文章编号：2095-4980(2018)01-0065-06

基于信道质量优化的动态频谱抗干扰

张 静[1]，徐以涛[1,2]，丁国如[2]，於 凌[2]

(1.解放军理工大学 通信工程学院，江苏 南京 210007；2.国家短波通信工程技术研究中心，江苏 南京 210007)

摘 要：提出一种基于信道质量优化的动态频谱抗干扰技术。通过对信道历史相关参数的估计，建立信道质量优化准则，而后按照准则进行频谱感知和频谱预测，并将两者频谱决策结果进行融合，当频谱决策结果为空闲(即无干扰或者信道空闲)时，用户可动态地接入该信道进行数据传输。通过仿真表明，在相同呼叫次数的情况下，可成功动态地躲避对方的干扰，加快通信链路成功建立平均时间。

关键词：认知无线电；动态频谱抗干扰；信道质量优化准则；链路成功建立平均时间

中图分类号：TN973.3 **文献标志码：**A **doi：**10.11805/TKYDA201801.0065

Dynamic spectrum anti-jamming based on channel quality optimization

ZHANG Jing[1]，XU Yitao[1,2]，DING Guoru[2]，YU Ling[2]

(1.College of Communications Engineering，PLA University of Science and Technology，Nanjing Jiangsu 210007，China；
2.National HF Engineering Center，Nanjing Jiangsu 210007，China)

Abstract：A dynamic spectrum anti-jamming technology based on channel quality optimization is proposed. Firstly, the historical related parameters of channel are estimated and the rule of the channel quality optimization is established based on above parameters. Then, spectrum prediction and spectrum sensing are conducted based on the rules and the decision fusion is further made. Only when the result of spectrum decision is idle(no jamming or the channel is idle), the user can access the channel to transmit data. Simulation results show that this algorithm can both avoid the communication interference and reduce the average linking time of establishing links successfully.

Keywords：Cognitive Radio；dynamic spectrum anti-jamming；channel rank rule；average linking time of establishing communication

当今是一个信息化时代，未来战争将是信息化下的局部战争，电子战成为未来夺取信息权的手段。随着智能化、信息化装备的逐渐增多，电磁环境愈加恶劣和复杂。面对日益恶劣的电磁环境，无线通信抗干扰技术的研究日益受到各国的高度重视，尤其表现在军事方面。军事通信系统所面临的干扰主要是有意人为压制干扰：人们利用无线电干扰设备，采用粗暴手段，即施放随机干扰，覆盖目标信号分布的空间、时间和频谱，压制接收机对有用信号的正常接收。从信息传输的技术角度上讲，就是施放干扰，破坏敌方通信系统信息传输的有效性和可靠性。

随着通信干扰技术的发展，各种抗干扰技术得到迅速发展，其中认知无线电由于其独特的感知、重构、动态接入等特点，在军事通信系统中越来越受到国家相关军事部门的高度重视，现已作为军事通信抗干扰的有效措施[1]。与传统的抗干扰手段相比，它能够更好地适应日益复杂的战场通信环境，具有更强的灵活性、适应性等[2]。

1 传统通信抗干扰技术

在现代化高技术战争的战场环境中，电磁干扰日益凸现，具有快速响应能力的自动化、多功能通信干扰系统给军事通信带来了严重威胁。为确保通信链路安全可靠，通信系统和装备必须具有抗干扰、抗测向等反抗能力，以提高军事通信的时效性、可靠性和保密性。

针对常见的传统通信干扰方式(瞄准式干扰、跟踪干扰以及灵巧干扰等)，出现了很多抗干扰方式，可分为两

收稿日期：2016-10-12；**修回日期：**2017-01-12
项目基金：国家自然科学基金资助项目(61501510；61311160)

大类[3]：a) 扩展频谱抗干扰技术，包括直接序列扩频、跳频、跳时以及它们之间的混合；b) 非扩频类抗干扰技术，包括自适应天线、猝发通信、纠错编码和交织等，具体如表 1 所示。

