

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.01.004

引用格式: 梁林峰,王军,宋健 一种基于 PN 累积自相关的 DTMB 频谱感知新算法[J]. 电讯技术,2014,54(1):17-22. [LIANG Lin-feng,WANG Jun,SONG Jian. A Novel Spectrum Sensing Algorithm for DTMB Systems Based on PN Accumulated Autocorrelation[J]. Telecommunication Engineering,2014,54(1):17-22.]

一种基于 PN 累积自相关的 DTMB 频谱感知新算法^{*}

梁林峰^{1,**},王 军¹,宋 健^{1,2}

(1. 清华大学 电子工程系 清华信息科学与技术国家实验室,北京 100084;
2. 数字电视国家工程实验室(北京),北京 100191)

摘 要:针对数字电视地面广播传输标准(DTMB)的频谱感知问题,提出了一种新的基于 DTMB 信号帧中伪随机(PN)序列累积自相关的频谱感知算法。所提算法的创新性在于通过联合多个不同相关间隔的累积自相关结果作为频谱感知的检验统计量,充分利用了有限频谱感知时间内的信号信息。仿真结果表明,当把感知时间设为50 ms时,为了确保频谱感知检测的虚警概率和漏验概率都低于0.01,针对 DTMB 信号的 3 种帧头模式,所提算法所需的信噪比分别为-20.5 dB、-21 dB 和 -22 dB,优于已有的频谱感知算法。此外,仿真结果还表明载波频偏和多径衰落对所提算法的性能几乎没有影响。

关键词:认知无线电;频谱感知;数字电视地面广播传输标准;伪随机序列自相关;累积自相关

中图分类号:TN 911.23 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)01-0017-06

A Novel Spectrum Sensing Algorithm for DTMB Systems Based on PN Accumulated Autocorrelation

LIANG Lin-feng¹,WANG Jun¹,SONG Jian^{1,2}

(1. Tsinghua National Laboratory for Information Science and Technology, Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. National Engineering Laboratory for Digital Television (Beijing), Beijing 100191, China)

Abstract: Spectrum sensing algorithm based on accumulated pseudo-noise sequence autocorrelation (PNAC) for Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB) systems is proposed in this paper. To make full use of the information within the limited spectrum sensing time, the decision statistic is obtained by combining accumulated autocorrelations with different interval values together. Simulation results show that when spectrum sensing time is set to 50 ms, to make sure that the false alarm probability and the miss-detection probability are both under 0.01, the required signal-to-noise ratio(SNR) values of proposed algorithm are -20.5 dB, -21 dB and -22 dB, for three frame header modes, respectively. The performance of proposed algorithm is better than that of existing spectrum sensing algorithms. Meanwhile the proposed algorithm is robust to both carrier frequency offset and multipath fading.

Key words: cognitive radio; spectrum sensing; digital terrestrial multimedia broadcast (DTMB); pseudo-noise sequence autocorrelation; accumulated autocorrelation

1 引 言

高效利用有限频谱资源的特点,近年来得到了学术界和产业界越来越多的关注。频谱感知技术是认知

认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术^[1]具有

^{*} 收稿日期:2013-10-08;修回日期:2014-01-07 Received date:2013-10-08;Revised date:2014-01-07
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2011AA11A280)
Foundation Item: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2011AA11A280)
^{**} 通讯作者:lianglinfeng@gmail.com **Corresponding author:** lianglinfeng@gmail.com

无线电技术中的一项关键技术,通过频谱感知技术可以获得频谱空穴的实时信息,从而使得认知无线电系统可以接入频谱空穴进行工作。数字电视频带是认知无线电技术应用的一个热门候选频带,将认知无线电技术应用到数字电视频带首先需要解决的问题就是如何对数字电视频带内的主用户信号进行频谱感知。DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) 标准^[2]是国际电信联盟的数字电视地面广播国际标准,在我国内地以及古巴、柬埔寨、老挝等国家和香港、澳门地区得到使用,所以在上述国家和地区内,DTMB 信号即为数字电视频带内的主用户信号。

