



最快检测技术在飞机机舱内频谱感知中的应用*

Application of Quickest Detection Technology for Aircraft Cabin Spectrum Sensing

宋晓鸥¹ 向新^{2/1} 武警工程大学信息工程系 2 空军工程大学航空航天工程学院

摘要: 为了更好地在飞机机舱内复用宝贵的无线频谱,将认知无线电技术应用于无线内通系统中是非常有必要的,然而在机舱内实现快速可靠的频谱感知则是实现高效频谱复用的基础。本文以此目的,研究了基于最快检测技术的频谱感知算法在机舱内频谱感知中的适用性。在分析了频谱感知性能需求的基础上,将频谱感知问题归结为非贝叶斯最快检测问题,并介绍了基于累积和Cumulate Sum的频谱感知算法的具体检测步骤。分析结果表明,基于最快检测的频谱感知算法可以解决常规的频谱感知算法检测延迟长、存在信噪比门限效应的问题。

Abstract: In order to take full advantage of the valuable radio frequency spectrum inside the aircraft cabin, it is necessary to apply cognitive radio in wireless cabin communication system. However, the fast and reliable frequency spectrum sensing is the base of achieving efficient reuse spectrum. So, this paper studied the adaptation of spectrum sensing algorithm based on quickest detection, and deduced the spectrum sensing problem as Non-Bayesian quickest detection problem on the basis of analyzing the spectrum sensing performance requirement, and introduced the detailed detection steps of spectrum sensing algorithm based on CUSUM (Cumulate Sum). The result shows that the algorithm can conquer the problem of long detection delay and SNR wall phenomenon.

关键词: 最快检测; 累积和; 认知无线电; 无线内通; 飞机机舱

Keywords: quickest detection; cumulate sum; cognitive radio; wireless cabin communication; aircraft cabin

0 引言

随着航空科学技术的发展,人们越来越需要高效快捷的出行方式,但同时也忍耐着飞机机舱内对无线设备使用限制的特殊苛刻要求。近年来,无线接入以及移动通信的发展已经开始将触角伸入机舱领域,希望能够在满足机舱内无线环境要求的条件下提供高速方便的无线通信服务。从这个角度讲,认知无线电技术被认为是非常适宜的,其重要的技术前提就是实现有效快速的频谱感知^[1],需要注意的是本文的主用户是指航空机载电子设备。通过前期的研究可以认为,航空机舱内的无线电频谱感知一般要求感知速度快、对噪声具有鲁棒性、能够在低信噪比条件下工

作。目前常用的频谱感知手段包括:能量检测、匹配滤波检测和周期平稳过程特征检测等方法^[2-4]。上述常用的检测算法具有一些共同的缺点。

1) 它们都是基于固定观测次数的块检测(block detection)算法,在达到规定的观测次数后,必须作出假设成立的判决^[5-6],而信号的功率信噪比可能有大,且功率信噪比与所需的观测次数成反比,因此块的长度很难确定,而且当主用户信号在块中间出现时,也只能在块结尾处做出判决,无法获得最优检测延迟,然而检测延迟是频谱感知的一个重要性能指标。

2) 这些检测算法在低信噪比的情况下均存在信噪比门限效应(SNR WALL)

^[7],即如果接收信号信噪比低于某一门限值时,不管在多长的时间块范围内计算信号判决统计量,检测算法都将失效。

为了解决以上频谱感知算法中存在的问题,已有文献研究了将最快检测技术应用于认知无线电频谱感知中^[6,8-9]。“最快检测”是通过检测序列的分布变化点来实现在一定错误检测概率条件下的快速检测,其特点是检测延迟小。

1 频谱感知算法性能需求分析

在认知无线电技术中,频谱感知过程可被描述为区分如下两种检验假设:

1) H_0 假设:观测信号采样值无主用户信号存在,接收端只存在噪声信号;

2) H_1 假设:观测信号采样值存在主用户信号,接收端同时接收到噪声信号和主用户信号。

* 基金项目: 航空科学基金(20095596014)资助项目。

为了衡量频谱感知性能的好坏,通常采用如下性能指标^[5,6,8]:

