

# 一种基于多频带 PSWFs 组合的 CUWB 自适应脉冲波形设计

陈国东 武穆清

(北京邮电大学宽带通信网络实验室 北京 100876)

**摘要:** 本文简述了认知超宽带(CUWB)系统的工作原理, 并从自适应频谱环境和兼容 FCC 频谱模板的角度出发, 建立了基于频谱感知来动态构建 CUWB 系统自适应辐射掩蔽的机制。然后, 利用 PSWFs 函数的特性, 提出了一种基于多频带的回转椭球波函数(PSWFs)基的加权线性组合来设计 CUWB 自适应脉冲波形的算法。仿真结果表明, 该算法所产生的脉冲波形不仅能满足 CUWB 系统频谱模板的要求, 而且能自适应模板的动态变化。

**关键词:** 认知超宽带系统; 自适应频谱模板; 自适应脉冲波形; 回转椭球波函数

中图分类号: TN914.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1432-05

## Adaptive Pulse Waveform Design Based on the Combination of Multiple PSWFs for CUWB System

Chen Guo-dong Wu Mu-qing

(Broadband Communication Network Lab, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** This paper introduces the operating fundament of Cognitive Ultra WideBand (CUWB) wireless communication system and gives a scheme of dynamically obtaining adaptive emission mask based on spectrum sensing to adapt to spectrum environment and be compatible with FCC spectral mask. Then, a method to generate adaptive CUWB shaping pulse is proposed based on weight combination of Prolate Spheroidal Wave Functions(PSWFs) matching UWB multiple sub-band spectral mask. The simulation results show that the pulse waveforms shaped by this method conform the spectral mask constraint for CUWB, adapt to dynamical variety of the spectral mask.

**Key words:** Cognitive Ultra WideBand system(CUWB); Adaptive spectral mask; Adaptive pulse waveform; Prolate Spheroidal Wave Functions(PSWF)

### 1 引言

由于UWB的超宽带特性, 当其辐射功率超过某一阈值时它可能会对共享频段内的临近窄带系统产生宽带干扰, 并且自身也将受到其它系统在某频段的强干扰。目前, 所有针对这个问题的解决方案都是在针对UWB系统本身进行优化设计, 研究思路大都是集中在UWB脉冲信号波形的设计与优化上, 以期产生出严格遵守美国联邦通信委员会(FCC)等机构制订的辐射掩蔽约束条件的脉冲信号<sup>[1, 2]</sup>, 并采用一些有效的抑噪技术来减少对现有窄带系统的干扰。但是, 许多研究已经表明这种思路要想设计出既符合各相关机构制订的频谱模板约束又可避免相互干扰的脉冲波形是非常有挑战性的。这主要是由于该设计方法没有和外界环境交互, 缺少对周围射频环境的了解, 使得UWB系统的频谱共享缺乏灵活性, 系统间共存缺少针对性, 限制了UWB系统性能和频谱利用率的进一步提高。基于这个考虑, 并结合认知无线电具有能感知周围环境特别是频谱操作环境的特性, 文献[3-5]把认知无线电(Cognitive Radio, CR)技术引入到

UWB系统的研究和设计中, 给UWB面临的上述问题提供了一种全新的解决思路, 并由此可以设计出一种全新体制的高性能UWB系统。

本文基于RF环境感知来动态构建UWB系统的自适应辐射掩蔽的机制, 并利用对应于不同频带上频谱模板的PSWFs函数基的线性组合来设计与之相应的频谱灵活的CUWB成形脉冲。利用这种机制及方法设计的脉冲不仅能提高频谱利用的灵活性, 改善频谱共享, 有效抑制窄带干扰, 与其它系统更好地共存, 同时, 还可潜在地提高频谱的利用率, 提高数据传输速率和UWB系统的整体性能。

### 2 自适应辐射掩蔽 CUWB 系统

#### 2.1 CUWB 系统认知模型

认知超宽带(Cognitive Ultra WideBand, CUWB)无线通信系统, 是结合认知无线电和超宽带技术的主要优点来联合设计研究的一种智能无线系统, 是一种基于频谱感知的具有自适应辐射掩蔽(或频谱模板)和灵活波形的新型超宽带系统。该系统的基本原理主要是利用 CR 能够感知周围的频谱环境和 UWB 系统易于数字化软件化的特性, 依据感知得到的频谱信息和动态频谱分配策略来自适应地构建 UWB