表 1 几种常见的通信抗干扰技术

Table1 Traditional communication anti-jamming techniques

traditional anti-jamming technology		mechanism	advantages	disadvantages
spread spectrum anti-jamming	direct sequence spread spectrum	The useful signal is extended on a wide band so that the power in the unit band is smaller. The signal is submerged in the noise and not easily detected by the enemy.	signal concealment; low probability of seizure; anti-multipath; the ability of site selection to realize the code division multiple access communication	to realize the correct expansion, the spread code must be synchronized, but the synchronization process is more complicated
	frequency-hopping spread spectrum	When the information code is added to the pseudo-random code mode, the frequency of the carrier oscillator is controlled discretely, so that the frequency of the transmitting signal varies with the pseudo-code.	strong anti-interference ability and multi-path selection ability	synchronous is difficult
	time-hopping spread spectrum	The essence is a time division channel, random selection channel work time by pseudo random code.	strong anti-interference ability and multi-path selection ability	synchronous is difficult
non-spread spectrum anti-jamming	adaptive antenna technology	A variety of new signal processing algorithms are adopted to receive useful signals by adjusting the main and side lobes of the antenna array and to suppress the interference signals.	strong anti-interference ability; having spatial diversity gain; system capacity can be increased	multiple antennas are required and complex signal processing algorithms are required
	burst communication	First, store the information you want to communicate and then burst at a rate of 10 to 100 times or more than normal.	The communication signal is short during transmission, and the probability of being detected and intercepted is low.	no universal applicability
	error correcting codes	A code that can be found or corrected on the receiving end of a transmission is a channel code.	good confidentiality, safe and reliable	limited ability to resist interference

综上所述，几种抗干扰方式都存在缺陷，通信抗干扰需要寻求一种更好的抗干扰方式，而认知无线电的动态频谱接入思想为解决这个问题指引了一个方向。下面简单介绍几种基于认知无线电的动态频谱抗干扰技术[4]。

2 基于认知无线电的动态频谱抗干扰技术

认知无线电技术应用到无线通信[4]中，除了具备传统无线通信抗干扰能力外，还具有对自身周围电磁环境的感知、重构能力，从而提取干扰信号的特征信息，然后根据感知信息、干扰信号特征信息等选择合适的抗干扰策略，可增加系统的抗干扰能力，动态频谱抗干扰是新一代抗干扰通信系统发展的重要方向。表 2 简单列出了 3 种动态频谱抗干扰技术[5-7]及其原理。

表 2 几种动态频谱抗干扰技术

Table2 Several dynamic spectrum anti-jamming techniques

dynamic spectrum anti-jamming technology	mechanism	advantages	disadvantages
anti-jamming based on the Markov decision	The antagonism between secondary users and interference in cognitive network is regarded as zero and anti-interference game, and based on Markov decision, a kind of anti-jamming technology of channel hopping defense is proposed.	effectively resist the scanning interference of the attacker	the scope is small
anti-jamming based on random game	attacker and secondary users as a random game, in every game, secondary users need spectrum authorized user perception and cognition of the attacker state information, and then to make the spectrum decision and how to switch channels, dynamically access free channels to avoid interference	Each secondary user has the opportunity to find the available channel to obtain information about the cognitive attacker.	Each game requires the spectral perception, time and length, the remaining communication time.
anti-jamming based on the probability	By introducing a probabilistic agreement into the spectrum anti-interference, every secondary user can find the available channel dynamically and opportunely, realizing the dynamic spectrum anti-interference.	The communication delay can be reduced to avoid the synchronization between the secondary user control channels and the transmission of information from adjacent nodes.	The length of available communication may be short and the channel quality is poor, and the frequency of channel switching may be increased.

