

数字电视信号的频谱感知实测方案研究

蒋永磊, 胡宏林, 易辉跃, 芮 贇

(上海无线通信研究中心, 上海 200335)

摘要: 针对我国未来可能开放的电视频段上各种模拟(PAL)及数字电视标准(DVB-T、CTTB)信号的特征, 提出了有效的频谱感知实测方案. 通过伪随机序列相关检测算法检测 CTTB 电视信号, 并结合载波导频检测算法和循环前缀相关检测算法, 通过搭建的基于 Labview 的硬件检测平台, 成功地对上海地区的电视信号进行检测, 给出了相关的频谱占用情况及统计特性.

关键词: 认知无线电; 频谱感知; CTTB; DVB-T

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.01.013

Empirical resolution of spectrum sensing for digital TV signals

JIANG Yonglei, HU Honglin, YI Huiyue, RUI Yun

(Shanghai Research Center of Wireless Communications, Shanghai 200335, China)

Abstract: An empirical resolution for spectrum sensing based on features of TV signals of PAL, CTTB and DVB-T standards was proposed in consideration of the TV spectrum that might be open in China in future. The resolution proposed the pseudo noise code (PN) correlation detection algorithm for the CTTB TV signals; and integrated the spectrum sensing algorithms of pilot detection and cycle prefix (CP) correlation detection. Moreover, TV signals of the related spectrum in Shanghai were successfully detected based on the proposed resolution operated on our hardware detecting platform based on Labview, and the occupation and some statistic characteristics were provided.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; CTTB; DVB-T

0 引言

频谱资源作为一种宝贵的不可再生资源随着无线通信的普及而日益紧张, 有限的频谱资源逐渐成为制约无线通信技术发展的瓶颈. 因此, 节约频谱资源提高频谱利用率将是未来无线通信发展的一个重要领域. 现有的频谱资源分配通常是静态的, 由国家统一管理、支配, 各种无线通信系统被授予不同的频段, 并且只能使用相应的授权频段以避免干扰. 然

而, 已分配频谱的使用情况在时间和空间上都有很大的变化, 美国联邦通信委员会(FCC)的大量研究表明, 一些非授权频段如工业、科学和医用频段及适于陆地移动通信的 2GHz 左右授权频段过于拥挤, 而有些授权频段却经常空闲, 各种无线系统的总频谱利用率在 10% 以下^[1].

因此, 改变传统的频谱资源分配方式, 在时域、空域和码域上充分利用空闲的频谱资源, 是提高频谱利用率的一个重要手段. 于是, 人们提出了认知无

线电技术^[2-3]. 认知无线电可以持续并实时地检测各频段上的信号,若检测到授权用户信号,非授权用户或者认知用户将不能使用该频段;否则认知用户可使用该频段传送信息. 认知用户在工作过程中,一旦发现授权用户开始使用其授权频段,需立即停止对该频段的使用,切换到其他适合的频段继续工作. 为了不影响授权用户的正常工作,认知用户必须具备能够准确快速地对频谱进行感知的能力.

频谱感知是认知无线电系统中的关键技术,受到了大量研究者的关注,并提出了很多频谱感知算法,其中文献[4]综述了四种常用频谱感知算法:匹配滤波器检测、能量检测、循环平稳检测和协作检测,文献[5]中提到了一种基于载波导频的检测算法,文献[6]中提到了一种循环前缀(CP)相关的检测算法,然而很少有文章关注这些认知算法的具体实现问题. 目前,很多国家相继开放原有的电视频段供认知无线电系统使用,从 WRC07 1.4 议题达成的结论可以看出,我国未来很可能会开放 UHF 频段中的 450~470 MHz 和 698~806 MHz 频段. 我国 700 MHz(698~806 MHz)频段主要用于地面广播电视,在时间和空间上都存在大量的频谱空闲. 研究表明,随着我国广播电视的数字化,700 MHz 频段上可释放 50%左右大约 54 MHz 的频谱资源,供 3 G 和其他频谱业务使用. 根据我国 700 MHz 频段上各种模拟(PAL)及数字电视标准(DVB-T、CTTB)的电视信号的特点,本文提出一种真实环境下的频谱感知实测方案,融合了载波导频检测算法、CP 相关检测算法和 PN 相关检测算法,并通过搭建完整的硬件检测平台对上海地区 698~806 MHz 频段上的电视信号进行了检测. 检测结果表明,该方案简单有效、易于实现. 文章结构如下:节 1 是概述,节 2 描述了检测系统的框架,节 3 详细介绍了检测方案中的频谱感知算法,节 4 给出了检测结果,节 5 是结束语.

