

# 基于 Polycycle 信号的干扰抑制 UWB 自适应脉冲设计

马英杰<sup>1</sup>, 李 驰<sup>2</sup>, 李 杨<sup>1</sup>

(1. 北京电子科技学院 通信工程系, 北京 100070; 2. 北京市信息科学研究所, 北京 100078)

**摘要:** 针对认知超宽带与现存窄带系统干扰问题, 采用 Polycycle 信号作为超宽带原始脉冲, 使用 Hermite 矩阵特征向量方法设计了认知超宽带自适应脉冲, 实现了干扰抑制. 仿真结果表明, 提出的自适应脉冲功率谱密度分布符合 FCC 室内和室外频谱规范, 实现了自适应频段陷波. 基于 PAM-TH UWB 系统性能分析表明自适应脉冲具有较强的多用户干扰和窄带干扰抑制能力.

**关键词:** 超宽带; Polycycle 信号; Hermite 矩阵; 陷波; 干扰抑制

**中图分类号:** TN929. 5      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2011) 09-2162-04

## UWB Adaptive Pulse Design Based on Polycycle Signal for Interference Suppression

MA Ying-jie<sup>1</sup>, LI Chi<sup>2</sup>, LI Yang<sup>1</sup>

(1. Dept. of Communication Engineering, Beijing Electronic Science and Technology Institute, Beijing 100070, China;

2. Beijing Academy of Information Science, Beijing 100078, China)

**Abstract:** The cognitive ultra-wideband (UWB) adaptive pulses design method is presented based on Hermite matrix eigenvectors and polycycle signal to make the UWB system coexist with the existing narrow band systems. Simulation results show that the power spectral density (PSD) of the proposed adaptive UWB pulses meets with Federal Communications Commission (FCC) indoor and outdoor spectral mask and produces adaptive spectral notches. Finally, according to analysis and simulation of multi-user interference (MUI) suppression and narrow band interference (NBI) suppression for pulse amplitude modulation-time hopping (PAM-TH) UWB systems, the proposed adaptive UWB pulses have anti-interference ability.

**Key words:** ultra-wideband; polycycle pulse; Hermite matrix; spectral notch; interference suppression

## 1 引言

美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 定义的超宽带 (Ultra-Wideband, UWB) 信号功率谱密度工作在极低的水平, 但是其能量分布在很宽的频谱上, 几乎覆盖了所有无线通信系统的工作频段, 所以不可避免地与现存窄带无线系统, 如全球定位系统、无线局域网、蓝牙等产生相互干扰. UWB 与其它现存窄带系统的共存问题是其走向应用的一个关键问题. 目前, 针对这个问题的解决方案一般是对 UWB 系统本身进行优化设计, 没有和外界环境交互, 缺少对周围射频频环境的了解, 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.

认知无线电 (Cognitive Radio, CR)<sup>[1]</sup> 的核心思想是 CR 具有学习能力, 能与周围环境交互信息, 以感知和利用该空间的可用频谱, 并限制和降低冲突的发生. 本文基于认知无线电的思想, 采用 Polycycle 信号作为 UWB 原始脉冲, 使用 Hermite 矩阵特征向量方法设计了认知超宽带自适应脉冲, 产生的自适应脉冲具有灵活的认知

避免能力. 收端通过能量检测的频谱感知方法来自适应地构建 UWB 系统的频谱掩模, 发端生成相应的频谱灵活的自适应脉冲, 使得自适应脉冲的 PSD 不仅满足 FCC 关于室内和室外频谱规范, 而且能够在任意频段陷波, 进而无缝地修正发射波形以适应无线环境.