系统的频谱结构,并生成相应的频谱灵活的自适应脉冲波形,根据信道的状态信息进行自适应地发射与接收。由于具有环境感知功能, CUWB 系统的特性及相关操作流程与现行超宽带系统相比发生了显著的变化,同时,由于 UWB 与 CR 共享频谱的方式存在本质上的差异,这使得 CUWB 的认知循环过程与一般的 CR 系统也不尽相同。在认知无线电中,最典型的是 Mitola 博士<sup>[6]</sup>提出的基于机器学习和模式推理的认知循环模型,他认为认知无线电系统应该具备检测、分析、调整、推理、学习等能力。但是, Mitolo 并没有提出相应的实现具有认知功能的物理层和 MAC 层体系结构的底层支撑技术,且其提出的认知循环过程比较复杂。考虑到系统认知功能的智能化水平与实现复杂度方面的折衷,本文结合 UWB 系统特性对 CUWB 系统的认知过程进行了简化处理,使其具备检测、分析和调整这 3 个最基本的认知能力,以使 CUWB 系统上层能够建立在现实的物理层模型之上,如图 1 所示。

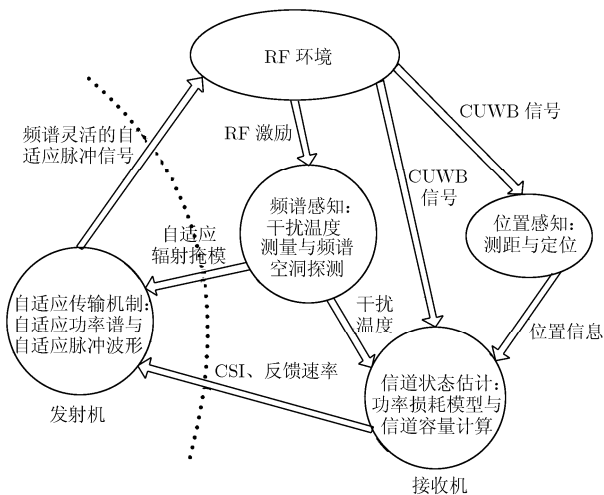


图1 CUWB系统的认知循环处理模型

在该模型中, CUWB 系统认知循环处理过程是从接收机检测射频激励信号开始的,通过在一个宽的频带上感知频谱环境来估算干扰温度及探测频谱空洞,根据 RF 环境感知的结果信息动态构建 CUWB 系统的辐射掩蔽,以约束 UWB 信号的发射,确保 UWB 与该频带上其他系统无干扰地共存。发射机需要根据接收机反馈的频谱及信道状态信息进行动态频谱管理及发射功率控制以形成 CUWB 系统的自适应功率谱,并产生与之相匹配的频谱灵活的自适应脉冲信号。

## 2.2 CUWB 自适应辐射掩蔽机制

在认知无线电技术中,对频谱进行检测就是对所观察的频段进行干扰温度的估计,其目的就是为了探测频谱空洞。经过谱估计得到的干扰温度与预先设定的干扰温度限进行比较,就可以对观测的待查频带进行选择,超过界限的都是不符合通信要求的频谱。那么在 CUWB 系统中,频谱检测的任务就是在 UWB 的法定频段上进行各子带的干扰温度

估计,不同类别的频带上允许发射的功率级别不一样,这样就可以动态地构建 UWB 系统自适应的辐射掩蔽。因此,在设计 CUWB 系统时,可以基于干扰温度的测量来实时地调整允许 UWB 传输的功率谱密度,以此为基础来构建具有自适应频谱模板机制的 UWB 系统<sup>[7]</sup>。考虑到 CR 技术中频谱空洞探测算法对频谱带宽的敏感(具体的频谱感知算法不在本文探讨的范围之内),并从兼容 FCC 给出的辐射掩蔽的角度出发,本文提出了一种基于 FCC 频谱模板分段加权的机制来构建 CUWB 系统的动态频谱模板。描述如下:

(1)把 UWB 的法定频段  $f_p = \{f | f \in [3.1, 10.6] \text{GHz}\}$  划分为连续的  $N$  个子带  $f_i$ ;

(2)测量各个子带  $f_i$  的干扰温度,估算出各子带上可允许传输的功率谱  $P_i$ ,并对  $f_i$  进行归类标识,不同的类别具有不同的权值  $w_i = \int_{f_i} P_i df / \left( \int_{f_i} S_{\text{FCC}}(f) df \right)$ ,其中  $S_{\text{FCC}}(f)$  是 FCC 规划的频谱模板,如图 2 中所示。