上述动态频谱抗干扰技术虽可降低外来干扰，但都有其局限性，如：抗干扰方式适用范围小，频谱感知时间长，可用信道质量差等。基于以上几点，本文提出一种基于信道质量选择的动态频谱抗干扰技术。通过对信道历史相关参数的估计，建立基于信道干扰相关参数的信道优化准则，而后按照准则进行频谱感知[8-9]和频谱预

测[10-11]，并将其信道状态进行决策融合[10]，将信道干扰概率、信噪比、剩余可通信时长考虑进去，可实现快速、高质量、动态地选择通信频段。

3　基于信道质量优化的动态频谱抗干扰技术

动态频谱接入[10]作为提高信道频谱利用率的一种重要办法，日益受到频管部门以及研究者关注。基于这个思想，动态频谱抗干扰技术应运而生。动态频谱抗干扰技术是一种基于认知无线电中机会频谱接入思想的全新通信抗干扰体制，它将系统工作频段内无干扰或干扰功率低于门限值的子频段看作“频谱空穴”，能否正确检测到频谱空穴，对抗干扰性能有很大影响。

动态频谱抗干扰中常用的 2 种干扰检测方法有频谱感知和频谱预测，但频谱感知和频谱预测都存在虚警和漏检，如果将频谱感知结果与频谱预测结果进行决策融合，可“取其精华，弃其糟粕”，将两者的优势放大，与此对应地将两者的劣势缩小，进而能够获得较好的检测性能，故可考虑将频谱感知与频谱预测结果进行决策融合。

本文基于认知无线电中动态频谱接入思想，利用频谱感知和频谱预测检测或者预测信道状态，选取系统内无干扰或者信道空闲的工作频段进行通信，实现干扰与传输信号的分离，最大程度降低干扰对通信性能的影响。不仅考虑了信道干扰程度，而且考虑了信道的信噪比以及剩余可通信时长，可快速地找到高质量、高可靠的频点进行通信。本文将信道占用分为 2 类：即信道被其他合法用户使用而占用或信道受到恶意干扰而占用，当频谱决策结果为信道占用时，直接进行信道切换，不区分是由于什么原因引起的，且进一步考虑当通信者可以容忍一定干扰存在的情况。

3.1 动态频谱抗干扰模型

一般情况下，对信道空闲概率关注比较多，文献[12]提出了基于信道空闲概率信道质量序列选择准则的动态频谱接入技术，依照排序准则获得的信道顺序进行频谱感知，使得次级用户吞吐量最大。基于此想法，可将信道空闲概率排序准则应用到动态频谱抗干扰中，减小通信双方链路成功建立平均时间，其中 P 为信道干扰(占用)概率，如式(1)所示：

$$M_Q=1-P \tag{1}$$

基于空闲概率的信道质量优化的动态频谱抗干扰模型，如图 1 所示。

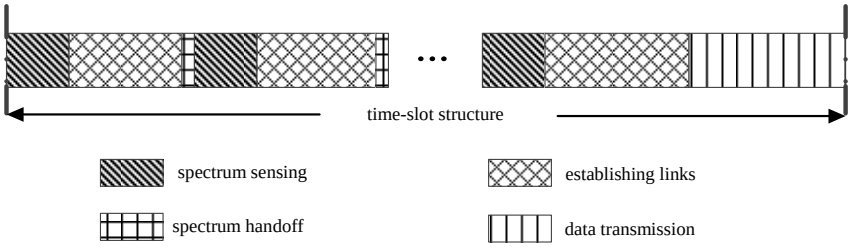

Fig.1 Dynamic spectrum anti-jamming model based on the channel quality optimization of idle probability
图 1 基于空闲概率的信道质量优化动态频谱抗干扰模型

从图 1 中可知，单次链路建立包括 4 部分：频谱感知时长 t_s、通信链路建立时长 t_b、频谱切换时长 t_{sw} 以及数据传输时长。在时隙开始，基于工作频段的历史数据估计信道平均干扰概率 P，而后基于空闲概率的信道质量优化降序排列(即信道干扰概率升序排列)顺序进行频谱感知，再进行链路建立过程。

