

基于动态阈值的可信度加权协作频谱感知

于笃发, 邵建华[†], 聂梦雅, 刘刚

(南京师范大学 物理科学与技术学院, 南京 210023)

摘要: 为了提升受阴影衰落等因素影响下的协作频谱感知性能,采取了一种改进的基于动态阈值和可信度相结合的协作频谱感知方法。该方法利用各认知用户的检测信噪比对检测可信度较低的认知用户进行过滤,各认知用户根据检测信噪比设定一个适合自身的动态阈值进行能量感知,融合中心结合各单节点感知结果和分配的传输可信度作出最终判决。仿真结果表明,在检测信道和传输信道均受到阴影衰落等因素严重影响下,与单纯的动态阈值协作感知和传统的可信度协作感知方法相比,该方法能获得较高的检测概率。

关键词: 认知无线电; 阴影衰落; 能量检测; 动态阈值; 可信度; 检测信噪比; 传输信噪比; 协作频谱感知

中图分类号: TN951

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)02-0511-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.02.045

Weighting of credibility cooperative spectrum sensing based on dynamic threshold

YU Du-fa, SHAO Jian-hua[†], NIE Meng-ya, LIU Gang

(School of Physics Science & Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to improve the performance of cooperative spectrum sensing under factors such as shadow fading, this paper improved a cooperative spectrum sensing method based on the combination of dynamic threshold and credibility would be adopted. Firstly, the method used the cognitive users detection signal to noise ratio to filter the cognitive users that have low detecting reliability. Then, the cognitive user based on the detection signal-to-noise ratio set a dynamic threshold, suitable for itself and its energy detection. Finally, the fusion center in conjunction with the single node sensing results and the allocation of transmission credibility made a final judgment. The simulation results show that the detection channel and the transmission channel are severely affected by factors such as shadow fading, this will be compared with mere dynamic threshold cooperative sensing and traditional weighted collaborative sensing method based on trust, the method can obtain a high detection probability.

Key words: cognitive radio; shadow fading; energy sensing; dynamic threshold; credibility; detection SNR; transmission SNR; cooperative spectrum sensing

0 引言

随着通信业务量的迅速扩大,由于传统固定频谱分配方案频谱利用率较低,使得频谱资源短缺越来越明显,而基于动态频谱接入的认知无线电(CR)技术能够有效提高频谱利用率,因此它已成为国内外研究的热点^[1~3]。频谱感知技术是认知无线电技术的基础和关键技术之一。在实际中,由于阴影效应和多径衰落等因素的影响,单个认知用户检测性能达不到应用要求,而协作频谱感知是一种较为有效的频谱感知方法^[4,5]。

目前,协作频谱感知方案有很多种,它们的性能和适合使用的环境也有所不同。文献[6~8]提出了基于信任度加权的协作频谱感知,该类方法能够有效降低处于严重衰落信道下的认知用户对协作感知的影响力,但它需要各认知用户在发送本地感知结果的同时还需要发送检测信噪比给融合中心,因此系统开销较大。此外,该类方法同时也忽略了传输信道阴影衰落等因素对协作感知的影响,具有一定的局限性。文献[9]提出了基于信噪比动态门限协作感知方法,该方法通过利用各认知用户的检测信噪比来设置适合不同认知用户的检测门限,能够有效

提高单认知用户检测结果的可靠度,但当某一认知用户检测信道处于严重衰落下,该方法的效果将变得不太理想。同样地,该方法也只局限于传输信道理想状态下效果较好。

本文在分析了文献[7~9]的基础上,采取了一种动态阈值和可信度结合的协作频谱感知方法。该方法首先根据检测信噪比剔除本地检测可信度较低的用户,由此可以减少受阴影衰落等影响严重的认知用户对动态门限检测的影响和减少需要发送到融合中心的数据而降低系统开销。然后,融合中心根据检测到的各认知用户的传输信道信噪比,分配给参与协作感知用户不同的可信度后加权判决,这样可有效降低传输信道中阴影衰落等因素对协作感知性能的影响。