1 系统框架

图 1 所示为检测系统的实现框图,PC 机通过接口程序远程控制频谱仪,实时采集时域或频域上的信息,并将采集得到的数据传送到 PC 机,然后在 PC 机上利用频谱感知算法模块对其进行处理判决,从而完成信号的检测. 检测系统硬件部分主要由三部分组成:接收天线、频谱仪和 PC 机;软件部分主要通过 Matlab 和 Labview 实现,并按照模块化

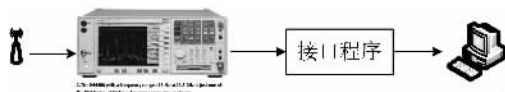


图 1 检测系统实现框图

Fig. 1 Detection system

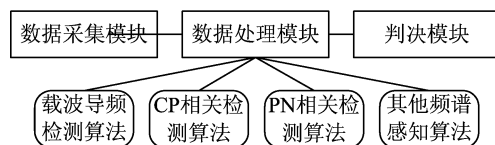


图 2 软件模块间的关系图

Fig. 2 Relationship between software modules

处理,分为三个模块:数据采集模块、数据处理模块和判决模块. 图 2 所示为各模块间的关系图,其中数据处理模块针对不同特征信号可以调用不同的频谱感知算法子模块. 数据采集模块可以根据不同算法的需求得到不同频段上的时域和频域信息. 图 3 所示为数据采集程序的部分 Labview 框图,利用 VISA 模块远程控制测试仪器,实现了连续自动化地采集数据,避免了手动操作的局限性及由此带来的人为误差. 另外,检测系统具备一定的可扩展性,当有新算法提出时只需在数据处理模块增加相应的算法模块便可进行检测. 目前,检测系统可以连续实时地对上海地区 698~806 MHz 间的电视信号(PAL、DVB-T、CTTB)进行检测.

2 频谱感知算法

现有的频谱感知算法很多,如文献[4]中介绍的 4 种频谱感知算法:匹配滤波器检测、能量检测、循环平稳检测和协作检测,但是对于真实环境中的频谱检测都具有一定的局限性:匹配滤波器检测算法针对不同信号在接收端需要有不同的接收机;能量检测算法很难估计真实环境中的噪声功率,而且在 SNR 低于一定值时就会失效;循环平稳检测算法所需的观测时间较长,而且复杂度高^[7-8];另外,本文主要关注单节点检测,暂不考虑协作认知. 我国 UHF 频段中的 698~806 MHz 频段上目前可能存在的电视标准有:PAL(模拟电视)、DVB-T(欧洲)、CTTB(国标)等. 结合我国目前多种数字电视和模拟电视标准并存的现状,在上一节硬件检测平台的基础上,提出一种自适应频谱感知方案,根据不同的检测频段采用不同的检测算法. 下面分别介绍所采用的几种频谱感知算法.

定义认知用户接收到的信号 $r(n)$ 模型:

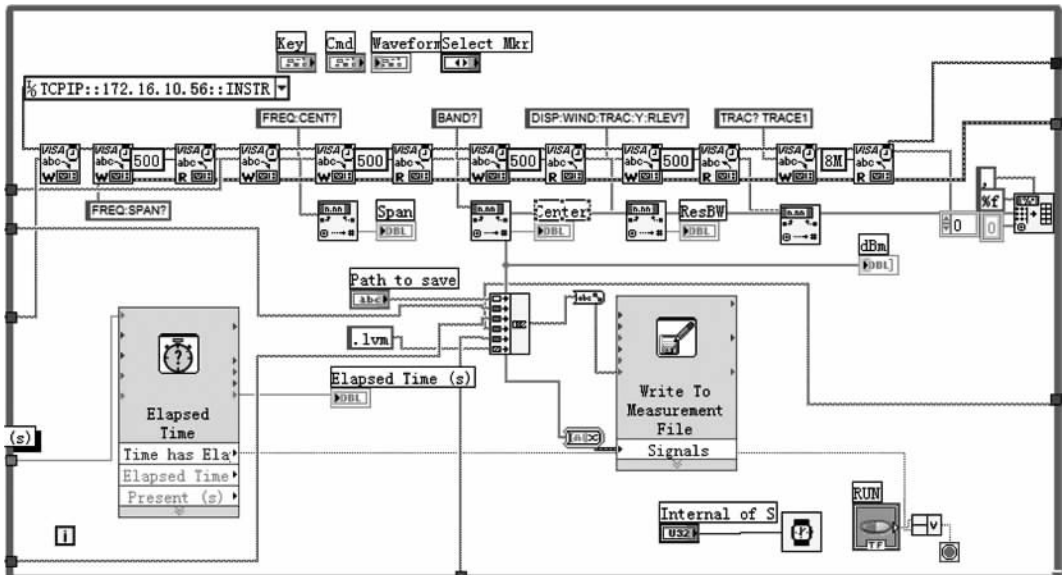


图 3 数据采集程序部分 Labview 框图

Fig. 3 Part of data acquiring program in Labview

$$r(n) = \begin{cases} v(n), & H_0 \\ x(n) + v(n), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $v(n)$ 表示高斯白噪声; $x(n)$ 表示授权用户发送的信号; H_1 和 H_0 分别代表授权用户信号存在与否. 这里不妨假设授权用户信号和噪声统计独立.

2.1 CTTB 电视信号的检测

CTTB 是由我国提出的具有自主创新的数字电视标准, 融合了清华大学的多载波 DMB-T 方案和上海交大单载波 ADTB-T 方案^[9], 现已在北京、上海和广州等城市应用, 并将随着我国数字电视的普及而广泛应用于各地. CTTB 的帧结构中用 PN 码替代了传统的循环前缀方式, 图 4 所示为 CTTB 的一个信息帧格式, 相同业务信息帧的 PN 序列相同. 由此可得

$$\begin{aligned} a(kN) &= E(x(n)x(n+kN)^*) \approx \\ \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{T-1} \sum_{i=0}^{M-1} PN(nL+i)PN(nL+i+kN)^* &= \\ \sum_{i=0}^{M-1} |PN(nL+i)|^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, L 为一个 CTTB 信息帧的长度, M 为 PN 序

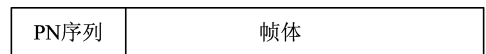


图 4 CTTB 信息帧

Fig. 4 Information frame of CTTB

列的长度, k 为相同两个业务信息帧帧号之差, $PN(nL)$ 表示第 nL 帧中的 PN 序列的第一个值. 由式(2)可知, CTTB 信号在时域上具有很大的相关性, 基于这一点, 我们提出一种基于 PN 序列的 CTTB 的相关检测算法. 该方法定义如下统计判决量 $C(n)$:

$$\begin{aligned} C(n) &= \\ \max_{m=1 \dots L} \left| \sum_{i=0}^{M-1} r(n+m+i) \times r(n+m+i+kL)^* \right| \end{aligned} \quad (3)$$

所有 CTTB 信息帧的帧体长度相同, 拥有 3 780 个符号, PN 序列长度有三种选项, 分别使用 420, 595 和 945 个符号. 通过滑动相关法, 当信号存在时, 理论上在 PN 序列长度正确时, 在每个信息帧周期内将会出现一个峰值. 实际中, 式(3)中定义的判决量因受干扰脉冲及信道衰落影响性能有所下降, 通常采用归一化的结果:

$$\tilde{C}(n) = \max_{m=1 \dots L} \frac{\left| \sum_{i=0}^{M-1} r(n+m+i) \times r(n+m+i+kL)^* \right|}{\left| \sum_{i=0}^{M-1} r(n+m+i) \times r(n+m+i)^* \right|} \quad (4)$$

结合式(1), 当 M 足够大, 式(4)可近似简化为

$$\tilde{C}(n) \approx \begin{cases} 0, & H_0 \\ \max_{m=1 \dots L} \frac{|\sum_{i=0}^{M-1} x(nL+m+i) \times x(nL+m+i+kL)^*|}{|\sum_{i=0}^{M-1} x(nL+m+i) \times x(nL+m+i)^*|}, & H_1 \end{cases} =$$

$$\begin{cases} 0, & H_0 \\ \frac{|\sum_{i=0}^{M-1} PN(nL+i) \times PN(nL+i+kL)^*|}{|\sum_{i=0}^{M-1} PN(nL+i) \times PN(nL+i)^*|}, & H_1 \end{cases} =$$

$$\begin{cases} 0, & H_0 \\ 1, & H_1 \end{cases} \quad (5)$$

根据 Neyman-Pearson 准则,可以得到给定虚警概率 P_f 下的判决门限,然后通过式(4)中定义的统计判决量进行比较,从而判定授权用户信号是否存在。

2.2 DVB-T 电视信号检测

DVB-T——数字视频广播陆地标准,是由欧洲电信标准协会在 1997 年提出的,旨在替代传统的模拟电视标准^[10],现已为世界上众多国家所采纳。我国现阶段引入的国际数字电视标准主要就是 DVB-T,已广泛应用于北京、上海及广州等城市。