上述信道质量优化准则只考虑了是否影响通信链路，考虑比较单一，实际中渴望快速找到一条无干扰、高质量、高可靠的信道进行数据传输，减少通信链路成功建立平均时间。为了能够在高质量、高可靠的信道进行通信，本文将信道的平均信噪比、平均可剩余通信时长考虑进去。基于新一代短波自动链路建立技术，将频谱预测、频谱感知与自动链路建立相结合，首先基于历史数据对信道平均干扰概率、信道平均可剩余通信时长、信道平均信噪比 3 个参数进行统计估计，进一步提出基于信道质量优化的动态频谱抗干扰模型。本系统只考虑多个信道的同一个时隙的动态频谱抗干扰情况，故信道切换只发生在信道之间，如图 2 所示。

单次链路建立模型如图 2 所示，包括 5 部分：频谱预测、频谱感知、通信链路建立、频谱切换以及数据传输。在时隙开始，基于工作频段的历史数据估计信道平均干扰概率 P、信道平均可剩余通信时长 L 以及信道的统计平均信噪比等干扰特征参数。通过估计这些参数，进一步提出本文信道质量优化选择准则，如式(2)所示：

$$M_{Q-\mathrm{new}} = L \times R_{\mathrm{SN}} \times (1+\log_{\lambda} P) \tag{2}$$

其中 $0<\lambda<1$，表示通信质量的度量(选择干扰程度高但信道信噪比性能好及剩余通信时长长的频段通信，或者选择干扰程度低，但信道信噪比性能差及剩余通信时长短的频段通信)，记 $M_E = L\times R_{\mathrm{SN}}$。从式(2)可推导出：

$$\frac{\partial M_{Q-\mathrm{new}}}{\partial P\partial\lambda} = -\frac{M_E}{P\lambda}\left(\frac{1}{\ln\lambda}\right)^2 < 0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial M_{Q-\mathrm{new}}}{\partial M_E\partial\lambda} = -\frac{\ln P}{\lambda}\left(\frac{1}{\ln\lambda}\right)^2 > 0 \tag{4}$$

所以，当更多关注信道干扰程度而对信道信噪比和剩余通信时长要求不高时，信道质量优化选择准则设计中可选择较小的 λ；当更多地关注信道信噪比和剩余通信时长而对信道干扰程度要求不高时，信道质量优化选择准则设计中可选择较大的 λ。

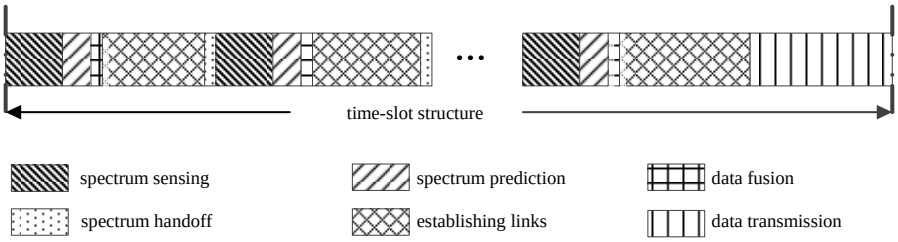

Fig.2 Dynamic spectrum anti-jamming model based on the new channel quality optimization
图 2 本文所提信道质量优化的动态频谱抗干扰模型

动态频谱抗干扰流程如图 3 所示，首先基于估计的信道干扰特征参数，建立信道质量优化选择准则，然后按照准则依次进行频谱感知和频谱预测，并将 2 种频谱状态结果进行逻辑“或”融合[12]。当融合结果为当前信道受到干扰占用时，则直接进行信道切换，成功躲避干扰；当融合结果为信道空闲(即无干扰或者干扰程度为用户可以接受该频段且未被其他用户使用)且当期信道信噪比(信道时变)大于设置的阈值时，通信双方开始进行异步链路建立过程。若链路建立失败，则依据信道质量优化选择准则进行信道切换。重复上述链路建立过程，若链路建立成功，则通信双方进行通信，其中链路建立过程如图 4 所示。

