

# 基于小波和优化组合认知超宽带波形设计方法

赵延明, 陈长兴, 牛德智, 符辉

(空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

**摘要** 研究了认知超宽带(CUWB)脉冲波形设计问题,提出了一种基于Morlet小波和优化组合CUWB波形设计方法。在分析Morlet小波时频特性的基础上,制定了该方法的设计实现步骤。首先由“二分法”获得符合FCC频率掩模要求的小波伸缩因子取值区间,其次通过设计可编程逻辑语言来寻找最优组合权值,获得高频谱效率的UWB脉冲波形。综合考虑认知用户检测到的授权用户频段,设计阻带滤波器进行窄带干扰抑制,将UWB脉冲波形通过滤波器后可得CUWB脉冲波形。仿真实验表明:该方法易于实现和操作,设计波形具有良好的自相关性和高频谱利用率,方法为CUWB的波形设计问题研究提供了一种新的思路。

**关键词** 认知超宽带;波形设计;优化组合;阻带滤波器

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.01.017

**中图分类号** TN914.42 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)01-0077-05

## A Waveform Design Method of Cognitive Ultra Wide Band Communications Based on Optimized Combination Wavelet

ZHAO Yan-ming, CHEN Chang-xing, NIU De-zhi, FU Hui

(Science College, Air-Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Pulse waveform design problems of cognitive ultra wide band (CUWB) are studied, and a method of optimized combination Morlet wavelet is proposed. On the basis of characteristic analysis in time and frequency domain of Morlet, the design steps of the method are worked out. Firstly, the value area of wavelet stretching factor is acquired by the use of dichotomy method under the action of power spectrum density (PSD) met the needs of FCC spectral mask. Then, optimized weight is searched by designing programmable logic language so as to get combined UWB pulse with high frequency spectrum efficiency. In consideration of authorized frequency band detected by cognitive user, band-stop filter is designed for suppressing narrow band interference, thus CUWB pulse waveform is got by making UWB pulse pass the designed filter. The simulation shows that the proposed method is susceptible to realization and operation, the designed waveform has good autocorrelation character and high spectrum utilization ratio, which provides a new thought for waveform design of CUWB.

**Key words:** cognitive ultra wide band (CUWB); waveform design; optimized combination; band-stop filter

随着无线通信技术飞速发展,频谱资源日趋紧张,认知无线电(Cognitive Radio, CR)和超宽带无

线通信(Ultra Wide Band, UWB)作为解决频谱紧张的两大技术成为无线通信领域新的研究热点<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期:2013-07-02

基金项目:陕西省电子信息综合集成重点实验室基金资助项目(201107Y16)

作者简介:赵延明(1981—),男,山东蓬莱人,硕士生,主要从事信息系统建模与仿真研究。E-mail:yanming0912@hotmail.com

**引用格式:**赵延明,陈长兴,牛德智,等.基于小波和优化组合认知超宽带波形设计方法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(1):77-81. ZHAO Yanming CHEN Changxing NIU Dezhi, et al. A waveform design method of cognitive ultra wide band communications based on optimized combination wavelet[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(1): 77-81.

将CR技术与UWB技术相结合<sup>[2-3]</sup>,形成认知超宽带无线通信系统(Cognitive Ultra Wide Band, CUWB),可利用认知无线电对频谱的认知特性,为超宽带系统提供频谱介入和波形设计的双重灵活性。

在UWB系统中,脉冲波形的功率谱密度必须满足美国联邦通讯委员会(FCC)辐射掩蔽的限制。高斯类组合脉冲能较好地满足辐射掩蔽要求,但是计算量较大,所需求阶数高<sup>[4]</sup>;Rayleigh脉冲不易与窄带系统共存<sup>[5]</sup>;Hermite不同阶脉冲虽然互相正交,可使误码率降低,但其各阶波形频谱相差大,需借助载波搬移频谱满足FCC要求<sup>[6]</sup>。文献[7]提出基于小波的超宽带脉冲波形设计,但是单一波形并没有充分利用频谱资源。文献[8]提出了CUWB中的自适应脉冲设计方法,但需要较繁琐的数学运算。基于扁长椭球波函数(Prolate Spheroidal Wave Functions, PSWF)的波形设计方法可以较好地实现认知波形的设计,但是其时域的解析形式不易获得,波形的性能受离散采样的长短影响较大<sup>[9]</sup>。所以,设计简单易实现的UWB脉冲波形,且融入认知频谱的思想,将会对CUWB技术的发展起到很大的促进作用。