1) 虚警概率即 $P(H_0/H_1)$: H_0 假设下,判决 H_1 假设成立的概率;

2) 检测概率即 $P(H_1/H_1)$: H_1 假设下,判决 H_1 假设成立的概率;

3) 虚警平均运行长度 $\bar{T}_0$: 观测信号采样值满足 H_0 假设时,检测算法平均运行 $\bar{T}_0$ 时间,概率近似为1的产生一次虚警,如图1所示;

4) 检测平均运行长度 $\bar{T}_1$ (即平均检测延迟): 观测信号采样值满足 H_1 假设时,发出报警的时刻 T 和主用户信号实际出现时刻 t 之间的平均时间间隔,如图1所示。

在认知无线电系统中,检测概率高的信号检测算法可以保证即便认知用户系统在主用户系统有效通信范围的边缘,也可以检测到主用户信号的出现,这样可以尽量避免认知用户系统在空间上对主用户系统造成的干扰。但是必须在一定的虚警概率限制下考虑如何提高检测概率,因为过高的虚警概率将降低认知用户对频谱空洞的利用效率。虚警平均运行长度 $\bar{T}_0$ 越长表示认知用户可以更长时间的占用空闲的授权频带进行通信,而不会频繁的更换信道。检测平均运行长度 $\bar{T}_1$ 越短表示认知用户可以更快的检测出主用户信号的出现,及时退出正在使用的授权频段,尽可能减小认知用户系统在时间上对主用户系统造成的干扰。

选择虚警概率和检测概率作为性能指标时,并未充分考虑虚警和检测过程所经历的观测时间长度。不同检测算法当其虚警概率相同时,虚警过程所经历的平均观测时间长度有可能不同;当其检测概率相同时,检测过程所经历的平均观测时间长度也有可能不同。认知无线电系统中认知用户采用伺机频谱接入的方式动态占用空闲的授权频段,主

用户并不会因为认知用户的存在对其系统做任何改变,空闲授权频段内的主用户信号再次恢复传输后,认知用户信号必定对其造成严重干扰,此时频谱感知算法需要以尽可能快的速度检测出主用户信号的出现,因此这两个平均观测时间长度(即虚警平均运行长度和检测平均运行长度)在强调实时性的认知无线电频谱感知过程中是更有意义的。

常规频谱感知算法属于块检测算法,采用的判决准则为奈曼-皮尔逊准则,此时为了获得最佳判决,块长 N 需要自适应取值,这在实际检测过程中是难以实现的,所以考虑事先不规定块长,将序列检测理论应用于频谱感知中是非常有必要的。

最快检测技术本质上是序列变化点检测,其属于序列检测中的一种,但存在其特异性:在经典的序列检测问题中,观测序列始终满足同一种分布特性,检测的目的就是在几种可能的分布中为观测序列确定与其最为近似的一种分布;但序列变化点检测问题中,观测初期观测序列满足一种分布,在某未知时刻观测序列分布发生变化,序列变化点检测的目的是检测分布变化点。频谱感知过程中主用户信号的出现和消失都将引起观测信号采样值的分布变化,因此频谱感知过程可被建模为一种序列变化点检测过程^[6],进而将最快检测技术应用认知无线电频谱感知中是有理论依据的,下面首先简要介绍最快检测技术。

2 最快检测技术

序列变化点检测的研究起源于19世纪30年代,起初是为了解决工业生产中产品质量的监控问题^[10]。近年来,序列变化点检测在很多领域引起了广泛关注,包括气象观测、经济

分析、信号处理、图像分析、医学诊断、航海、遥感等领域^[11-13]。其中在一些领域中应用序列变化点检测技术时,并不要求进行实时性检测,如图像分析和历史文献分析等,此时变化点检测过程是基于一组已经存在的时间或空间观测序列进行的,非实时检测的目的更侧重于精确的定位分布变化点和构建变化点前后的统计模型。然而在某些领域中,要求对序列变化点进行实时的检测,如地震监控、重症病人监护、无线电频谱监听、网络安全等,实时检测的目的是尽量缩短检测延迟,以便及时采取应急措施。这种实时的序列变化点检测即为最快检测问题,其具体定义如下:在实时观测过程中,当观测序列分布发生突变后,以最快的速度将分布变化点检测出来的技术。