DVB-T 采用正交频分多址(OFDM)的方式,以得到较高的数据速率和频谱利用率。对于一个 8MHz 频道,OFDM 的 FFT 大小 N 可以采用 2 048 (2 K) 和 8 192 (8 K) 两种模式,保护间隔使用循环前缀(CP)的方式,它的长度可以在 FFT 大小的 1/4, 1/8, 1/16, 1/32 之间选择,以更好地适应不同路径延迟扩展以及多普勒频移等问题。图 5 所示为一个 OFDM 符号周期,如图所示,循环前缀(CP)部分就是 OFDM 符号最后阴影部分数据的复制。因此, DVB-T 信号在时域上具有很大的相关性。基于这一点,文章[6]中提出了一种 CP 相关法,用于检测 DVB-T 信号。定义统计判决量 $C(n)$:

$$C(n) = \max_{m=1 \dots L} \frac{|\sum_{i=0}^{M-1} r(nL+m+i) \times r(nL+m+i+N)^*|}{|\sum_{i=0}^{M-1} r(nL+m+i) \times r(nL+m+i)^*|} \quad (6)$$

类似,根据 Neyman-Pearson 准则,得到给定虚警概率 P_f 下的判决门限 λ ,从而判决授权用户信号是否

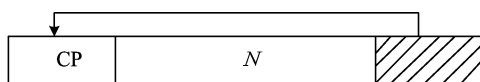


图 5 一个 OFDM 符号周期

Fig. 5 An OFDM Symbol

存在。

实际检测中存在的问题有三个:FFT 大小未知(2K 或者 8K)、CP 长度未知(1/4, 1/8, 1/16, 1/32)以及 OFDM 符号的起始点未知。为解决该问题,我们提出采用最小长度 CP(1/32)结合滑动相关的方法,以 8 K 模式下的 OFDM 符号周期分别按照 8 K 和 2 K 模式计算 $C(n)$ 值,理论上正确模式下每个 OFDM 符号周期内至少将会出现一个峰值窗,并且可以得到 CP 的长度 L_{CP} :

$$L_{CP} = N_p + N_{8K}/32 - 1 \quad (7)$$

其中, N_p 表示峰值窗的大小, N_{8K} 表示 8 K 模式下 FFT 的大小。因此,通过计算峰值窗的大小可测出 CP 的长度,并且每个连续峰值窗口的第一个峰值所在点即为 OFDM 符号周期的起始点。综上,通过 CP 相关法,在检测出 DVB-T 信号的同时,还能得到它的模式、CP 长度以及 OFDM 符号起始位置。

2.3 PAL 电视信号检测

PAL 是国内模拟电视所采用的制式,图 6 所示即为它的频谱特性。由图 6 可知, PAL 制式的模拟电视信号具有视频载波和音频载波,其功率较普通信号高,而且位置固定。视频载波与音频载波分别在 1.25 MHz 与 7.75 MHz 处。

与文献[11]中载波导频检测法类似,通过滤出视频载波和音频载波,采用能量检测算法。由式(1)可得

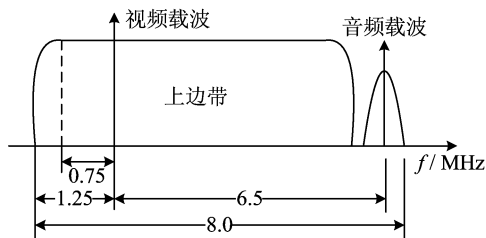


图 6 PAL 制式模拟电视信号频谱特性

Fig. 6 Spectrum of PAL

$$C(n) = \sum_{i=0}^{M-1} r(n+i)^2 =$$

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^{M-1} v(n+i)^2, & H_0 \\ \sum_{i=0}^{M-1} (x(n+i) + v(n+i))^2, & H_1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, $C(n)$ 表示统计判决量, 服从自由度为 M 的 χ^2 分布. 利用 Neyman-Pearson 准则, 即可以很好地检测出 PAL 模拟电视信号; 而且, 根据视频载波和音频载波的位置固定这一特性, 可有效地区分电视信号和干扰信号.