目前已经有不少文献针对数字电视频带的频谱感知技术展开了研究。文献[3-4]分别针对欧洲的 DVB-T 标准和美国的 ATSC 标准提出了频谱感知算法,不过由于不同标准信号帧结构是不同的,这些算法并不能用于针对 DTMB 标准进行频谱感知。文献[5-7]针对 DTMB 标准进行了频谱感知方面的研究,其中,文献[5-6]基于帧头伪随机 (Pseudo-noise, PN) 序列自相关的频谱感知算法 (PNAC 算法) 只利用了固定间隔的自相关结果作为检验统计量,并没有充分利用有限感知时间内的所有信息,因此获得的频谱感知性能较差;文献[7]中基于 PN 互相关的频谱感知算法 (PNCC 算法) 利用接收信号和本地已知信号的互相关结果作为检验统计量,改进了频谱感知性能,不过该算法需要较高的计算复杂度,并且在对抗载波频偏和多径衰落等方面的性能较差。

针对现有频谱感知算法的不足,本文提出一种基于 PN 累积自相关的频谱感知算法,通过充分利用有限感知时间内信号的有用信息,极大地提高了频谱感知算法的检测性能以及对抗载波频偏和多径衰落的鲁棒性。

2 DTMB 系统帧结构

DTMB 系统的超帧由基本信号帧组成^[8],每个基本信号帧都由帧头和帧体两部分组成,帧体部分由 3 780 个符号组成,持续时间是固定的 500 μs;帧头部分由伪随机序列组成,采用的是 BPSK 的调制方式。基本信号帧的帧头长度有 420、595 和 945 个符号 3 种情况,对应 PN420、PN595 和 PN945 3 种帧头模式。每个超帧中包含的基本信号帧个数由帧头

模式决定,PN420、PN595 和 PN945 3 种帧头模式下分别是 225、216 和 200 个。

对于 PN420 和 PN945 帧头模式,帧头伪随机序列由一个基本伪随机序列及其循环前缀和循环后缀构成,如图 1 所示;在这两种帧头模式下,帧头中所包含的伪随机序列的相位可以是固定的,也可以是旋转的。固定相位指的是一个超帧内所有基本信号帧的帧头都是相同的,而旋转相位指的是一个超帧内不同基本信号帧所包含的伪随机序列之间是循环移位的关系。对于 PN595 帧头模式,帧头伪随机序列是由一个 1 023 点的伪随机序列取出前 595 个点得到的,PN595 帧头模式中帧头伪随机序列的相位都是固定的。

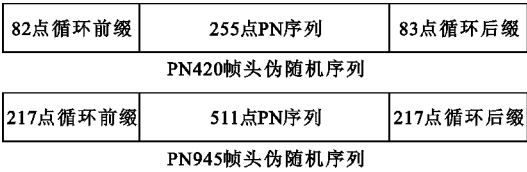


图 1 PN420 和 PN945 的帧头伪随机序列结构
Fig. 1 Frame header structure of PN420 and PN945

3 信号模型

考虑载波频偏和高斯白噪声的影响,接收序列 $r[n]$ 可以表示为

$$r[n] = \begin{cases} e^{j(2\pi f_{\Delta} n + \theta_0)} x[n] + w[n], & H_1 \\ w[n], & H_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x[n]$ 表示表示经过无线信道 (包括路径损耗和时延扩展等) 后的 DTMB 信号; $w[n]$ 表示高斯白噪声,均值为 0,方差为 σ_w^2 ; f_{Δ} 表示经过载波频率归一化的载波频偏, θ_0 表示初始相位;假设 H_1 和假设 H_0 分别对应 DTMB 信号存在和 DTMB 信号不存在的两种情况。

4 多帧联合 PN 累积自相关算法

本节提出一种基于不同相关间隔累积自相关的频谱感知算法。和现有频谱感知算法最大的不同之处在于,所提算法将有限的感知时间内不同相关间隔的累积自相关结果联合起来得到最终的检验统计量。DTMB 系统包含了多种帧头模式,本节将依次对固定相位模式和旋转相位模式下的频谱感知算法进行介绍。

4.1 固定相位模式

对于固定相位模式,一个 DTMB 超帧中所有基本信号帧所包含的帧头是完全相同的。固定相位模式下频谱感知检验统计量的获得步骤如下。

(1) 将接收序列做相关间隔为 d 帧、相关长度为帧头长度 L_i 的自相关,得到 $R(m, d)$:

$$R(m, d) = \frac{1}{L_i} \sum_{n=0}^{L_i-1} r[m+n] r^*[m+n+dM_i] \quad (2)$$

其中, m 表示自相关的起始位置, M_i 表示信号帧的长度, $i=1, 2, 3$ 分别对应 PN420、PN595 和 PN945 帧头模式。

(2) 计算一段时间内的累积自相关 $A(m, d)$:

$$A(m, d) = \frac{1}{S_d} \sum_{s=0}^{S_d-1} R(m + sM_i, d) \quad (3)$$

其中, S_d 表示频谱感知时间内包含的相关间隔为 d 帧的自相关的个数。例如,假设频谱感知时间内包含 N 个基本信号帧,则相关间隔为 d 帧的自相关个数 $S_d = N - d + 1$ 。