最快检测根据分布变化点 t 的先验概率已知情况不同,分为两种类型:贝叶斯最快检测和非贝叶斯最快检测。贝叶斯最快检测问题最初由Kolmogorov和Shiryaev提出^[14],假设随机观测序列在某未知时刻 t 发生分布变化,分布变化点 t 是一个随机变量,并且已知其先验概率函数 $P(t)$,因此该检测问题具备一个贝叶斯框架,即根据某判决时刻 T 之前观测信号采样值 $\{x_1, x_2, \dots, x_T\}$ 判断此时出现分布变化的后验概率 $P(t \leq T / \{x_1, x_2, \dots, x_T\})$ 首次超越某一门限时发出报警。非贝叶斯最快检测问题最初由Lorden提出^[15],假设随机观测序列在某未知时刻 t 发生分布变化,但是不存在确定的先验概率函数 $P(t)$,其先验概率函数取决于分布变化时刻 t ,即每个分布变化点 t 对应一种先验概率函数 $P_t(t)$ 。在频谱

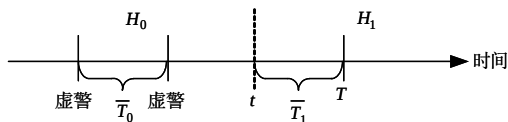


图1 虚警和检测平均运行长度示意图



感知过程中,主用户信号的出现和消失都将引起观测信号采样值的分布变化,但分布变化点的先验概率分布函数是未知的,所以基于主用户信号检测的频谱感知过程属于非贝叶斯最快检测问题。

非贝叶斯最快检测问题选择虚警平均运行长度和检测平均运行长度作为性能指标。非贝叶斯最快检测的判决准则为:满足虚警平均运行长度大于某个常数的情况下,使最大检测平均运行长度 $d(T)$ 最小化,其可以表示为:

$$\inf_{T \in T} d(T) \text{ 满足 } \bar{T}_0 \geq \gamma \quad (1)$$

其中, γ 是一个有限的正常数,表示虚警平均运行长度的下限; $\inf$ 表示下确界^[15]; $\gamma=\{T=K, K \geq 0\}$,表示所有可能判决时刻。本文只考虑时间离散的非贝叶斯最快检测问题,解决该问题的核心方法是累积和(Cumulate Sum, CUSUM)算法^[16]。

频谱感知过程中对非贝叶斯最快检测问题性能指标的要求为:

1) 当认知用户在占用空闲的授权频段进行通信时,虚警平均运行长度越大越好,这样防止了因为虚警现象而过于频繁的更换频段;

2) 当空闲频带上的主用户信号恢复传输时,检测平均运行长度越小越好,这样可以保证认知用户尽可能快的检测出主用户信号,避免认知用户对主用户系统造成严重干扰。

综上,非贝叶斯最快检测问题的判决准则可以满足频谱感知过程对其性能指标的要求。

3 基于CUSUM的认知无线电频谱感知算法

Page于1954年开发的累积和(CUSUM)算法是非贝叶斯最快检测的核心算法,文献[16]采用最优停止理论方法证明CUSUM算法检测延迟最优性,下

面具体介绍基于CUSUM的认知无线电频谱感知算法具体步骤,以检测空闲授权频带上主用户信号出现过程为例进行说明。

1) 顺序观测信号采样值,假设观测信号采样序列为 $\{x_i\}_{i=1}^{\infty}$;