## 1 2种脉冲的时频特性分析

### 1.1 高斯类脉冲

现有超宽带脉冲波形大多以高斯脉冲及其导数阶脉冲或者类似高斯脉冲的形式为基础,此处将高斯类的脉冲信号时频特性予以分析,同时也为说明本文选取Morlet小波的原因予以论证对照。

基本的高斯脉冲<sup>[4]</sup>波形定义为:

$$p(t) = A_p \exp\left(-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}\right) \quad (1)$$

式中: $A_p = \pm\sqrt{2/\alpha}$ ;  $p(t)$ 为能量脉冲; $\alpha$ 为脉冲波形的成形因子。则其 $k$ 阶导数脉冲可以描述为:

$$p^{(k)}(t) = A_p \frac{d^k}{dt^k} \exp\left(-\frac{2\pi t^2}{\alpha^2}\right) \quad (2)$$

可以求得 $k$ 阶高斯脉冲导函数的频谱为:

$$p^{(k)}(t) \leftrightarrow A_p \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{\alpha^2 \omega^2}{8\pi}\right) (j\omega)^k \quad (3)$$

其幅度谱为  $F(\omega) = |F[p^{(k)}(t)]| = A_p \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \exp(-\alpha^2 \omega^2 / 8\pi) \omega^k$ , 当  $F'(\omega) = 0$  时, 可求得幅度谱对应的峰值频率为:

$$f_0 = \omega / 2\pi = \sqrt{k} / \alpha \sqrt{\pi} \quad (4)$$

上式表明,峰值频谱由 $\alpha$ 和 $k$ 共同决定,在组合脉冲确定的过程中,还要考虑权值的选取问题,这将

是一个具有复杂过程的优化设计问题。

图1显示了不同脉冲成形因子下(数量级为ns)的时域波形与功率谱密度图,可以看出,单一的高斯脉冲无法满足FCC的频率掩模要求,必须借助于其导数阶脉冲的不同形式来完成。

图2给出了2种成形因子下,高斯不同阶导数(1~15)脉冲的功率谱图,其在说明式(4)结论的同时,也显示了对于具有优良特性的高斯组合脉冲而言,需从 $\alpha$ 、 $k$ 和权值等因素综合考虑。

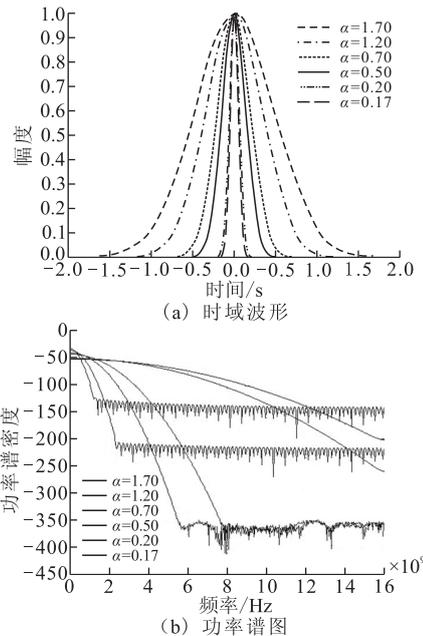


图1 高斯脉冲在不同成形因子下的波形

Fig.1 Waveform of Gaussian pulse in different pulse factor

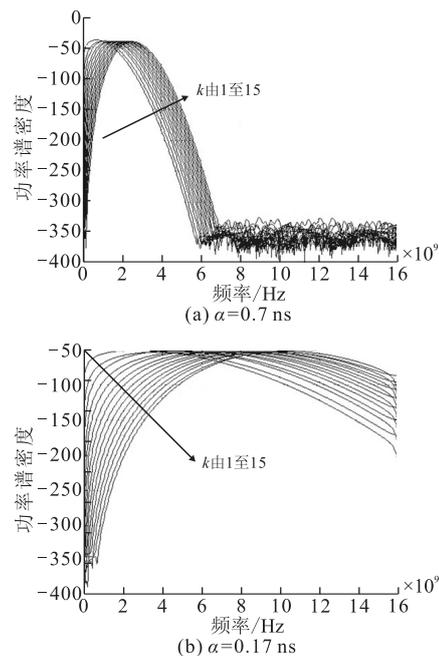


图2 高斯导数阶脉冲功率谱图

Fig.2 PSD of derivative of Gaussian pulse

### 1.2 小波脉冲波形

若函数  $\varphi(t) \in L^2(R)$ , 满足条件  $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 0$ , 那么就称  $\varphi(t)$  为小波母函数, 其生成的函数  $\phi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  统称为小波<sup>[7]</sup>, 其中  $b$  是平移因子,  $a$  是伸缩因子。