(3)令 CUWB 的频谱模板  $S_{\text{CUWB}}(f) = \begin{cases} w_i S_{\text{FCC}}(f_i), & i \in [1, N] \\ S_{\text{FCC}}(f), & f \notin [3.1, 10.6] \text{GHz} \end{cases}$ ,使其既能动态反映频谱环境

的变化从而有利于系统共存和抑制各种干扰,又能兼容 FCC 制订的模板便于早日实用化。如,当  $w_i = 1$  时,有  $S_{\text{CUWB}}(f) = S_{\text{FCC}}(f)$ ,这时 CUWB 的自适应频谱模板与 FCC 制订的模板完全一致,如图 2 所示。

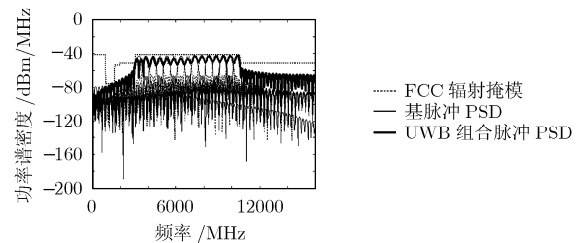


图2 UWB脉冲  $p_U(t)$ 和基脉冲  $\varphi_{U,0}(t)$ 的 PSD

基于这种具有自适应频谱模板的 CUWB 系统将有很大的灵活性,与当前 UWB 系统预先严格地规定其辐射掩蔽的机制大大地不同,相比而言具有许多优点。然而,为了能够实现所提议的 CUWB 冲激无线电系统,必须解决的关键问题之一是要设计出与动态频谱模板相符合的自适应脉冲波形。

## 3 CUWB 自适应脉冲波形设计

### 3.1 问题描述

在动态构建了 CUWB 系统的辐射掩蔽之后,要能真正使其具有现实的工程意义,关键是能生成与频谱模板相适应的成形脉冲,并能灵活地调整和修正脉冲波形以自适应 CUWB 频谱模板的动态变化。考虑到这些需求,本文的设计目标是相应于所给定的发射频谱特性,设计出符合要求的脉冲波形,并自适应于其动态变化。在当前的 UWB 系统脉

冲波形设计中,一般情况下可以通过选择一种经过优化设计的脉冲<sup>[2]</sup>来基本上满足 FCC 频谱模板的规定。但是,要满足 CUWB 系统动态变化的功率谱限制的要求,仅仅依靠一种脉冲波形是相当困难的。在设计中,可以采用不同的脉冲进行组合来设计 CUWB 系统的自适应脉冲波形  $p_i(t)$ , 即

$$p(t) = \sum_{i=1}^N a_i p_i(t) \quad (1)$$

式中  $a_i$  是组合系数,  $p_i(t)$  表示第  $i$  个脉冲波形。因此,设计自适应脉冲的任务可描述为:设计并选取适当的  $p_i(t)$  和  $a_i$  使得

$$|P(f)|^2 \leq S_{\text{CUWB}}(f), \quad \forall f \quad (2)$$

其中  $P(f)$  是 CUWB 自适应脉冲  $p(t)$  的频谱。同时,考虑到 CUWB 脉冲频谱的灵活性,期望所设计的  $p_i(t)$  应该是带通与时限的。然而,由 Heisenberg 测不准定则可知,一个信号的时间域  $\Delta t$  和它对应的频谱域  $\Delta \omega$  之间有着近似的倒数关系,即信号在频域上集中分布必然导致其在时间域上分散,反之亦然。因此,要设计或找到一个在两个共轭的域上都尽可能集中分布的信号是不易的<sup>[8]</sup>。而回转椭球波函数 (Prolate Spheroidal Wave Functions, PSWFs) 是个有效的解决办法。在接下来的小节中,我们将基于 PSWFs 函数的特性,提出一种基于不同频带的 PSWFs 函数基的加权组合来设计 CUWB 自适应脉冲波形的方法。