3 实际检测结果

采用如图 1 所示的频谱感知与检测系统, 在上海地区进行了真实环境下信号的采集和处理, 成功地检测出上海地区 698~806 MHz 频段上已开播的电视频道, 分别为: PAL 模拟电视 711.25 MHz (视频载波频率), DVB-T 数字电视 722 MHz (中心频率), CTTB (上海地区主要为单载波方案) 数字电视 706 MHz、802 MHz (中心频率). 由于模拟电视检测方法较为简单, 而且我国正逐步使用数字电视替代模拟电视, 此处主要给出数字电视的检测结果. 检测系统中的接收天线为全向天线, 其带宽为 1 GHz, 频

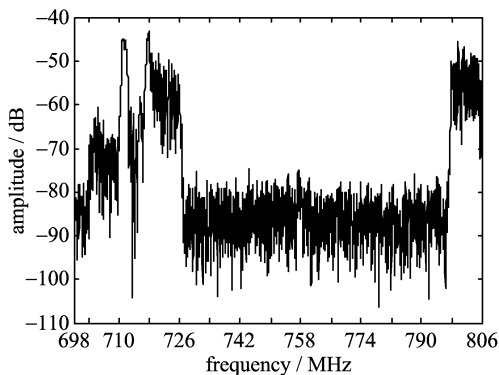


图 7 海地区 698~806 MHz 频段频谱特性

Fig. 7 Spectrum characteristic of 698~806 MHz in Shanghai

谱仪的型号为 Agilent E4440A. 图 7 所示为利用频谱仪在测量点获得的某一时刻上海地区 698~806 MHz 频段上的频谱特性. 从图中很明显可以看到, 在 706 MHz, 714 MHz, 722 MHz 和 802 MHz 频段上的电视信号功率较大, 通过先用能量检测算法进行初步检测, 再使用特征检测算法进行精确检测的方法, 既节约了检测时间又提高检测精度. 下面主要介绍特征检测, 将给出上节中提到的频谱感知算法的检测结果.

3.1 CTTB 数字电视信号检测结果

图 8 所示为 CTTB (上海地区采用了单载波模式) 电视信号 PN 相关法检测结果 (PN 序列长度为 595, 而帧体长度为 3 780, 每个信息帧的 PN 序列相同^[11]). 其中图 8(a)、图 8(b) 分别为 706 MHz、802 MHz 频段的检测结果, 两幅图中均出现了明显的周期性的峰值, 根据 2.1 中的理论分析可以判断这两个频段上发送的信号为 CTTB 电视信号; 图 8(c) 中为 722 MHz 频段非 CTTB 信号的检测结果, 毫无规律可言, 而且幅度均远远小于图 8(a)、图 8(b) 中