1 网络模型

本文使用的系统网络模型如图1所示,该模型主要由一个主用户(PU)、一个认知用户基站(BS)即融合中心(FC)和 N 个认知用户(SU)组成。 N 个认知用户相互独立且均匀分布在基站的覆盖范围内。其中有少数的认知用户的检测信道或传输信道受到阻挡。认知用户检测来自主用户的信号,并将本地感知

收稿日期: 2013-05-02; 修回日期: 2013-06-19

作者简介: 于笃发(1987-),男,湖南祁东人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电频谱感知;邵建华(1964-),男(通信作者),浙江东阳人,教授,博士,主要研究方向为电子对抗技术和认知无线电技术(shaojianhua@njjnu.edu.cn);聂梦雅(1991-),女,江苏镇江人,硕士研究生,主要研究方向为认知无线电频谱感知;刘刚(1986-),男,山东济宁人,硕士研究生,主要研究方向为无线电定位技术。

结果发送给认知用户基站,由认知用户基站判断主用户信号是否出现。

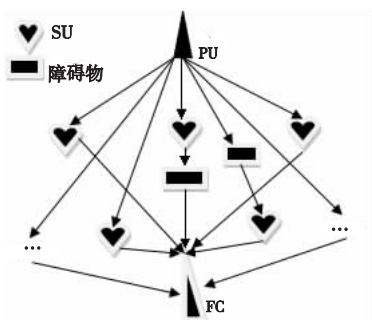


图1 协作感知网络模型

2 协作频谱感知

协作频谱感知的总体方案是:a)各认知用户经过本地检测;b)将检测结果发送给融合中心,由融合中心作出最后判决来确定主用户是否存在。由于能量检测简单且易于实现,所以它常用于协作频谱感知中本地检测方法。对于融合中心的判决方法,主要有“或”融合准则、“与”融合准则和“K-N”融合准则。

2.1 能量检测

能量检测模型如图 2 所示,信号经过带通滤波器后,再经 AD 转换然后对选取的 N 个抽样的能量进行求和,得到检验统计量,最后经过门限判决得到检测结果。

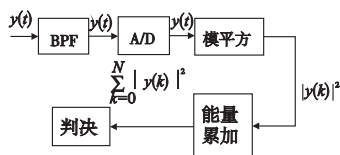


图2 能量检测模型

认知无线电的频谱感知问题一般可用二元假设检验表示: H_0 代表主用户不存在, H_1 代表主用户存在,公式表示如下:

$$y(k) = \begin{cases} w(k), & H_0 \\ h(k) \times x(k) + w(k), & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

其中: $y(k)$ 代表认知用户的检测信号; $x(k)$ 代表主用户信号; $w(k)$ 代表加性高斯白噪声; $h(k)$ 代表主用户到感知用户的信道衰落因子。那么检测的统计量可以表示为

$$M = \sum_{k=0}^{N-1} |y(k)|^2 \quad (2)$$

其中: $N = TW$ 代表时间带宽积,感知用户通过将检测能量值与阈值 λ 比较进而得出本地判决结果 D ,判决公式如下:

$$D = \begin{cases} H_0 & M < \lambda \\ H_1 & M \geq \lambda \end{cases} \quad (3)$$

根据文献[10],检测统计量可以近似符合高斯分布:

$$M \sim \text{Normal}(N\sigma_w^2, 2N\sigma_w^4), H_0 \\ M \sim \text{Normal}(N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2), 2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2), H_1 \quad (4)$$

其中: N 为采样数(检测时间), σ_w^2 为白噪声方差, σ_x^2 信号平均功率。对于恒虚警率检测(CFAR)来说,当信号不存在的时候,通过已知的虚警概率 P_f ,可以确定出检测门限 λ 。因为在 H_1 的情况下, M 符合高斯分布, $P_f = P(M > \lambda | H_0)$,则

$$P_f = Q\left(\frac{\lambda - N\sigma_w^2}{\sqrt{2N\sigma_w^4}}\right) \quad (5)$$

其中: $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy$ 。所以由式(5)得检测门限

为:

$$\lambda = \sigma_w^2(N + \sqrt{2NQ^{-1}(P_f)}) \quad (6)$$

在 H_1 的假设下,统计检测量 M 也符合高斯分布,所以检测概率为:

$$P_d = P(M > \lambda | H_1) = Q\left(\frac{\lambda - N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)}{\sqrt{2N(\sigma_w^2 + \sigma_x^2)^2}}\right) \quad (7)$$