### 3.2 CUWB 自适应脉冲波形设计

**3.2.1 带通与时限脉冲的导出** 回转椭球波函数集<sup>[8]</sup> PSWFs  $\{\varphi_i(t)\}$  可以表述为:对于任何大于零的时间区域  $T > 0$  和任何上限角频率  $\omega > 0$ , 都存在一个实函数集  $\{\varphi_i(t)\}$  和一组正的实数  $\lambda_0 > \lambda_1 > \dots > \lambda_i > \dots$ , 其中  $i \in \{0, 1, 2, \dots\}$ , 使得

$$\int_{-\infty}^{\infty} \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt = \delta_{i,j} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (3)$$

$$\int_{-T/2}^{T/2} \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt = \lambda_i \delta_{i,j} = \begin{cases} \lambda_i, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (4)$$

式(3)、式(4)成立。同时,它们也是如下积分方程的特征函数

$$\int_{-T/2}^{T/2} \varphi(x) \frac{\sin \omega(t-x)}{\pi(t-x)} dx = \lambda \varphi(t) \quad (5)$$

其中  $\varphi(t)$  是回转椭球的本征函数,  $\lambda$  是其对应的本征值,它们都是回转椭球参数  $C$  的函数,  $C = T\omega/2 = 2\pi TW/2 = \pi TW$  称为系统的时间带宽积,表示系统的设计自由度。

由式(5)可以看出,输入函数  $\varphi(t)$  经过角频率  $\omega$  限制和时间  $T/2$  限制之后,系统的输出函数仍为它自身  $\varphi(t)$ , 但要乘上一个表示能量集中度的衰减因子  $\lambda$ 。进一步对式(5)进行变换可得

$$\lambda \varphi(t) = \varphi(t) \otimes 2W \operatorname{sinc} 2Wt \quad (6)$$

这在物理上可等效为一个持续时间为  $T$  的脉冲信号  $\varphi(t)$  通过带宽为  $W$  理想低通滤波器,其输出为  $\lambda \varphi(t)$ 。且由

式(3),式(4)可知,对应于  $\lambda_0$  的回转椭球波函数  $\varphi_0(t)$  通过一时间限制  $[-T/2, T/2]$  和频带限制  $[-W, W]$  的系统之后,能量最大限度集中,其能量损失最小。由此可推出,当脉冲  $\varphi(t)$  通过一个上限截止频率为  $f_u$  下限截止频率为  $f_l$  的理想带通滤波器时,其输出也有同样的形式  $\mu \varphi(t)$ , 且满足

$$\begin{cases} \mu \varphi(t) = \varphi(t) \otimes h(t) \\ h(t) = 2f_u \operatorname{sinc} 2f_u t - 2f_l \operatorname{sinc} 2f_l t \end{cases} \quad (7)$$

其中  $h(t)$  为理想带通滤波器的冲激响应。并且,当输入脉冲取回转椭球波函数  $\varphi_0(t)$  时,该系统的输出就是一个时域与频域上都具有最佳能量集中度的带通与时限回转椭球脉冲。这正是本文设计基脉冲  $p_i(t)$  的基础。

**3.2.2 CUWB 自适应脉冲波形设计方法** 先把位于  $f_p$  频段的 FCC 频谱模板下的  $N$  个子带  $f_i$  等效为  $N$  个理想带通滤波器,其对应的冲激响应  $h_i(t)$  和频率响应  $H_i(f)$  分别可表示为  $h_i(t) = 2f_{i,u} \operatorname{sinc} 2f_{i,u} t - 2f_{i,l} \operatorname{sinc} 2f_{i,l} t$ 。

$$H_i(f) = \begin{cases} 1, & f_{i,l} < f_i < f_{i,u} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

其中  $f_{i,u}$  和  $f_{i,l}$  分别表示第  $i$  个子带的高频和低频。把式(8)中的  $h_i(t)$  代入式(7)可得

$$\mu_i \varphi_i(t) = \varphi_i(t) \otimes h_i(t) \quad (9)$$

由上一小节,可知式(9)中  $\varphi_i(t)$  表示脉宽为  $T$  的输入脉冲,  $\mu_i$  表示  $\varphi_i(t)$  在子带  $i$  上的能量集中度,  $\mu_0$  对应的  $\varphi_{i,0}(t)$  具有最佳的能量集中度且符合相应子带上 FCC 频谱模板的规定。因此,在设计中,首先选取  $\varphi_{i,0}(t)$  作为基脉冲  $p_i(t)$ 。然而,由于 PSWFs 函数没有显式表达式,只能通过计算得到其相应的近似解。对式(9)进行离散化处理可得到其对应的离散卷积形式,并可化简成一个矩阵方程,通过该矩阵方程的特征值分解可求得  $\varphi_i(t)$  的一系列近似数值解  $\tilde{\varphi}_{i,k}(t)$ <sup>[9]</sup>, 然后从中选取最大的特征值所对应的特征向量  $\tilde{\varphi}_{i,0}(t)$  先作为我们所要设计的基脉冲,即