## 2 Hermite 矩阵特征向量分解方法

设 UWB 成形脉冲信号为  $\psi(t)$ , 其脉冲宽度为  $T_m$ . 在 UWB 的 3.1 ~ 10.6GHz 工作频段上, FCC 频谱模板等效为一个理想带通滤波器, 当  $\psi(t)$  通过理想带通滤波器后, 输出信号为

$$\lambda\psi(t) = \psi(t) * h(t) = \int_{-T_m/2}^{T_m/2} \psi(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (1)$$

设脉冲采样点数为  $M$ , 式(1)对应的离散时域卷积表达式为

$$\lambda\psi[n] = \sum_{m=-M/2}^{M/2} \psi[m] h[n - m], n = -M/2, \dots, M/2 \quad (2)$$

其中, 向量  $\psi$  表示离散化的 UWB 脉冲.

式(2)展开表示成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} h[0] & h[-1] & \cdots & h[-M] \\ h[1] & h[0] & \cdots & h[-M+1] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h[\frac{M}{2}] & h[\frac{M}{2}-1] & \cdots & h[-\frac{M}{2}] \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h[M] & h[M-1] & \cdots & h[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi[-\frac{M}{2}] \\ \psi[-\frac{M}{2}+1] \\ \vdots \\ \psi[0] \\ \vdots \\ \psi[\frac{M}{2}] \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \psi[-\frac{M}{2}] \\ \psi[-\frac{M}{2}+1] \\ \vdots \\ \psi[0] \\ \vdots \\ \psi[\frac{M}{2}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

矩阵  $\mathbf{H}$  为 Hermite 矩阵<sup>[2]</sup>.

Polycycle 信号<sup>[3]</sup>具有良好的匹配 FCC 规范性能,脉冲功率谱密度存在多个频谱凹陷,能够抑制多窄带干

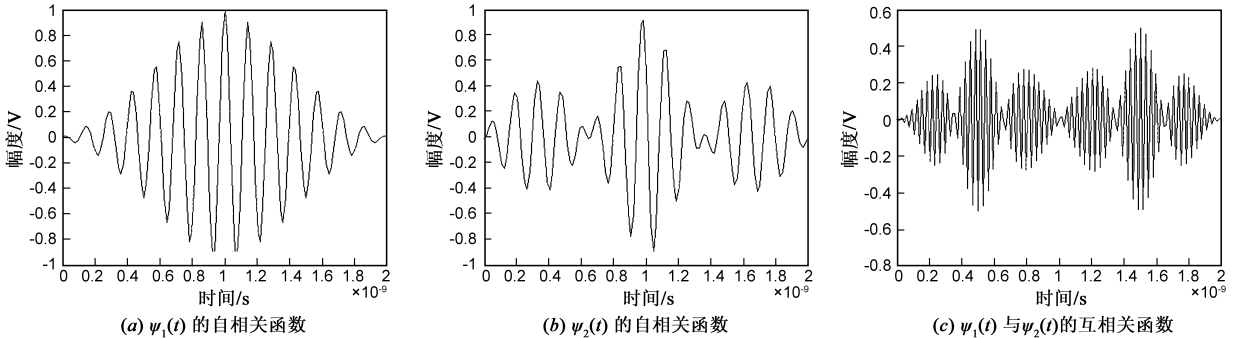


图1 正交成形脉冲相关函数

### 3 干扰抑制 UWB 自适应脉冲设计

为了抑制 UWB 系统与现存窄带系统的干扰,冲激响应  $h(t)$  表示为

$$h(t) = 2 \sum_{i=1}^K [f_{hi} \text{sinc}(2\pi f_{hi}t) - f_{li} \text{sinc}(2\pi f_{li}t)] \quad (5)$$

其中,  $K$  表示与 UWB 系统共存的窄带干扰系统的个数;  $f_{li}, f_{hi}$  表示第  $i$  个窄带干扰系统的起始频率和截止频率.

将 UWB 原始脉冲,即式(4)代入式(5),得到拟合的  $h(t)$ ,利用拟合的  $h(t)$  构造式(3)中的 Hermite 矩阵  $\mathbf{H}$ ,计算相应的特征向量得到抑制窄带干扰的 UWB 自适应脉冲.