将式(6)得到的检测门限 λ 代入式(7)可得出检测概率。

2.2 理想传输信道下的融合准则

假设参与协作的认知用户有 N 个,当授权网络中的主用户存在时,第 i 个认知用户检测到主用户存在的概率即检测概率为 $P_{di} (i=1,2,\dots,N)$,当授权网络中的主用户不存在时,第 i 个认知用户利用检测到主用户存在的概率即虚警概率为 $P_{fi} (i=1,2,\dots,N)$ 。那么利用“或”融合准则、“与”融合准则和“K-N”融合准则^[5]进行协作感知后的检测概率和虚警概率分别为

a)“或”融合准则

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{di}) \quad (8)$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}) \quad (9)$$

对于“或”融合准则,只要在认知网络全部参与合作的用户中有一个用户检测到授权用户信号的存在,判决融合中心就判定存在授权用户信号,反之则判定授权用户不存在。

b)“与”融合准则

$$P_d = \prod_{i=1}^N (1 - P_{di}) \quad (10)$$

$$P_f = \prod_{i=1}^N (1 - P_{fi}) \quad (11)$$

对于“与”融合准则,只有参与合作的用户全部检测到授权用户信号的存在,判决融合中心就判定存在授权用户信号,反之,则判定授权用户不存在。

c)“K-N”融合准则

$$P_d = \sum_{j=k}^N \sum_{\sum m=j} \prod_{i=1}^N (P_{di})^m (1 - P_{di})^{1-m} \quad (12)$$

$$P_f = \sum_{j=k}^N \sum_{\sum m=j} \prod_{i=1}^N (P_{fi})^m (1 - P_{fi})^{1-m} \quad (13)$$

2.3 含衰落传输信道下的融合准则

在实际协作频谱感知中,认知用户在将本地感知结果发送到融合中心时有可能受到衰落或遮挡,从而使得传到融合中心的结果有误。设第 i 个认知用户的传输错误率为 $P_{ei} (i=1,2,\dots,N)$,它表示第 i 个认知用户与融合中心之间的传输信道上的信号传输错误率。如果使用“或”规则,那么含衰落传输信道下的协作感知的检测概率 P_d 和虚警概率 P_f 分别为^[11]

$$P_d = 1 - \prod_{i=1}^N [(1 - P_{di})(1 - P_{ei}) + P_{di}P_{ei}] \quad (14)$$

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^N [(1 - P_{fi})(1 - P_{ei}) + P_{fi}P_{ei}] \quad (15)$$

由以上两式可分别求得经传输信道后各认知用户的检测概率和虚警概率为

$$P_{d,i} = (1 - 2P_{ei})P_{di} + P_{ei} \quad (16)$$

$$P_{f,i} = (1 - 2P_{ei})P_{fi} + P_{ei} \quad (17)$$

3 基于动态阈值和可信度的协作频谱感知

3.1 不可靠认知用户的过滤

实际无线网络环境中,部分认知无线电用户在进行本地

检测时,由于受到建筑物等遮挡或其他阴影衰落等因素的影响,其检测结果可靠度非常低,这些结果被送到融合中心对整体检测性能将产生不利影响。因此,有必要对其进行过滤,不使其参与协作感知。假设在小范围内,各认知用户之间通信良好,对此,各认知用户可以估计自身的检测信噪比并与周围其他认知用户交换,然后根据估计到的信噪比设定一个范围 (a, b) ,如果某一认知用户观测到的信噪比超出这个范围,则认为它的检测信道衰落严重,它将不参与协作感知。范围 (a, b) 可以为

$$a = \text{median}(\mathbf{c}) - 1.5 \times \text{std}(\mathbf{c}) \quad (18)$$

$$b = \text{median}(\mathbf{c}) + 1.5 \times \text{std}(\mathbf{c}) \quad (19)$$

式中: $\mathbf{c}$ 是各认知用户估计到的信噪比构成的一维矩阵; $\text{median}(\mathbf{c})$ 是矩阵 $\mathbf{c}$ 的中值; $\text{std}(\mathbf{c})$ 是矩阵 $\mathbf{c}$ 的标准差。如果第 i 个认知用户估计到的信噪比 $\text{SNR}_i \notin (a, b)$,那么这个认知用户将被视为极不可靠用户,它不发送其感知结果给融合中心进行协作感知。