$$p_i(t) = \tilde{\varphi}_{i,0}(t) \quad (10)$$

然后,就可利用这求得的  $N$  个零阶回转椭球波函数  $\tilde{\varphi}_{i,0}(t)$  的线性组合来设计 CUWB 自适应脉冲。把式(10)代入式(1)可得

$$p(t) = \sum_{i=1}^N a_i \tilde{\varphi}_{i,0}(t) \quad (11)$$

对式(11)进行傅里叶变换可得

$$P(f) = \sum_{i=1}^N a_i \tilde{\Psi}_{i,0}(f) \quad (12)$$

因此,接下来设计的关键就是选取适当的组合系数  $a_i$ , 并依据需要选取相应子带上具有不同能量集中度的  $\tilde{\varphi}_{i,k}(t)$  来调整相应的基脉冲  $p_i(t)$ , 使得式(12)满足式(2)的约束条件。整个算法的设计过程可描述如下:

(1) 动态生成 CUWB 系统的频谱模板  $S_{\text{CUWB}}(f)$ 。

(2) 按式(10)选取初始基脉冲。

(3) 为了使各子带  $f_i$  上所对应的基脉冲符合 CUWB 系

统相应子带上的辐射掩蔽规定, 可先设  $a_i = \sqrt{w_i}$ 。

(4) 检验  $a_i$  加权线性组合脉冲  $p(t) = a_i p_i(t)$  的功率谱密度是否满足 CUWB 辐射掩蔽的规定。

(5) 若上一步检验满足了辐射掩蔽的要求, 则找到了符合要求的组合系数  $a_i$  及基脉冲  $p_i(t)$ ; 否则, 就必须调整  $a_i$  及  $p_i(t)$  的值, 可令  $a_i = a_i \alpha$ , 其中  $\alpha$  为小于 1 的系数调节因子,  $p_i(t)$  依据需要从  $\tilde{\varphi}_{i, k}(t)$  中选取。

(6) 重复式(4)~式(5), 直到找到符合要求的组合系数及基脉冲。为了使算法具有较快的收敛性, 可在实现时设定一误差阈值, 当所产生的组合脉冲的功率谱密度与动态辐射掩蔽之间的距离在阈值之内时, 可近似地认为找到了符合要求的成形脉冲。

### 4 仿真结果

在仿真中, 把 UWB 法定频段分成 15 个 500MHz 的子带, 频谱模板权值设为 [0, 2] 之间的随机数, 即取  $N=15$ ,  $w_i = 2 \text{rand}(1, N)$ 。为了说明 CUWB 的频谱模板可以兼容 FCC 的掩模, 首先设定  $w_i \equiv 1$ , 然后根据算法, 可以得到相应子带上的脉冲基  $\tilde{\varphi}_{i, 0}(t)$  及其组合脉冲  $p_U(t)$ , 其对应的功率谱密度及波形如图 2, 图 3 所示, 并把  $p_U(t)$  的功率谱密度与文献[2]及文献[9]所得到的脉冲功率谱密度做了比较, 如图 4 所示。从该图中可以看出, CUWB 的动态频谱模板是与 FCC 兼容的, 本文所提的算法完全能够适用于一般的 UWB 系统成形脉冲的设计, 且生成的脉冲具有更高的频谱利用率。

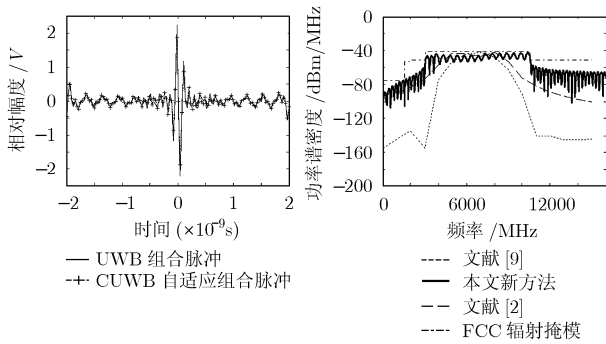


图 3  $p_U(t)$  和  $p_C(t)$  波形

图 4 与其它方法生成的 UWB 脉冲的 PSD 的比较

接下来, 取加权系数的任意一组随机数以对应实际的频谱环境。在仿真中, 先生成各子带上满足对应子带频谱模板要求的基脉冲  $p_i(t)$ , 再经过调整组合系数  $a_i$  及  $p_i(t)$  后, 可得到各基脉冲的功率谱如图 5 所示, 组合脉冲  $p_C(t)$  的波形及其相应的功率谱图, 如图 3、图 6 所示。