Morlet 母小波定义为:

$$\varphi(t) = C \exp(-t^2/2) \cos(2\pi f_0 t) \quad (5)$$

则其生成的小波为:

$$\phi_{a,b}(t) = \frac{C}{\sqrt{a}} \exp\left[-\frac{(t-b)^2}{2a^2}\right] \cos\left(2\pi f_0 \frac{t-b}{a}\right) \quad (6)$$

这里, 考虑 Morlet 小波的一种简单形式, 我们考虑  $b=0$  时, 当  $a$  变化时的功率谱密度图与 FCC 频率掩模的关系。

图 3 为  $a$  在区间  $[2, 4]$  上以步长 0.5 取值时, Morlet 小波的时域波形和功率谱密度图, 区间长度数量级为  $10^{-11}$  s。从图 3(b) 可以看出, 存在  $a$  的某一区间, 当  $a$  在该区间内取值时, 对应小波的功率谱图总能满足 FCC 频率掩模要求, 但是单一小波的频谱利用率不高。基于此, 当  $a$  在特定区间取值时, 对具有不同伸缩因子的小波进行优化组合, 可以进一步提高频谱利用率, 而且脉冲不用求导运算, 相比于高斯类脉冲在脉冲成形因子和求导阶数上要综合选取, 该思想在一定程度上降低了优化脉冲的计算复杂度, 也简化了设计脉冲时所需的系统结构。

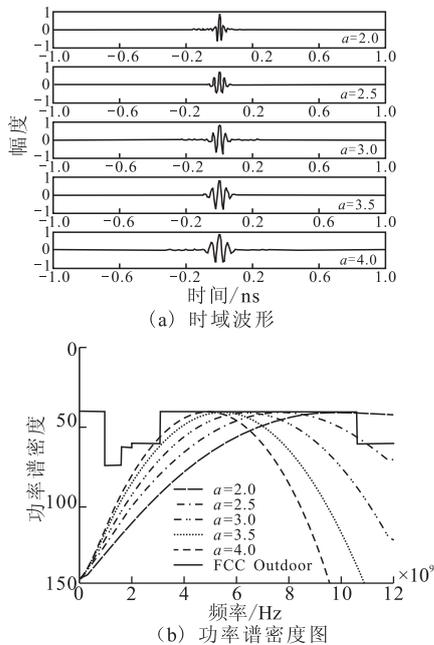


图 3 在一组尺度因子下的 Morlet 小波

Fig.3 Wavelet of Morlet in group of scale factors

### 1.3 FCC 频率掩模规定

2002 年 2 月, FCC 规定准许 UWB 技术进入民

用领域, 但对脉冲信号辐射功率做了严格的限制。图 3(b) 中的实线就是 FCC 关于室外 UWB 应用的辐射限制, 单位为 dBm/MHz, 此外, 对于室内辐射限制也做了具体规定<sup>[2]</sup>。

## 2 优化组合波形设计方法

在 UWB 脉冲波形设计的基础上, CUWB 的波形设计应该考虑认知无线电频谱感知<sup>[10]</sup>的结果, 并在这些频段上予以避让。这样, 本文提出的优化组合 CUWB 脉冲设计的算法步骤如下:

**步骤 1** 符合 FCC 频率掩模要求的小波伸缩因子的选取。即令  $a_i \in [a_{\min}, a_{\max}]$ , 且  $a_i = a_{\min} + (i-1)\Delta$ , 同时满足  $a_i \leq a_{\max}$ , 其中  $i=1, 2, \dots, N$  为选取的不同伸缩因子小波的个数,  $\Delta$  可以按照等步长或者变步长进行取值, 其选取可以在小波个数和高频谱利用率之间综合衡量。由 1.2 中内容可知,  $\Delta$  越大, 小波个数越少, 这会牺牲掉一部分频谱利用率;  $\Delta$  越小, 小波个数越多, 频谱利用率提高却带来结构的复杂。这里指出, 对于  $a_{\min}$  和  $a_{\max}$  的确定, 可以通过从一个较大区间开始, 依次用“二分法”获得。