2) 在某一未知时刻 $t(t \geq 1)$,由于主用户信号的出现观测信号采样值发生了分布变化,即 $x_1, x_2, \dots, x_{t-1}$ 满足独立同分布,且有确定的概率分布函数 Q_0 ,满足 H_0 假设; $x_t, x_{t+1}, \dots$ 同样满足独立同分布,且有确定的概率分布函数 Q_1 ,满足 H_1 假设。在讨论某时刻 m 假设 H_1 成立的可能性时需首先分析如下变量:

$$\max_{0 \leq v \leq m} (L(x_m) - L(x_v)) = L(x_m) - \min_{0 \leq v \leq m} L(x_v) \quad (2)$$

其中, $L(x_m)$ 为观测统计量,

$$L(x_m) = \sum_{i=1}^m \ln \frac{dQ_1(x_i)}{dQ_0(x_i)}, L(x_0)=0 \quad (3)$$

3) CUSUM算法中的判决统计量为:

$$Z_m = L(x_m) - \min_{0 \leq v \leq m} L(x_v) \quad (4)$$

式(4)可以被写成以下迭代形式:

$$\begin{cases} Z_0 = 0 \\ Z_m = \left[Z_{m-1} + \ln \frac{dQ_1(x_m)}{dQ_0(x_m)} \right]^+ \end{cases} \quad (5)$$

其中,

$$\begin{aligned} & \left[Z_{m-1} + \ln \frac{dQ_1(x_m)}{dQ_0(x_m)} \right]^+ \\ &= \max \left(\left[Z_{m-1} + \ln \frac{dQ_1(x_m)}{dQ_0(x_m)} \right], 0 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

4) CUSUM算法的检测终止时间为:

$$T_h^C = \inf \{m \geq 0 | Z_m \geq h\} \quad (6)$$

其中, h 为判决门限。

分析可知,CUSUM算法直接将序列观测信号采样值的所有信息加以整合,就能将微小的偏移量聚集成一个异常的波动反映在控制图上,因此CUSUM算法可以探测任何程度的观测信号统计量平均值的变化,进而克服了信噪比门限效应。

4 结论

本文针对飞机机舱内无线环境频谱感知的特殊需求对频谱感知问题进行了说明,首先分析了常规频谱感知算法存在一些共同的缺点,即无法获得最优的检测延迟、存在信噪比门限效应。在研究了认知无线电频谱感知性能需求的基础上,指出在一定的虚警概率下检测延迟越短越有意义,进而说明最快检测的判决准则适合于实现高效的频谱感知。本文进一步将频谱感知归结为非贝叶斯最快检测问题,具体介绍了采用CUSUM算法检测主用户信号。分析可知,基于CUSUM的频谱感知算法在获得最优检测延迟的基础上,克服了信噪比门限效应。研究结果可以为在飞机机舱无线环境下提供认知无线电通信服务提供技术支撑。 **AST**

参考文献

- [1] C. Heller, C. Blumm, S. Bouckaert, W. Liu, I. Moerman. Spectrum sensing for cognitive wireless applications inside aircraft cabins[C]. Digital Avionics Systems Conference (DASC), 2012: 1-19.
- [2] Shaowei Wang, Zhihua Zhou, Mengyao Ge, Chonggang Wang. Resource Allocation for Heterogeneous Cognitive Radio Networks with Imperfect Spectrum Sensing [J]. Selected Areas in Communications, 2013, 31(3): 464-475.
- [3] Huang Dongyan, Kang Guixia, Wang Bo, Tian Hui. Energy-Efficient Spectrum Sensing Strategy in Cognitive Radio Networks [C]. Communications Letters, IEEE. 2013, 17(5): 928-931.
- [4] Peng Zhang, R. Qiu. GLRT-Based Spectrum Sensing with Blindly Learned Feature under Rank-1 Assumption [C]. Communications, IEEE Transactions on, 2013: 87-96.



[5] J.G. Proakis, 汤俊, 统计信号处理算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 250–267.

[6] L. Lai, Y. Fan, H.V. Poor. Quickest Detection in Cognitive Radio: A Sequential Change Detection Framework[A]. Proceeding of GLOBECOM. New Orleans: IEEE, 2008: 1–6.