由于采用了  $N$  个可调节能量集中度的基脉冲的线性组合及其可以选择不同的组合系数  $a_i$ , 这给脉冲波形的产生带来了很大的灵活性。并且, 频谱模板允许动态变化以适应频谱环境的变化, 可有针对性地抑制各种干扰, 达到系统更好地共存。

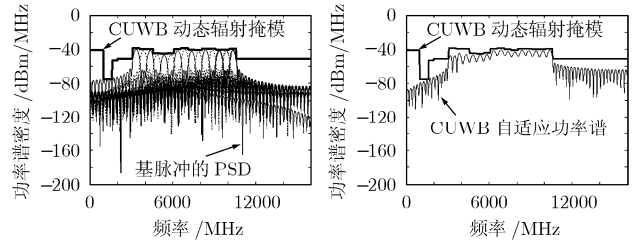


图 5 CUWB 基脉冲  $p_i(t)$  的 PSD

图 6 CUWB 自适应脉冲  $p_C(t)$  的 PSD

### 5 结束语

与当前 UWB 系统预先严格地规定其辐射掩蔽的机制大大地不同, 本文所提的 CUWB 系统具有自适应的动态频谱模板, 使其能实时反映频谱环境的变化。为了生成与之相匹配的脉冲波形, 本文提出了利用多个 UWB 子频带的协作来生成与频谱模板相适应的 CUWB 成形脉冲, 并能自适应掩模的动态变化。该算法具有很大的灵活性和通用性, 可以通过修改脉冲生成算法中的诸多参数来实现 CUWB 频谱灵活的脉冲波形, 可以适应实际的干扰环境和满足各种频谱模板的要求。

### 参考文献

- [1] Luo Xiliang, Yang Liuqing, and Giannakis G B. Designing optimal pulse-shapers for ultra-wideband radios. *Ultra Wideband Systems and Technologies, 2003 IEEE Conference on 16-19 Nov. 2003*: 349-353.
- [2] 张洪欣, 吕英华, 贺鹏飞, 等. 利用小波函数生成UWB正交成形脉冲序列的方法[J]. *北京邮电大学学报*, 2006, 29(4): 65-68.  
Zhang Hongxin, Lv Yinghua, and He Pengfei, *et al.* A method orthogonal shaping pulses for UWB using wavelet[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2006, 29(4): 65-68.
- [3] Granelli F and Zhang Honggang. Cognitive ultra wide band radio: a research vision and its open challenges. *Networking with Ultra Wide Band and Workshop on Ultra Wide Band for Sensor Networks, 2005. Networking with UWB 2005. 2nd International Workshop 4-6 July 2005*: 55-59.
- [4] Zhou Xiaofei, Yazdandoost K Y, and Zhang Honggang, *et al.* Cognospectrum: spectrum adaptation and evolution in cognitive ultra-wideband radio, 2005 IEEE International Conference on 5-8 Sept. 2005: 713-718.
- [5] Zhang Honggang, Zhou Xiaofei, and Chlamtac Imrich. Multiple signal waveforms adaptation in cognitive ultra-wideband radio evolution. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2006, 24(4): 878-884.

- [6] Mitola J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio[PhD Dissertation]. Royal Inst. Technol.(KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [7] Roberts Rick. Comments on FCC NPRM ET Docket 03-237 Interference noise temperature[R]. IEEE 802.15-03-0534-00-003a, 2003.
- [8] 陶纯堪, 陶纯匡. 光学信息论[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 1-10.
- [9] Parr B, Cho B, and Wallace K. A novel ultra-wideband pulse design algorithm[J]. *IEEE Communications Letters*, 2003,

7(5): 219-221.

陈国东: 男, 1978 年生, 博士生, 目前研究方向为超宽带无线通信与认知无线电等新一代无线通信技术.

武穆清: 男, 1963 年生, 教授, 博士生导师, 北京邮电大学研究生院副院长, 目前研究方向为下一代无线宽带接入技术、基于 Intel 网络处理器的研究与开发、B3G、超宽带无线通信、认知无线电、移动 Ad hoc 网络、无线定位系统等.