**步骤 2** 不同伸缩因子  $a_i$  下的小波脉冲进行加权组合, 寻找最优权值  $w$ , 进而获得组合的超宽带频段脉冲波形, 其中  $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 。本步骤的实现过程可以描述如下:

1) 选取具有 **步骤 1** 中具有伸缩因子  $a_i$  的小波  $\phi_{a_i}(t) (i=1, 2, \dots, N)$  作为一组基函数, 平移因子  $b$  可取为相同值。

2) 设置终止迭代次数为  $n_t$ , 初始迭代次数为  $n=1$ 。取一组初始权值  $w^{(0)}$  (如取  $w_i^{(0)} = 1/N, i=1, 2, \dots, N$ ), 计算组合脉冲  $\phi_0(t) = \sum_{i=1}^N w_i^{(0)} \phi_{a_i}(t)$  的功率谱密度函数  $\Phi_0(f)$ , 并据此计算它与 FCC 频率掩模之间的  $M(f)$  之间的初始积分差值  $D_0$ , 计算公式由式(7)<sup>[4]</sup> 给出:

$$D_0 = \int_{3.1}^{10.6} (\Phi_0(f) - M(f))^2 df \quad (7)$$

3) 随机生成一组权值  $w^{(n)} \sim U(0, 1)$ , 此处  $U(0, 1)$  表示大小和  $w^{(n)}$  相同且服从 0-1 均匀分布的一个向量, 计算  $\phi_n(t) = \sum_{i=1}^N w_i^{(n)} \phi_{a_i}(t)$  的功率谱  $\Phi_n(f)$ , 按式(8) 计算积分差值:

$$D_n = \int_{3.1}^{10.6} (\Phi_n(f) - M(f))^2 df \quad (8)$$

若  $D_n \leq D_0$ , 则令  $D_0 = D_n, w^{(0)} = w^{(n)}$ , 执行 4); 若  $D_n > D_0$ , 则直接执行 4)。

4) 若  $n = n_t$ , 执行 5); 否则令  $n = n + 1$ , 转而继

续执行 3)。

5) 寻找最优权值结束。最终的最优权值为  $w = w^{(0)}$ , 优化组合脉冲波形为:

$$\phi(t) = \sum_{i=1}^N w_i \phi_{a_i}(t) \tag{9}$$

**步骤 3** 具有频谱感知频段的带阻滤波器的设计。记频谱感知获得的授权用户频段为  $[f_{u1}, f_{l2}]$ , 则在超宽带基础上基于该频段的带阻滤波器可以等效为, 具有带通频段分别为  $[f_{l1}, f_{u1}]$  和  $[f_{l2}, f_{u2}]$  的带通滤波器之和(其中  $f_{l1} = 3.1 \text{ GHz}$ ,  $f_{u2} = 10.6 \text{ GHz}$ ), 这样由信号时频转换的性质, 可以得到规避授权频段的带阻滤波器的冲激响应为:

$$h(t) = 2f_{u2} \text{sinc}(2f_{u2}t) - 2f_{l2} \text{sinc}(2f_{l2}t) + 2f_{u1} \text{sinc}(2f_{u1}t) - 2f_{l1} \text{sinc}(2f_{l1}t) = \sum_{j=1}^2 (2f_{u_j} \text{sinc}(2f_{u_j}t) - 2f_{l_j} \text{sinc}(2f_{l_j}t)) \tag{10}$$

类似地, 当存在  $J$  个授权用户频段时, 对应的带阻滤波器的冲激相应为:

$$h(t) = \sum_{j=1}^{J+1} (2f_{u_j} \text{sinc}(2f_{u_j}t) - 2f_{l_j} \text{sinc}(2f_{l_j}t)) \tag{11}$$

这时,  $f_{l1} = 3.1 \text{ GHz}$ ,  $f_{u_{J+1}} = 10.6 \text{ GHz}$ 。

**步骤 4** 由带阻滤波器对应的冲激函数, 与步骤 2 中的组合波形进行卷积运算, 得到 CUWB 优化波形。若满足要求的最优脉冲波形为  $x(t)$ , 则有:

$$x(t) = \phi(t) * h(t) \tag{12}$$

至此, 得到了文中设计的 CUWB 脉冲波形。

**步骤 5** 可在本算法基础上, 通过融入组合其他类型脉冲(如高斯类脉冲)的方式, 使所设计的脉冲波形具有全频段特性。在后续的仿真实验中, 主要完成前 4 个步骤的方法内容, 本步骤的算法思想可作为后续的研究内容进一步深化。

**步骤 6** 算法结束。

### 3 仿真实验

首先, 对实验中用到的 Morlet 小波参数取值予以说明, 取  $C=1, b=0, f_0 = 5/(2\pi)$ , 经过“二分”搜索获得的  $a_i$  的选值区间为  $[2.6, 3.6]$ , 数量级为  $10^{-11} \text{ s}$ 。此处选取  $\Delta$  的步进量为 0.2, 则得到 6 个不同伸缩因子的小波函数作为基函数。