本文基于认知无线电感知周围频谱环境的特性,根据频谱感知的信息,动态地改变自适应脉冲的中心

扰,本文采用 Polycycle 信号作为 UWB 原始脉冲.

本文选取矩形窗对正弦波进行截短以得到 Polycycle 信号,该信号由  $N$  个正弦周期组成,其时域表达式是

$$x(t) = \begin{cases} \sin(\omega_r t), & 0 < t < NT \\ 0, & \text{其他} \end{cases} = \sin(\omega_r t) [u(t) - u(t - NT)] \quad (4)$$

其中,  $\omega_r = \frac{2\pi}{T}$ ,  $T$  是正弦波的周期,  $u(t)$  是阶跃信号.

利用式(4)产生的 Polycycle 信号作为 UWB 原始脉冲,构造式(3)中的 Hermite 矩阵  $\mathbf{H}$ ,计算相应的特征向量得到 UWB 信号的正交成形脉冲序列.成形脉冲序列  $\boldsymbol{\psi}$  与衰减因子  $\lambda$  由  $\mathbf{H}$  的特征向量与特征值矩阵获得.由于  $\mathbf{H}$  为 Hermite 矩阵,因此所求得的成形脉冲序列相互正交.

设脉冲采样点数  $M = 64$ ,脉冲持续时间  $T_m = 1$  ns,其中两个特征值对应的两个正交成形脉冲  $\psi_1(t)$ 、 $\psi_2(t)$  的相关特性如图 1 所示.图 1 (a)、(b)、(c) 分别为  $\psi_1(t)$  的自相关函数、 $\psi_2(t)$  的自相关函数和  $\psi_1(t)$  与  $\psi_2(t)$  的互相关函数.可以看出,UWB 正交成形脉冲序列的自相关性很强,互相关性很弱,这对于消除多用户干扰,提高多用户检测十分有利.

频率、带宽和频谱凹陷的位置.接收端采用能量检测<sup>[4]</sup>的频谱感知方法,对 UWB 系统周围环境进行周期性重复采样,如果判定窄带干扰系统正在工作,则动态地调整基函数的参数,感知到的  $K$  个窄带干扰系统的起始频率  $f_{li}$  和截止频率  $f_{hi}$ ,重构 UWB 脉冲的 PSD,使得自适应脉冲的 PSD 能够在窄带干扰位置产生频谱凹陷,发送端发送自适应脉冲信号作为发射信号,从而抑制窄带干扰;如果判定窄带系统处于非活动状态,则发送端发送原始脉冲作为发射信号.

通过能量检测,判定 UWB 系统中存在微波通信 C 波段的窄带干扰系统,其工作频段在 6.5 ~ 7.2GHz 以及 5GHz 的 WLAN 窄带干扰系统,其工作频段在 5.15 ~ 5.825GHz.根据感知到的信息,设置相应参数,自适应 UWB 脉冲  $\psi_1(t)$ 、 $\psi_2(t)$  的功率谱密度分布如图 2 所示.

图2(a)、(b)分别为单窄带干扰和多窄带干扰情况下,自适应UWB脉冲 $\psi_1(t)$ 、 $\psi_2(t)$ 的功率谱密度.可以看出,自适应UWB脉冲的PSD不仅满足FCC室内和室外频谱规范,而且在单窄带干扰微波通信C波段产生了