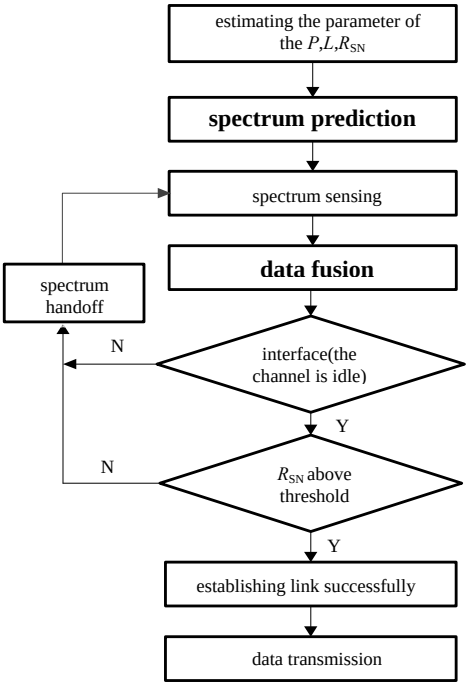

Fig.3 Process of dynamic spectrum anti-jamming
图 3 动态频谱抗干扰流程

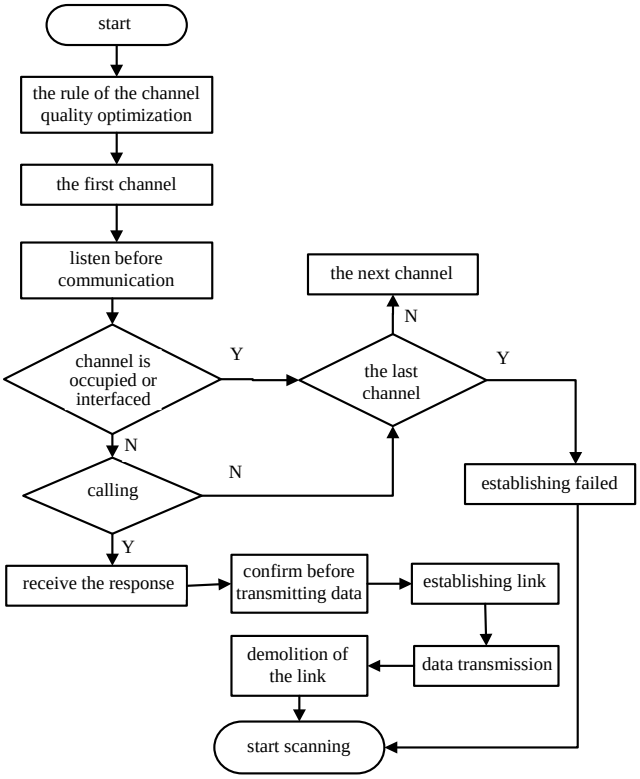

Fig.4 Process of link establishing
图 4 链路建立流程

注:基于空闲概率信道质量优化排序动态频谱抗干扰流程与本文所提抗干扰流程不同的是没有频谱预测和数据融合过程(图 3 中文字加粗的方框)，其他部分都相同。

3.2 实验结果与分析

利用基于信道质量优化的动态频谱抗干扰技术，采用蒙特卡罗(Monte Carlo)仿真了 1 000 次链路建立过程，对 500 个信道的信道平均干扰概率、信道平均剩余可通信时长、平均信噪比依据长期的历史数据进行统计分析，而后基于信道质量优化选择准则进行频谱感知和预测。模型中频谱预测时间为 3 ms，频谱感知时间为 10 ms，信道切换时间为 2 ms，发送一个完整的自动链路建立字时间为 1.35 s，信噪比阈值设为 7.5 dB。进一步假设各信道信噪比服从均值不同、方差相同的高斯分布，各信道噪声均值为 0，方差为 1。频谱感知算法利用能量检测，且设频谱感知检测概率为 0.9；频谱预测算法利用神经网络中的工具箱和历史数据进行频谱预测。本文所提基于干扰存在的频谱感知和频谱预测决策融合准则选择逻辑“或”准则。