3.2 动态阈值的确定

从式(6)可以看到,认知用户的判决门限只与虚警概率有关,且互成反比。所以,对于高 SNR 的认知用户,可以增大虚警概率,降低判决门限,从而提高检测概率。相应地,对于低 SNR 的认知用户,需要降低虚警概率,提高判决门限,从而减小检测概率^[9]。因此可按式调整认知用户的虚警概率:

$$P_{fi} = \Delta_i P_f \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (20)$$

其中: Δ_i 为调整因子,用来根据检测用户的 SNR 调整虚警概率的大小。为了保证联合虚警概率满足一定的条件,每个认知用户的虚警概率调整不能太大,为此定义:

$$\Delta_i = 1 + \frac{\overline{\text{SNR}} - \text{SNR}_i}{\overline{\text{SNR}}}, i = 1, 2, \dots, N \quad (21)$$

其中: $\overline{\text{SNR}}$ 为参与协作感知的所有认知用户的平均信噪比。对于高 SNR 的检测用户,由上式可知 Δ_i 的取值范围为 $1 < \Delta_i < 1.5$,低 SNR 的检测用户的取值范围为 $0.5 < \Delta_i < 1$ 。把式(20)代入式(6),可以求得调整后每个认知用户的判决门限为

$$\lambda_i = \sigma_w^2 (N + \sqrt{2N}Q^{-1}(P_{fi})) \quad (22)$$

每个认知用户根据各自调整后的判决门限进行频谱检测,得到检测概率 P_{di} 。

3.3 基于传输可信度的协作频谱感知

基于传输可信度的协作频谱感知的原理可以描述为:中心单元在接收到本地检测结果 c_i 后,先判断是否为0,若为0,设置参数 $u_i = -1$;否则, $u_i = 1$ 。将 u_i 与对应的检测可信度 γ_i 相乘后再线性叠加,获得判决参量^[8]为

$$U = \sum_{i=1}^N \gamma_i u_i \quad (23)$$

其中: U 表示系统对授权用户占用频带的信任程度, γ_i 满足

$$\sum_{i=1}^N \gamma_i = 1 \quad (24)$$

具体判决准则为

$$U \begin{cases} \geq 0, H_1 \\ < 0, H_0 \end{cases} \quad (25)$$

即系统对授权用户占用频带的信任程度大于等于0时,认为主用户存在;否则,认为主用户不存在。系统的检测结果主要与认知用户的检测结果以及中心单元处的 γ_i 有关。在受到衰落的传输信道中,认知用户发送给融合中心的二进制的检测结果可靠性会降低,因此合理地设置 γ_i 可以在一定程度上弥补这种不

利影响,从而提高检测性能。下面是本文给出 γ_i 的求法:

$$\gamma_i = \frac{1}{N-1} \times \frac{\sum_{i=1}^N (\text{SNR}_i) - \text{SNR}_i}{\sum_{i=1}^N \text{SNR}_i} \quad (26)$$

其中: SNR_i 表示融合中心估计到第 i 个认知用户的传输信噪比, N 是参与协作感知的认知用户数。系统的虚警概率为可信度之和大于1/2的认知用户虚警时的概率,即

$$P_f = \sum_{i=1}^N \sum_{\gamma_{fi} \geq 1/2} \prod_{i=1}^N (P_{fi})^{c_i} (1 - P_{fi})^{1-c_i} \quad (27)$$

检测概率 P_d 为可信度之和大于1/2的认知用户正确检测到授权用户信号时的概率,即

$$P_d = \sum_{i=1}^N \sum_{\gamma_{di} \geq 1/2} \prod_{i=1}^N (P_{di})^{c_i} (1 - P_{di})^{1-c_i} \quad (28)$$