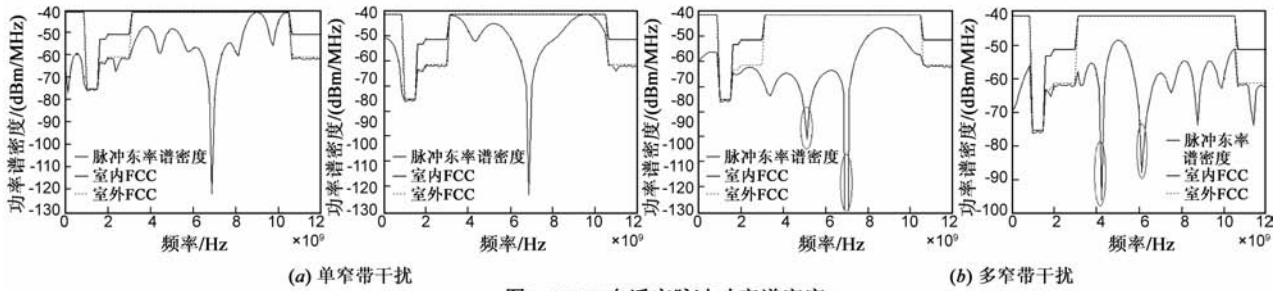


图2 UWB自适应脉冲功率谱密度

## 4 干扰抑制性能分析与仿真

### 4.1 PAM-TH UWB 模型

PAM-TH UWB<sup>[5]</sup>系统的第 $n$ 个UWB用户发射端信号为

$$s_{TX}^{(n)}(t) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} a_j \sqrt{E_{TX}^{(n)}} w(t - jT_s - c_j^{(n)}T_c) \quad (6)$$

其中, $w(t)$ 是能量归一化的脉冲波形; $a_j$ 是一个用+1,-1组成的信息源序列; $E_{TX}^{(n)}$ 是每一个脉冲的传输能量;脉冲重复间隔为 $T_s$ ;  $c_j^{(n)}$ 是第 $n$ 个用户使用的TH序列的第 $j$ 个系数; $T_c$ 是切普宽度.

经过AWGN信道,UWB接收机端信号为

$$r(t) = r_u(t) + r_{mui}(t) + \sum_{i=1}^N I_{\{j_{mi}^{(i)}\}}(t) + n(t) \quad (7)$$

其中, $I_{\{j_{mi}^{(i)}\}}(t)$ 表示第 $i$ 个窄带干扰系统; $n(t)$ 为均值为零,功率谱密度为 $N_0/2$ 的加性高斯白噪声.

Rake接收机<sup>[6]</sup>采用基于ML准则的判决规则,输出信号为

$$Z = Z_u + Z_{mui} + Z_{NBI} + Z_n \quad (8)$$

其中, $Z_u, Z_{mui}, Z_{NBI}, Z_n$ 分别表示接收机输出的有用信号、MUI噪声、NBI噪声和接收机热噪声.

接收机输出的有用信号能量为

$$E_b = (Z_u)^2 = E_{TX}^{(1)} (\alpha^{(n)})^2 N_s^2 \quad (9)$$

接收机输出热噪声的方差 $\sigma_n^2$ 为

$$\sigma_n^2 = N_s \frac{N_0}{2} \quad (10)$$

对于一个比特脉冲遭受的总的MUI干扰能量为

$$\sigma_{mui}^2 = \frac{N_s}{T_s} \left( \int_0^{T_s} \left( \int_0^{T_m} w(t-\tau)w(t)dt \right)^2 d\tau \right) \sum_{n=2}^N E_{TX}^{(n)} (\alpha^{(n)})^2 \quad (11)$$

则最终的信干比为

$$SIR = E_b / (\sigma_n^2 + \sigma_{mui}^2 + \sum_{i=1}^N P_{NBI}^i) \quad (12)$$

接近-60dB的频谱凹陷,在多窄带干扰,包括微波通信C波段和5GHz的WLAN波段产生了接近-40dB的频谱凹陷,可以实现任意频段陷波,具有良好的窄带干扰抑制性能.

### 4.2 仿真结果

分别对PPM-TH和PAM-TH UWB通信系统进行Monte-Carlo计算机仿真,仿真条件设置如下:信噪比 $E_b/N_0$ 取值范围是0~30dB;多用户干扰MUI数目分别为5用户,30用户和60用户;窄带干扰NBI为OFDM信号,子载波数 $N=64$ ,传输比特数numbits=2048,中心频率 $f_p$ 分别为5.4875GHz和6.85GHz;由PPM调制引入的时移PPMshift=0.5ns;用户的比特速率 $R_b=20$ Mb/s.