基于以上参数,本文对比了基于空闲概率的信道质量优化选择准则(原算法)和本文新提出信道质量优化选择准则(新算法)2 种动态频谱抗干扰技术下通信链路成功建立平均时间的性能，如图 5 所示。

从图 5 中可以看出：在相同呼叫次数的情况下，基于本文所提信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰链路成功建立平均时间要优于基于信道空闲概率信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰。

在图 5 结果的基础上,图 6 进一步从统计的角度给出了 2 种动态频谱抗干扰技术下链路成功建立平均时间的累积分布函数(Cumulative Distribution Function，CDF)，从图中可以看出：基于本文信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰的 CDF 相比基于空闲概率信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰的 CDF 较为陡峭，即本文所提基于信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰技术性能更优。

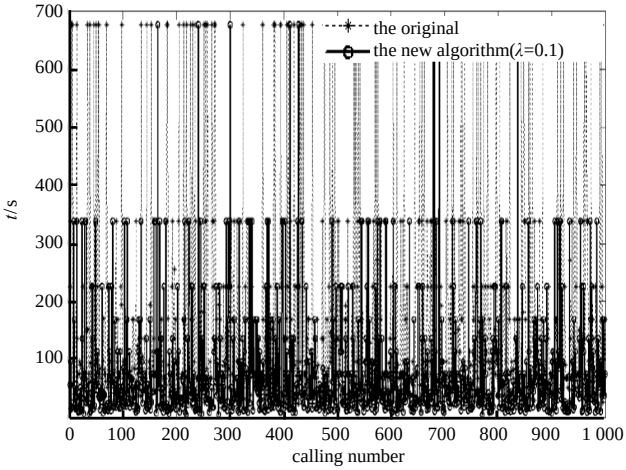

Fig.5 Average time of establishing communications based on different anti-jamming techniques
图 5 不同抗干扰技术下链路成功建立平均时间

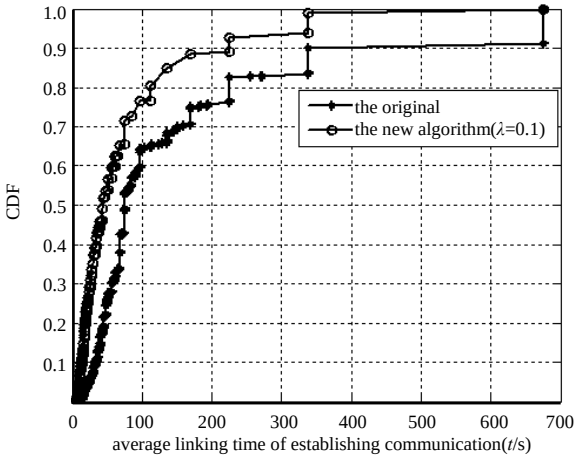

Fig.6 CDF based on different anti-jamming techniques
图 6 不同抗干扰技术下链路成功建立平均时间的累积分布函数

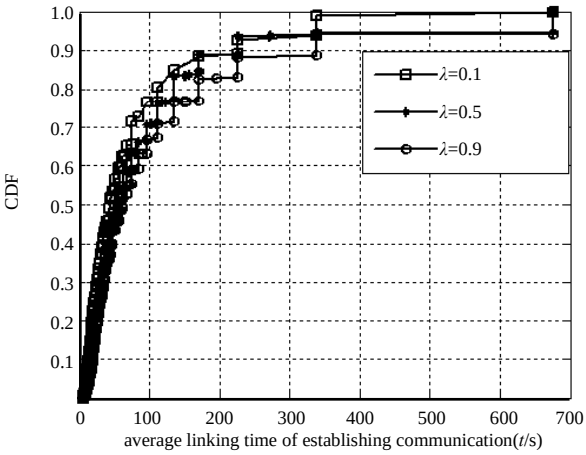

Fig.7 CDF based on the new anti-jamming technique
图 7 不同 λ 下本文所提抗干扰技术链路成功建立平均时间累积分布函数