设初始权值为  $1/6$ , 根据式(7)计算初始积分差值, 设置迭代次数  $n_t = 100$ 。当迭代结束时, 得到最优权值为  $w = [0.2609, 0.0217, 0.0217, 0.0217, 0.0217, 0.6522]$ , 按照式(9)可得高频谱利用率的一组优化组合 UWB 脉冲波形。

图 4 为小波经加权优化组合后的 UWB 脉冲波形, 从中可以看出, Morlet 小波脉冲或其组合脉冲都具有良好的时域窄脉冲特性。

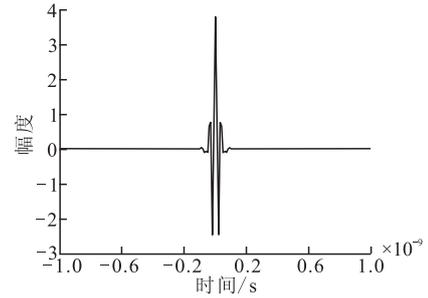


图 4 优化组合后的 UWB 脉冲波形  
Fig.4 UWB pulse waveform after optimized combination

图 5 为不同  $a_i$  因子下以及组合后波形的功率谱密度图, 说明单因子下的波形频谱利用率低, 优化组合波形提高了频谱利用率。

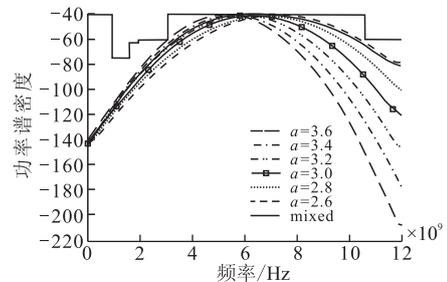


图 5  $a_i$  不同时及优化组合后的小波脉冲功率谱图  
Fig.5 PSD of wavelet with different  $a_i$  and wavelet after optimized combination

仿真实验中, 考虑频谱感知检测到的频段为 WLAN 频段(5.15~5.825 GHz), 则根据式(10)所得的能够规避授权频段的带阻滤波器为图 6。

由图 6 可以看出, 在 WLAN 频段, 陷波深度达 30 dB, 超宽带用户可以有效降低对授权用户的通信干扰。图 7 给出了 UWB 组合脉冲通过带阻滤波器后的功率谱密度图, 既有效规避了授权用户频段, 且具有较高的频谱利用效率。

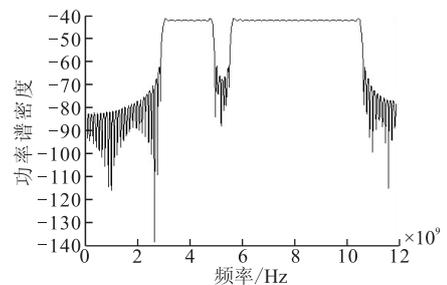


图 6 阻带为 WLAN 频段的带阻滤波器  
Fig.6 Spectrum of band-stop filter with the stop band in WLAN frequency range

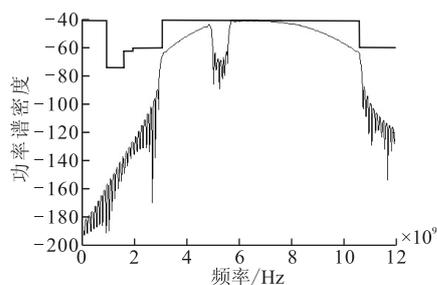


图 7 设计的 CUWB 波形的功率谱密度图

Fig.7 PSD of the designed CUWB pulse waveform

图 8 和图 9 分别为 UWB 组合脉冲波形与带阻滤波器时域卷积后的新波形(即本文算法获得的 CUWB 波形)和 CUWB 波形的自相关函数。波形图像说明本文设计的 CUWB 脉冲波形保持了 UWB 波形的窄时域特性,且自相关特性明显,为保证信号有效接收提供了有力支撑。