其中:式(27)和(28)中 P_{fi} 和 P_{di} 是第 i 个认知用户将本地检测结果传输给融合中心后的虚警概率和检测概率,它们可以分别由式(16)和(17)求出。

3.4 基于动态阈值和可信度的协作频谱感知

基于动态阈值和可信度的协作频谱感知的算法流程如图3所示,算法实现步骤如下:

- 各认知用户估计自己的检测信噪比,然后与周围通信良好的其他用户交换检测信噪比。
- 各认知用户根据式(18)(19)计算出信噪比范围并以此来确定自己是否参与协作感知。
- 各认知用户根据式(22)确定各自的检测阈值并进行能量检测。
- 各认知用户将本地感知结果发送到融合中心。
- 融合中心估计发送本地检测结果到融合中心的各认知用户的传输信噪比。
- 融合中心根据式(26)计算各认知用户本地感知结果的可信度。
- 融合中心根据式(23)计算判决参量,最后利用式(25)规则进行最终判决。

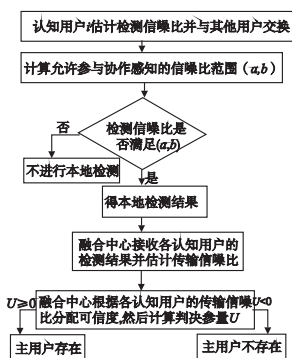


图3 基于动态阈值和可信度的协作频谱感知的算法流程

4 仿真结果及性能分析

为了证明本文算法的有效性,在 MATLAB 7.1 环境下,利用参考文献[7~9]算法等做了对比仿真实验。实验采用 Monte-Carlo 方法,仿真次数为 10 000 次,信道噪声为高斯白噪声。

假设某个区域内随机出现 5 个相互通信良好的认知无线用户,前 4 个认知用户的检测信噪比分别为 -14 dB、-15.5 dB、-16.5 dB 和 -15 dB,第 5 个认知用户由于受到严重的阴影衰落影响,其检测信噪比为 -25 dB。文献[7]算法的 M 取值为 6。

图4是在理想传输信道下传统协作感知方法、文献[7~9]算法和本文算法的感知性能曲线比较。从图4中可以看出,总体上本文算法在低联合虚警概率下的检测概率要好于文献[7~9]算法和传统协作感知方法,而文献[7~9]算法的感知性能与传统协作感知方法相比具有不同程度的优势。

保持检测信噪比不变,假设第1个认知用户的传输信道也受到严重的阴影衰落影响,其传输信噪比为-21 dB,其他4个认知用户的传输信噪比分别为-12 dB、-12.4 dB、-12.7 dB和-11.6 dB。不妨假设传输信噪比在大于-10 dB时,传输错误率极低,可视为理想传输信道,此时令其错误率为0,对于非理想传输信道,可以利用公式 $P_{ei} = (\text{SNR}_{di} + 10)/1000$ 来计算假设的各认知用户的传输错误率,其中是各认知用户的传输信噪比。

图5是传输信道存在部分阴影衰落时本文算法等六种不同协作感知算法的检测性能比较曲线。与图4相比,从图5中可以看出,在传输信道比较差时,文献[7~9]算法和传统协作感知算法由于没考虑传输错误和低检测可信度认知用户对协作感知的影响,检测性能受到很大影响,特别是在低虚警概率0.1以下尤为严重。而本文算法考虑到传输信道衰落的影响,合理地给各认知用户分配合适传输可信度,这样可以有效降低不利影响,因此仍能获得较高的检测概率。

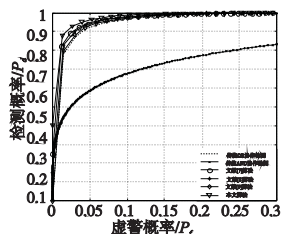


图4 理想传输信道下六种不同协作频谱感知方案性能对比曲线

(其中, $N=5$, $M=6$, 检测信噪比为-14 dB、-15.5 dB、-16.5 dB、-15 dB和-25 dB)