[7] R. Tandra, A. Sahai. SNR walls for signal detection[J]. IEEE Journal on Special Topics in Signal Processing, 2008, 2(2): 4–17.

[8] H. Li, C. Li, H. Dai. Quickest spectrum sensing in cognitive radio[A]. Proceedings of Information Science and Systems[C]. Princeton, NJ: 2008.

[9] Q. Zhao, J. Ye. When to Quit for A New Job: Quickest Detection of Spectrum Opportunities in Multiple Channels[A].

Proceedings of Communications Conference—MILCOM[C]. 2008: 403–408.

[10] G. B. Wetherhill, D.W. Brown. Statistical Process Control [M]. London: Chapman and Hall, 1991.

[11] C. Han, P.K. Willett, D.A. Abraham. Some methods to evaluate the performance of Page's test as used to detect transient signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1999, 47(8): 2112–2127.

[12] M. Marcus, P. Swerling. Sequential detection in radar with multiple resolution elements[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1962, 8(3): 237–245.

[13] R. Trivedi, R. Chandramouli. Secret key estimation in sequential steganography[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(2): 746–757.

[14] M. Beibel. Bayes problems in change-point models for the Wiener process[A]. In Change Point Problems [C], Hayward, CA: Institute of Mathematical Statistics. 1994: 1–6.

[15] A. N. Shiryaev. Minimax optimality of the method of cumulative sums (CUSUM) in the continuous case[J]. Russian Mathematical Surveys, 1996, 51(4): 750–751.

[16] H.V. Poor, O. Hadjiladis. Quickest Detection[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009.

作者简介

宋晓鸥, 讲师, 研究方向为通信信号处理、认知无线电。

向新, 副教授, 研究方向为超宽带通信、认知无线电、通信信号处理。

刊刊互动



《航空世界》美国针对中国的“包围圈”又即将扣上重要一环。8月21日, 美军太平洋司令部空军司令赫伯特·卡莱尔在五角大楼公开表示欲在印度的特里凡得琅部署战机。但此消息刚刚放出, 就遭到了印度方面斩钉截铁的驳斥。印度国防部表示, 印美双边议程中不存在这样的议题。本期的特别策划, 就将为您解答各方利益交织下的特里凡得琅。



《公务与通用航空》鉴于近来我国通航事故频发, 本期专题重点分析了我国通航安全问题的现状、成因和趋势, 并从政府、企业和行业研究者的角度出发寻求破解之道。对话栏目采访了中国工程院院士杨凤田, 讲述了他对中国通用航空发展的思考。同时, 还为您带来了美国NBAA年会和2013西安通航大会的最新实况报道。



《国际航空》如果说2011年和2012年分别属于空客A320neo和波音737MAX, 那么经历了两年新型窄体机大战后, 波音和空客的竞争焦点正在转向宽体机市场。今年, 空客A350WB和波音787-9相继首飞, 波音启动787-10飞机, 空客针对中国市场推出A330区域型, 这些信息似乎预示着宽体机的竞争即将进入白热化。

此外, 在轰炸机的百年历程中, 明显出现了四次“高峰”和三次“低谷”。其中, 国际形势造成的客观需求和技术创新带来的变革是影响其发展的两个最主要因素。



《军工文化》“企业拥有合适的领导者吗?” “培养领导者的最佳方法是什么?” “应该如何提升领导力?” 这样的答案的需求越来越迫切。本期专题聚焦领导力的建设, 探索领导力的真谛, 寻找领导力培养的最佳路径。本期的封面报道了坐落在黄河之滨将军山下的中国人民解放军第二七六五工厂, 讲述了这家装备保障企业的发展历程与精神文化。

订阅方式

开户行: 交通银行北京亚运村支行
账号: 1100 6021 0010 1491 90047
户名: 中航出版传媒有限责任公司

地址: 北京市朝阳区安外北苑2号院(100012)
收款人: 中航出版传媒有限责任公司
传真: 010-84936664

联系人: 汪爱武
l: wangaiw@aviationnow.com.cn
电话: 010-84936574