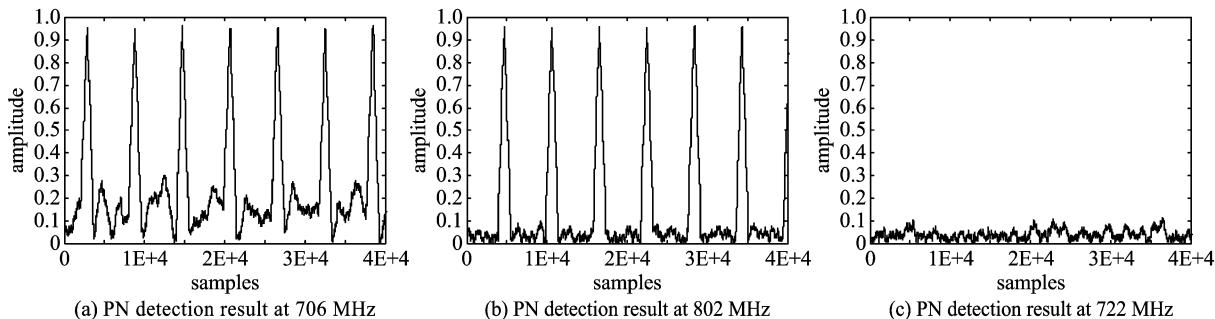


图 8 CTTB 电视信号 PN 相关法检测结果

Fig. 8 PN detection result of CTTB signal

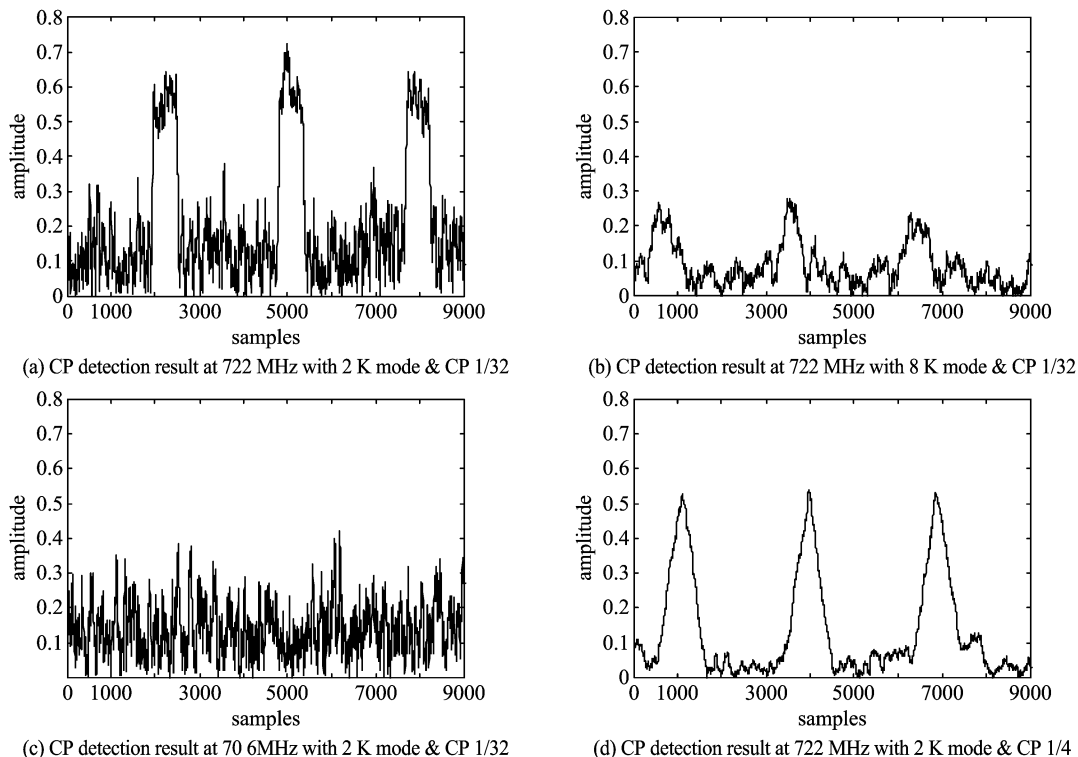


图 9 DVB-T 电视信号 CP 相关检测结果

Fig. 9 CP detection result of DVB-T signal

的峰值,而从图 7 上看,722 MHz 频段上的电视信号功率较之 706 MHz,802 MHz 强,说明 2.1 中所提出的基于 PN 的相关检测算法是有效的.最终检测出,中心频率为 706 MHz,802 MHz 的频段上存在 CTTB 电视信号.

3.2 DVB-T 数字电视信号检测结果

图 9 所示为 DVB-T 信号的检测结果,其中图 9(a)是中心频点在 722 MHz 的 8 MHz 频段 2 K 模式下的检测结果,而图 9(b)是相同频段 8 K 模式下的检测结果,图 9(c)是中心频点在 706 MHz 的 8 MHz 频段的 2 K 模式下检测结果.图 9(a)中的结果和 2.2 中理论分析结果基本一致,仔细分析峰值间距及连续峰值宽度所占峰值间距的比例,不难得到 722 MHz 上的 DVB-T 信号采用了 2 K 模式,其循环前缀(CP)的模式为 1/4.图 9(d)以上述分析结果作为参数做相关,其结果验证了上述分析的正确性,此时只有一个峰值,出现在 OFDM 符号的起始位置.对比图 9(a)、图 9(b)和图 9(c)中的结果,8 K 模式下 722 MHz 频段的检测结果以及无 DVB 信号的 706 MHz 频段的检测结果毫无规律可言,并且它们的幅度均小于图 9(a)中的峰值,可见,只有在存在 DVB-T 电视信号并且模式选择正确的情况下,

才能产生图 9(a)中的检测结果,由此说明 CP 相关法的有效性.最终检测出,中心频率为 722 MHz 的频道上存在 DVB-T 电视信号.