(3) 联合不同相关间隔的累积自相关 $A(m, d)$:

$$t(m) = \frac{1}{D} \sum_d \sqrt{S_d} \cdot |A(m, d)| \quad (4)$$

其中, D 表示的是所利用到的累积自相关的个数。

(4) 改变自相关起始位置,扫描一帧长度,选取最大的 $t(m)$ 作为检验统计量:

$$T = \max_{0 \leq m < M_i} t(m) \quad (5)$$

4.2 旋转相位模式

在旋转相位模式下,一个 DTMB 超帧中所包含的基本信号帧的帧头是不相同的,但是它们之间具有循环移位的关系。以 PN420 模式为例,一个超帧中包含 225 个基本信号帧,标记为第 0 ~ 224 帧。用 $\Delta\varphi[i]$ 表示第 $j+2$ 帧帧头和第 j 帧帧头的循环移位关系,可以得到

$$\Delta\varphi[2k] = \begin{cases} 1, & 0 \leq k \leq 55 \\ -1, & 56 \leq k \leq 112 \end{cases}$$

$$\Delta\varphi[2k+1] = \begin{cases} -1, & 0 \leq k \leq 54 \\ 0, & k = 55 \\ 1, & 56 \leq k \leq 111 \end{cases} \quad (6)$$

其中, 1 表示循环右移一位, -1 表示循环左移一位, 0 表示相同。可以看到,除了 $j=111$ 的情况外,其余情况下第 $j+2$ 帧的帧头都是第 j 帧帧头的一位循环右移或者一位循环左移。利用超帧内不同基本信号帧帧头之间的这个关系,构建相关间隔为偶数帧的

自相关运算如下式:

$$R_r(m, d) = \frac{1}{L_i} \sum_{n=0}^{L_i-1} \sum_{\alpha=0}^1 r[m+n] \cdot r^*[m+n+d(M_i + (-1)^\alpha)] \quad (7)$$

其中, d 为偶数。

仿照 4.1 节中的步骤 2 ~ 4,可以得到旋转相位模式下的累积自相关结果和检验统计量如 (8) - (10) 所示:

$$A_r(m, d) = \frac{1}{S_d} \sum_{s=0}^{S_d-1} R_r(m + sM_i, d) \quad (8)$$

$$t_r(m) = \frac{1}{D} \sum_d \sqrt{S_d} \cdot |A_r(m, d)| \quad (9)$$

$$T_r = \max_{0 \leq m < M_i} t_r(m) \quad (10)$$

4.3 判决门限

首先以固定相位模式为例,在假设 H_0 下,依据中心极限定律, $A(m, d) \sim CN(0, \frac{1}{S_d L_i} \sigma_w^4)$, 定义 $B(m, d) = \sqrt{S_d} |A(m, d)|$, 则 $B(m, d)$ 服从参数为 σ_B 的瑞利分布,其中 $\sigma_B = \sqrt{\frac{1}{2L_i}} \sigma_w^2$ 。由此可以得到 $B(m, d)$ 的均值和方差如下:

$$E(B(m, d)) = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \sigma_B = \sqrt{\frac{\pi}{4L_i}} \cdot \sigma_w^2 \quad (11)$$

$$Var(B(m, d)) = \frac{4-\pi}{2} \cdot \sigma_B^2 = \frac{4-\pi}{4L_i} \cdot \sigma_w^4$$

当采用的累积自相关结果的个数足够多时,依据中心极限定律, $t(m) = \frac{1}{D} \sum_d B(m, d)$ 服从正态分布:

$$p_{t(m)}(t) \sim N(\mu_t, \sigma_t^2) \quad (12)$$

其中

$$\mu_t = E(B(m; d)) = \sqrt{\frac{\pi}{4L_i}} \cdot \sigma_w^2 \quad (13)$$

$$\sigma_t^2 = \frac{1}{D} Var(B(m; d)) = \frac{4-\pi}{4DL_i} \cdot \sigma_w^4$$

因此, $T = \max_{0 \leq m < M_i} t(m)$ 服从联合高斯分布。求解 T 累积分布函数的精确解析表达式比较困难,不过可以假设包含不同 m 值的 $t(m)$ 之间相互独立,由此可以得到 T 的累积分布函数的近似值

$$\Pr\{T < t_0\} \approx \prod_{0 \leq m < M_i} \Pr\{t(m) < t_0\} \quad (14)$$

其中, $\Pr\{t(m) < t_0\}$ 表示的是 $t(m)$ 的累积分布函数

$$\Pr\{t(m) < t_0\} = \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{t_0 - \mu_t}{\sqrt{2\sigma_t^2}} \right) \right] \quad (15)$$
$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

