Censor-based Cooperative Spectrum Sensing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(11): 2566-2571. (in Chinese)
- [14] Fan R, Jiang H, Guo Q. Joint optimal cooperative sensing and resource allocation in multichannel cognitive radio networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2): 722-729.
- [15] 郝博雅, 周辉, 孙斌. 双机协作的频谱感知算法[J]. 四川兵工学报, 2012, 33(2): 114-116.
- HAO Bo-ya, ZHOU Hui, SUN Bin. A Collaboration Spectrum Sensing Algorithm Based on Double Aircraft[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2012, 33(2): 114-116. (in Chinese)
- [16] 朱江, 黄本雄, 王芙蓉, 等. 认知无线网络中的一种新型协作频谱感知方法[J]. 小型微型计算机系统, 2010, 31(2): 193-197.
- ZHU Jiang, HUANG Ben-xiong, WANG Fu-rong, et al. Novel Method of Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2010, 31(2): 193-197. (in Chinese)
- [17] 温志刚. 认知无线电频谱检测理论与实践[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2011: 48-58.
- WEN Zhi-gang. Cognitive Radio Frequency Spectrum Detection Theory and Practice[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2011: 48-58. (in Chinese)
- [18] 张平, 冯志勇. 认知无线网络[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 122-127.
- ZHANG Ping, FENG Zhi-yong. Cognitive Radio Network[M]. Beijing: Science Press, 2010: 122-127. (in Chinese)

作者简介:



邴雨晨(1989—),男,吉林长春人,2012年获学士学位,现为硕士研究生,主要研究方向为电子对抗与认知无线网络;

BING Yu-chen was born in Changchun, Jilin Province, in 1989. He received the B. S. degree in 2012. He is now a graduate student. His research concerns electronic countermeasure and cognitive radio network.

Email: 69661604@qq.com

刘红(1975—),女,吉林长春人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为电子通信和神经网络;

LIU Hong was born in Changchun, Jilin Province, in 1975. She is now an associate professor and also the instructor of graduate students. Her research concerns communication and neural network.

杨建波(1962—),男,吉林长春人,教授、硕士生导师,主要研究方向为电子对抗;

YANG Jian-bo was born in Changchun, Jilin Province, in 1962. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns electronic countermeasure.

刘璘(1962—),男,广西昭平人,副教授、硕士生导师,主要研究方向为电子对抗。

LIU Lin was born in Zhaoping, Guangxi Zhuang Autonomous Region, in 1962. He is now a professor and also the instructor of graduate students. His research concerns electronic countermeasure.