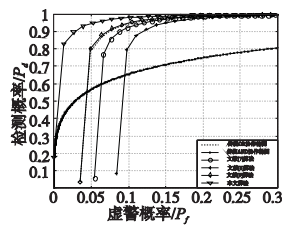


图5 传输信道存在部分阴影衰落时六种算法的检测性能对比

($N=5$, $M=6$, 检测信噪比为-14 dB、-15.5 dB、-16.5 dB、-15 dB和25 dB; 传输信噪比为-21 dB、-12 dB、-12.4 dB、-12.7 dB和-11.6 dB)

5 结束语

本文采用基于动态阈值和可信度的协作频谱感知方法,通过过滤低检测可信度认知用户,以此来消除低检测可信度认知用户参与协作感知对整体检测性能的消极影响,同时与传统方

法相比也能降低系统开销。此外,通过动态调整各认知用户的检测门限和分配传输可信度,可有效降低检测信道和传输信道同时存在阴影等衰落时对协作检测性能的影响。仿真结果表明,本文提出的算法在检测信道和传输信道同时存在阴影等衰落时,具有较好的频谱感知性能。

参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] CABRIC D, MISHRA S M, WILLKOMM D, et al. A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum[C]//Proc of the 14th IST Mobile Wireless Communications Summit. 2005.
- [3] LIANG Ying-chang, CHEN Kwang-cheng, LI G Y, et al. Cognitive radio networking and communications: an overview[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2011, 60(7): 3386-3407.
- [4] 陈亚琨, 赵海峰, 穆晓敏. 认知无线电基于感知信息量化的合作频谱感知[J]. *电视技术*, 2012, 36(17): 106-109.
- [5] AKVILDIZ Ian F, B F, BALAKRISHNAN R et al. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey[J]. *Physical Communication*, 2011, 4(1): 40-62.
- [6] PENG Qi-hang, ZENG Kun, WANG Jun, et al. A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context[C]//Proc of the 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2006: 1-5.
- [7] 杨铁军, 司春丽. 基于信任度加权的合作频谱感知算法[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(8): 3124-3127.
- [8] 肖林, 刘凯. 认知无线网络中的最佳可信度频谱检测算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2011, 38(5): 79-84.
- [9] 郭加贝, 章坚武. 一种基于信噪比的动态门限协作感知方法[J]. *计算机工程*, 2012, 38(3): 91-92, 96.
- [10] URKOWITZ H, GENERAL A C, PHILADELPHIA P. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967, 55(4): 523-531.
- [11] 张平, 冯志勇. 认知无线网络[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 71-75.

(上接第499页)

- [5] 何波, 李军, 林家儒, 等. TDD 慢衰落系统中的预重传 GBN-ARQ 性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(11): 2086-2089.
- [6] 何波, 李军, 林家儒, 等. 具有缓存结构的 GBN 预测重传[J]. *通信学报*, 2005, 26(12): 24-29.
- [7] 董洛兵, 易克初, 沈沛意. TDD 慢衰落无线通信系统的预重传协同 GBN-ARQ 算法[J]. *通信学报*, 2012, 33(2): 149-155.
- [8] CHASE D. Code combining: a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noise packets[J]. *IEEE Trans on Communications*, 1985, 33(5): 385-393.
- [9] ROWITCH D N, MILSTEIN B. On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured Turbo codes[J]. *IEEE Trans on Communications*, 2000, 48(6): 948-959.

- [10] GARG D, KIMURA R, ADACHI F. RCPT hybrid ARQ with limited number of retransmissions in DS-CDMA[J]. *IEEE Electronic Letters*, 2003, 39(2): 241-242.
- [11] CHENG Jung-fu. Coding performance of hybrid ARQ schemes[J]. *IEEE Trans on Communications*, 2006, 54(6): 1017-1029.
- [12] GU Jian, ZHANG Yi, YANG Da-cheng. Modeling conditional FER for hybrid ARQ[J]. *IEEE Communications Letters*, 2006, 10(5): 384-385.
- [13] MANTHA R, KSCHISCHANG F. A capacity-approaching hybrid ARQ scheme using Turbo codes[C]//Proc of Global Communications Conference. 1999: 2341-2345.
- [14] 刘锋, 黄生叶, 冯穗力, 等. 新型的基于信道状况的自适应 HARQ 方案[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(8): 99-102.