由式(15)可以得到,对于一个给定的虚警概率 P_{FA} ,判决门限的值为

$$\gamma_T = \mu_t + \sqrt{2\sigma_t^2} \cdot \operatorname{erf}^{-1} [2(1 - P_{FA})^{1/M_i} - 1] \quad (16)$$

对于旋转相位模式,也可以采用类似的方式得到判决门限的值。在假设 H_0 下,依据中心极限定律可以得到

$$A_r(m, d) \sim CN(0, \frac{2}{S_d L_i} \sigma_w^4) \quad (17)$$

仿照固定相位模式下的推导,可以得到对于一个给定的虚警概率 P_{FA} ,旋转相位模式下的判决门限值为

$$\gamma_{T,r} = \mu_{t,r} + \sqrt{2\sigma_{t,r}^2} \cdot \operatorname{erf}^{-1} [2(1 - P_{FA})^{1/M_i} - 1] \quad (18)$$

其中:

$$\mu_{t,r} = \sqrt{\frac{\pi}{2L_i}} \cdot \sigma_w^2, \quad \sigma_{t,r}^2 = \frac{4 - \pi}{2DL_i} \cdot \sigma_w^4 \quad (19)$$

4.4 频谱感知步骤

前面分别介绍了在 DTMB 系统的固定相位模式以及旋转相位模式下检验统计量和判决门限值的计算方法。频谱感知算法的流程如图 2 所示。

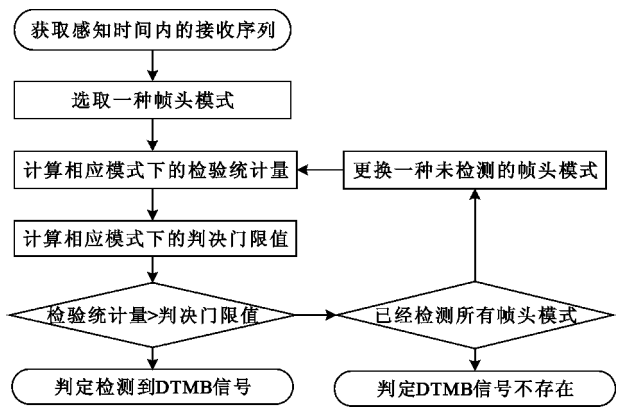


图2 频谱感知算法的流程图

Fig. 2 The flow chart of spectrum sensing algorithm

5 仿真结果

在本节的仿真中,参照文献[5,7]中的仿真参数,我们将频谱感知的时间也设为50 ms,虚警概率 P_{FA} 设为0.01,载波频偏值由800 MHz的载波频率进

行归一化。本文所提算法中利用了20个累积自相关结果来获得检验统计量,即式中 $D=20$ 。本节针对PNAC算法、PNCC算法以及本文所提算法的仿真都是在同等仿真条件下进行的。

图3对比了3种算法在不同载波频偏情况下的检测性能,采用PN595的固定相位模式。图中横轴为信噪比,纵轴为漏检概率 P_{MD} 。可以看到,当载波频偏较小时,本文提出的频谱感知算法和PNCC算法都具有较好的性能,而PNAC算法的性能较差;随着载波频偏的增大,PNCC算法的性能急剧下降,而载波频偏对本文所提算法性能影响很小。

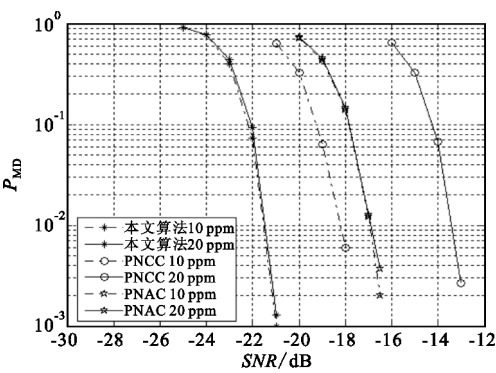


图3 3种算法在不同载波频偏情况下的检测性能
Fig. 3 Spectrum sensing performances under different CFO settings