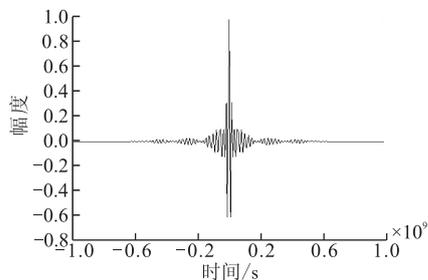


图 8 UWB 波形经滤波器卷积后的新波形

Fig.8 New waveform (CUWB waveform) when UWB pulse passed the filter

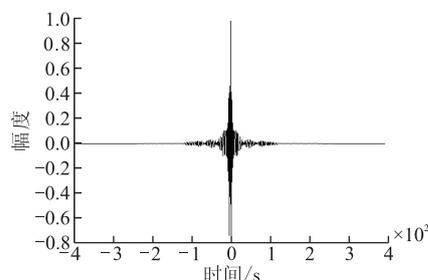


图 9 CUWB 波形的自相关函数

Fig.9 Autocorrelation function of CUWB waveform

## 4 结语

本文提出了一种基于小波的优化组合 CUWB 脉冲设计方法,相比于以往的脉冲波形设计方法,该方法具有操作的方便性和实现的简易性,方法流程设计清晰,计算机可执行能力强,可应用在时效性要求高的 CUWB 通信场合。

## 参考文献(References):

[1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE personal communica-

tions, 1999, 6(4): 13-18.

- [2] MOY C, BISIAUX A, PAQUELET S. An ultra-wide band umbilical cord for cognitive radio systems[C]//Proceedings of IEEE international symposium on personal, indoor and mobile radio communications, Berlin, Germany: IEEE press, 2005: 775-779.
- [3] Zhao Hua, Yin Kuixi, Shao Jianhua. Narrowband interference suppression in TR-UWB system based on cognitive radio theory[J]. Journal of southeast university: english edition, 2012, 28(3): 272-275.
- [4] 贾占彪, 陈红, 蔡晓霞, 等. 正弦高斯组合的 UWB 脉冲波形设计[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(2): 195-198. JIA Zhanbiao, CHEN Hong, CAI Xiaoxia, et al. Waveform design for UWB based on combination of sinusoid gaussian pulse[J]. Fire control & command control, 2012, 37(2): 195-198. (in Chinese)
- [5] Zhang Honggang, Zhou Xiaofei, Kamyay Yekeh Yazdandoost, et al. Multiple signal waveforms adaptation in cognitive ultra-wideband radio evolution[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2006, 24(4): 878-884.
- [6] 赵君喜, 陈桂琴. 超宽带无线通信正交脉冲波形的正交化设计[J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 39-42. ZHAO Junxi, CHEN Guiqin. Orthogonalization design of orthogonal pulse waveforms for UWB communications[J]. Journal of Nanjing university of posts and telecommunications: natural science edition, 2006, 26(2): 39-42. (in Chinese)
- [7] 梁朝晖, 周正. 基于小波的超宽带脉冲波形设计[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(3): 43-45. LIANG Zhaohui, ZHOU Zheng. Wavelet-based pulse design for ultra-wideband system[J]. Journal of Beijing university of posts and telecommunications, 2005, 28(3): 43-45. (in Chinese)
- [8] 郭黎利, 赵冰, 姜晓斐. CUWB 系统的正交自适应脉冲设计及性能分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 46-51. GUO Lili, ZHAO Bing, JIANG Xiaofei. Orthogonal adaptive pulse design and performance analysis of CUWB system[J]. Journal of south China university of technology: natural science edition, 2011, 39(2): 46-51. (in Chinese)
- [9] 马英杰, 周正, 何文才, 等. 认知 UWB 正交脉冲序列设计及性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(5): 583-588. MA Yingjie, ZHOU Zheng, HE Wencai, et al. Cognitive UWB orthogonal pulses design and its performance analysis[J]. Journal of Beijing institute of technology, 2011, 31(5): 583-588. (in Chinese)
- [10] Quan Zhi, Cui Shuguang, Sayed Ali H. Optimal linear cooperation for spectrum sensing in cognitive radio networks[J]. IEEE journal of selected topics in signal processing, 2011, 2(1): 28-40.

(编辑: 徐楠楠)