为进一步证明，不同取值的 λ 对于抗干扰性能的影响，图 7 从统计角度给出了不同 λ 取值下，基于本文信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰下的链路成功建立平均时间性能，从图中可看出，λ 越小，本文所提信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰性能越好，链路成功建立平均时间越短。

4 结论

在电磁干扰问题日益凸现的背景下，本文结合认知无线电的特点和优势，提出基于信道质量优化选择的动态频谱抗干扰以解决电磁干扰问题，同时在没有受到干扰的情况下，可快速找到高质量、高可靠的信道进行数据通信，减少了链路成功建立平均时间。仿真表明，在相同呼叫次数的条件下，本文所提信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰性能优于基于空闲概率信道质量优化选择准则的动态频谱抗干扰。

参考文献：

[1] 殷云志. 无线通信对抗技术及发展趋势[J]. 无线电工程, 2008,38(10):50-52. (YIN Yunzhi. Anti-jamming technologies of wireless communication and their development trend[J]. Radio Engineering, 2008,38(10):50-52.)

[2] 魏奇. 基于认知无线电抗干扰技术分析[J]. 无线通信技术, 2011,37(4):56-58. (WEI Qi. Study on anti-jamming technology based on the cognitive radio[J]. Communications Technology, 2011,37(4):56-58.)

[3] 张志坚,关建新,张勤. 基于认知无线电的军事通信抗干扰研究[J]. 船舶电子工程, 2009,29(1):1-4. (ZHANG Zhijian, GUAN Jianxin,ZHANG Qin. Research on military communication anti-jamming based on the cognitive radio[J]. Naval Electronic Engineering, 2009,29(1):1-4.)

[4] 朱毅超,陆建勋. 动态频谱抗干扰系统在部分频带干扰下的性能[J]. 电子学报, 2011,39(10):2331-2337. (ZHU Yichao, LU Jianxun. Performance of dynamic spectrum anti-jamming systems under partial-band noise jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2011,39(10):2331-2337.)

[5] WU Yongle,WANG Beibei,LIU K J R,et al. Anti-jamming games in multi-channel cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012,30(1):4-15.

[6] WANG Beibei,WU Yongle,LIU K J R,et al. An anti-jamming stochastic game for cognitive radio networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2011,29(4):877-889.

[7] PIETRO R D,OLIGERI G. Jamming mitigation in cognitive radio networks[J]. IEEE Network, 2013,27(3):10-15.

[8] GHASEMI A,SOUSA S E. Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs[J]. IEEE Communications Magazine, 2008,23(4):32-39.

[9] LIANG Y C,ZENG Y H,PEH E C Y,et al. Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio works[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2008,7(4):1326-1337.

[10] DING G R,WANG J L,WU Q H,et al. On the limits of predictability in real-world radio spectrum state dynamics: from entropy theory to 5G spectrum sharing[J]. IEEE Communications Magazine, 2015,53(7):178-183.

[11] JIANG H,LAI L F,FAN R F,et al. Optimal selection of channel sensing order in cognitive radio[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009,8(1):297-307.

[12] ZHANG J,DING G R,XU Y T,et al. On the usefulness of spectrum prediction for dynamic spectrum access[C]// 2016 8th International Conference on Wireless Communication and Signal Processing. Yangzhou,China:IEEE, 2016:1-4.

作者简介：

张　静(1989-)，女，郑州市人，硕士，主要研究方向为动态频谱接入、频谱预测、通信抗干扰.email:zhangjing614227@163.com.

徐以涛(1971-)，男，山东省临沂市人，博士，教授，主要研究方向为软件无线电技术、认知无线电、信号理论与信号处理、通信对抗技术.

丁国如(1986-)，男，河南省新乡市人，博士，讲师，主要研究方向为认知无线电、无线通信、信号理论与信号处理.

於　凌(1994-)，男，江苏省无锡市人，硕士，主要研究方向为频谱预测、短波信道分析.