图4~6对比了3种算法在不同信道下的检测性能,分别针对PN420旋转相位模式、PN595固定相位模式和PN945旋转相位模式进行了仿真。所有仿真中载波频偏值均设为15 ppm,采用的多径信道参数如表1所示,该信道包含一个0 dB的强回波,是一个典型的数字电视单频网信道模型。和图3一致,这些仿真图中横轴为信噪比,纵轴为漏检概率 P_{MD} 。可以看到,本文所提算法在各种情况下的检测性能都优于PNAC算法;此外,在多径衰落的影响下,PNCC算法的性能恶化非常严重,而多径衰落对本文所提算法的影响不太显著。以PN420旋转相位模式为例,在加性高斯白噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN)信道下,为了使漏检概率低于0.01,PNAC算法、PNCC算法以及本文所提算法需要信噪比分别达到-17 dB、-20 dB和-20.5 dB;在加入了多径衰落的影响后,为了达到相同的漏检概率,PNCC算法所需要的信噪比提高到-17.5 dB,而本文所提算法则仅需要将信噪比提高到-20 dB,恶化程度远小于PNCC算法。

表 1 广电 8 信道模型

Table 1 Power delay profile for SARFT 8

延时/ μ s	能量/dB
-1.80	-18
0.00	0
0.15	-20
1.80	-20
5.70	-10
30.00	0

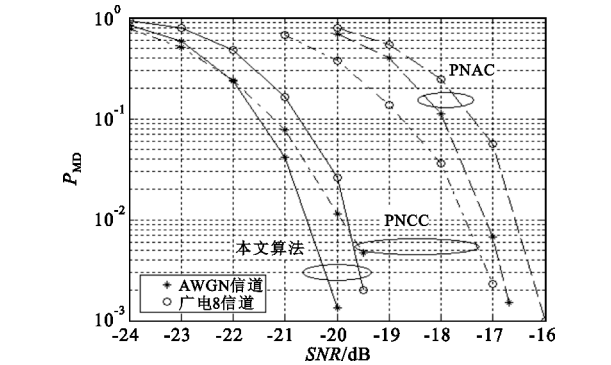


图 4 PN420 旋转相位模式 3 种算法在不同信道下的检测性能

Fig. 4 Spectrum sensing performances for PN420 rotated-phase option under different channel conditions

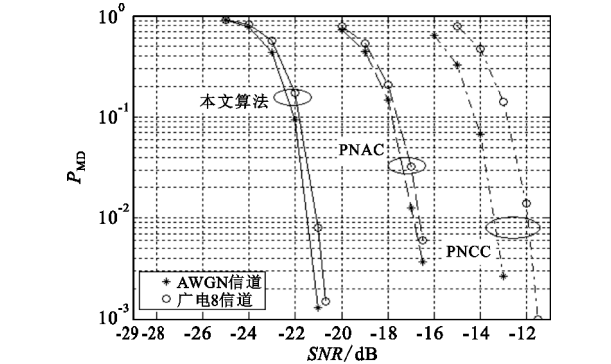


图 5 PN595 固定相位模式 3 种算法在不同信道下的检测性能

Fig. 5 Spectrum sensing performances for PN595 fixed-phase option under different channel conditions

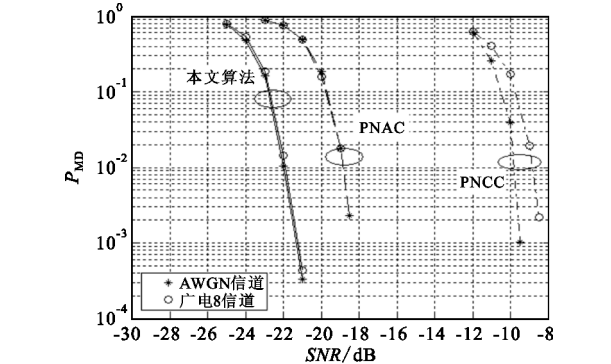


图 6 PN945 旋转相位模式 3 种算法在不同信道下的检测性能

Fig. 6 Spectrum sensing performances for PN945 rotated-phase option under different channel conditions