3.3 698~806 MHz 频段频谱占用情况

图 10 所示为 698~806 MHz 频段连续一周功率的强度图,颜色越深表示能量越大.从能量检测算法的角度分析,698~806 MHz 频段上存在着大量空闲,包括未使用频段以及使用频段周期性间歇,而图 11 所示为 698~806 MHz 频段的频谱占用情况.

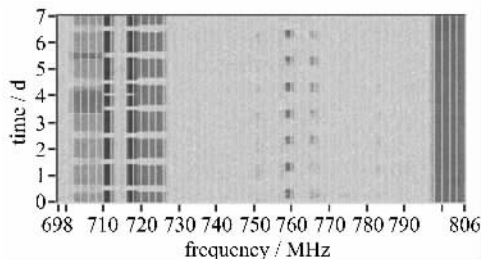


图 10 698~806 MHz 频谱强度图

Fig. 10 Power intensity from 698 MHz to 806 MHz

4 结论

面对有限的频谱资源,提高频谱利用率是未来

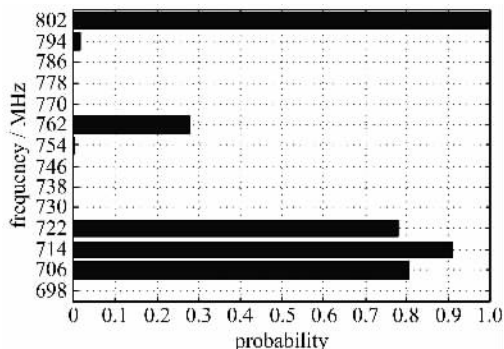


图 11 698~806 MHz 频谱占用情况

Fig. 11 Spectrum occupancy from 698 MHz to 806 MHz

无线通信发展的一个关键点. 认知无线电技术作为一种提高频谱利用率技术, 它的一个重要前提是频谱感知问题. 本文从真实环境下频谱感知的角度出发, 搭建了一整套频谱感知的硬件检测平台, 提出了一种简单高效易于实现的实际认知与检测方案, 并成功地对真实环境中(上海地区)的 PAL 模拟电视信号、DVB-T 以及 CTTB 数字电视信号进行感知与检测, 检测结果表明所提的检测方案是可行的, 并且 698~806 MHz 存在大量可供认知无线电系统使用的空闲频谱.

参考文献(References)

- [1] Ganesan G, Li Y. Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio networks [C] // IEEE GLOBECOM 2005 Proceedings; Vol 5. New York: IEEE, 2005: 2 505-2 509.
- [2] Mitola III J, Maguire Jr G Q. Cognitive radio: Making software radios more personal [J]. IEEE Personal Communications, 1999, 6(4): 13-18.

- [3] Haykin S. Cognitive Radio: Brain-Empowered Wireless Communications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23 (2): 201-220.
- [4] Cabric D, Mishra S M, Brodersen R W. Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios [C] // Conference Record of the Thirty-Eighth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. New York: IEEE, 2004: 772-776.
- [5] Cabric D, Tkachenko A, Brodersen R W. Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection [C] // MILCOM 2006. New York: IEEE, 2006: 2 302-2 308.
- [6] Chen W T, Chang L W, Jou-Shyh J. A jointed mode detection and symbol detection scheme for DVB-T [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54 (2): 336-341.
- [7] Taherpour A, Gazor S, Nasiri-Kenari M. Wideband spectrum sensing in unknown white Gaussian noise [J]. IET Communications, 2008, 2(6): 763-771.
- [8] Gardner W A. Signal Interception: a unifying theoretical framework for feature detection [J]. IEEE Transactions on Communications, 1988, 36 (8): 897-906.
- [9] GB 20600-2006 数字电视地面传输系统帧结构、信道编码和调制[S]. 2006.
- [10] ETSI. EN 300 744 V1. 5, Digital Video Broadcasting: Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Terrestrial Television [S]. 2004.
- [11] Carlos C, Ghosh M, Cavalcanti D, et al. Spectrum sensing for dynamic spectrum access of TV bands [C] // Proceedings of 2007 2nd International Conference On Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications. New York: IEEE, 2007, 225-233.