表 2 对 3 种算法的复杂度进行了对比,检测模式设为 PN595 固定相位模式。在硬件实现中,当相关窗移动时,自相关运算可以利用之前的自相关结果再加上一次乘法得到新的自相关结果,而互相关运算则每次都需要计算个数等于相关窗长度的乘法,因此自相关运算的复杂度会远远低于互相关运算。由表 2 可以看到,PNAC 具有最低的复杂度,不过由前面的仿真结果得知 PNAC 的算法性能较差,本文所提算法的复杂度介于 PNAC 和 PNCC 算法之间。由此可知,本文所提算法相对于 PNAC 算法而言,利用一定的复杂度代价获得了检测性能的极大提升;相对于 PNCC 算法而言,则在不降低检测性能的同时,极大地降低了系统复杂度,同时增加了检测鲁棒性。

表 2 3 种算法的复杂度对比

Table 2 Computational complexity of three algorithms

算法	硬件实现时完成一次检测所需乘法次数
PNAC	$595 \times 89 \times 1 + 1 \times 89 \times 4374 = 442\ 330$
PNCC	$595 \times 90 \times 4375 = 234\ 281\ 250$
本文算法	$595 \times 1590 \times 1 + 1 \times 1590 \times 4374 = 7\ 900\ 710$

6 结束语

频谱感知技术是认知无线电技术得以应用的基础,本文针对目前已经得到广泛应用的 DTMB 标准的频谱感知技术展开研究,提出了一种基于 PN 累积自相关的频谱感知算法,该算法通过充分利用有限感知时间内信号的有用信息来提高频谱感知的性能。仿真结果表明,该算法具有较高的检测灵敏度以及较强的对抗载波频偏和多径衰落的能力。通过采用本文所提算法,可以获得数字电视频带内准确的频谱感知结果,为认知无线电技术在数字电视频带的应用提供了基础。本文的理论推导基于背景噪声的先验知识,在实际应用中并不一定总能得到理想的背景噪声先验知识,未来计划针对频谱感知算法在噪声不确定情况下的应用进行更深入的研究。

参考文献:

[1] Mitola J. Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications[C]//Proceedings of 1999 International Workshop on Mobile Multimedia Communications. San Diego:IEEE,1999:3-10.

- [2] GB 20600-2006, 数字电视地面广播传输系统帧结构、信道编码和调制 [S].
GB 20600-2006. Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Television Terrestrial Broadcasting System [S]. (in Chinese)
- [3] Chen H S, Gao W. Spectrum Sensing for TV White Space in North America [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011, 29(2): 316-326.
- [4] Chen H S, Gao W, Daut D G. Spectrum sensing for OFDM systems employing pilot tones [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(12): 5862-5870.
- [5] Chen H S, Gao W, Daut D G. Spectrum sensing for DMB-T systems using PN frame headers [C]//Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Communications. Beijing: IEEE, 2008: 4889-4893.
- [6] Chen L, Qiu J. A Spectrum Sensing Prototype for TV White Space in China [C]//Proceedings of 2011 Global Telecommunications Conference. Houston, TX, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [7] Xu A L, Shi Q C, Yang Z X, et al. Spectrum sensing for DTMB system based on PN cross-correlation [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communications. Cape Town: IEEE, 2010: 1-5.
- [8] Song J, Yang Z X, Yang L, et al. Technical review on Chinese digital terrestrial television broadcasting standard and measurements on some working modes [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2007, 53(1): 1-7.

作者简介:



梁林峰(1987—),男,福建上杭人,2009年于清华大学获学士学位,现为博士研究生,主要研究方向为认知无线电技术;

LIANG Lin-feng was born in Shanghang, Fujian Province, in 1987. He received the B. S. degree from Tsinghua University in 2009. He is currently working toward the Ph. D. degree. His research concerns cognitive radio technology.

Email: lianglinfeng@gmail.com

王 军(1975—),男,河南开封人,分别于1999年和2003年获清华大学学士学位和博士学位,现为副教授、博士生导师,主要研究领域为宽带无线传输技术;

WANG Jun was born in Kaifeng, Henan Province, in 1975. He received the B. S. degree and the Ph. D. degree from Tsinghua University, in 1999 and 2003, respectively. He is now an associate professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns broadband wireless transmission techniques.

宋 健(1966—),男,北京人,分别于1990年和1995年获清华大学学士学位和博士学位,现为教授、博士生导师,主要研究领域为数字电视传输技术、三网融合和电力线通信。

SONG Jian was born in Beijing, in 1966. He received the B. S. degree and the Ph. D. degree from Tsinghua University, in 1990 and 1995, respectively. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns digital television terrestrial broadcasting techniques, tri-network convergence and powerline communications.