自适应UWB脉冲的PPM-TH和PAM-TH UWB通信系统抗MUI和NBI误码率如图3所示.可以看出当存在5个干扰用户的情况下,对于PPM-TH和PAM-TH而言,错误概率总是随着 $E_b/N_0$ 的升高的趋势下降,所以MUI和NBI并没有对系统工作性能产生很大影响,错误概率主要取决于热噪声;当存在30个干扰用户和60个干扰用户的情况下,PPM-TH和PAM-TH的错误概率都渐渐趋向于一个常数,在 $E_b/N_0$ 很高的情况下,系统的工作性能取决于MUI和NBI,所以对于本文提出的自适应UWB脉冲而言,PAM-TH UWB通信系统抗MUI和NBI性能优于PPM-TH系统.

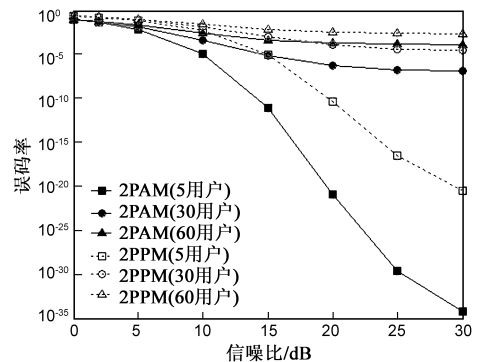


图3 窄带干扰、多用户干扰条件下PAM-TH和PPM-TH的误码率比较

## 5 结论

文中采用Polycycle信号作为UWB原始脉冲,通过

认知能量检测方法,动态地调整自适应 UWB 脉冲的 PSD,使其不仅满足 FCC 室内和室外频谱要求,而且可以实现自适应的多个频段陷波,有效抑制窄带干扰.最后,分析了 PPM-TH 和 PAM-TH UWB 系统的干扰抑制性能,自适应脉冲具有良好的抗 MUI 和 NBI 能力,仿真结果证明了算法的可行性和灵活性,可以直接用于 UWB 信号发射系统.

#### 参考文献

- [1] 马志 ■,曹志刚.认知无线网络用户合作机会接入方案的研究[J].电子学报,2009,37(4):678-683.  
MA Zhi-yao, CAO Zhi-gang. Secondary user cooperative opportunistic access scheme in cognitive radio networks[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 678-683. (in Chinese)
- [2] 张洪欣,贺鹏飞,赵洪涛,等.一种新的 UWB 成形脉冲设计方法[J].滨州学院学报,2006,21(5):57-60.  
ZHAN Hong-xin, HE Peng-fei, ZHAO Hong-tao, et al. A novel method to generate UWB shape impulse[J]. Journal of Binzhou University, 2006, 21(5): 57-60. (in Chinese)
- [3] 沙学军,王利利,吴宣利,等.基于半正定规划的超宽带正交脉冲波形设计[J].哈尔滨工业大学学报,2008,40(7):1048-1051.  
SHA Xuejun, WANG Lili, WU Xuanli, et al. Semi-definite programming based ultra-wideband orthogonal pulse waveform design [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2008, 40(7): 1048-1051. (in Chinese)
- [4] 杨志华,张钦宇,王野.非相干能量检测 UWB 接收机误码率性能优化[J].电子学报,2009,37(5):951-956.  
YANG Zhi-hua, ZHANG Qin-yu, WANG Ye. Optimization of UWB non-coherent receiver[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 951-956. (in Chinese)

- [5] 杨凯,安建平,卜祥元.传输参考超宽带信号功率谱密度分析[J].北京理工大学学报,2007,27(5):441-445.  
Yang Kai, An Jianping, Bu Xiangyuan. Power spectral density analysis of transmitted reference ultra-wide band signals[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(5): 441-445. (in Chinese)
- [6] 傅海阳,戴振华,郑建光,等.多径信号载波相干解调 RAKE 接收机[J].北京邮电大学学报,2010,33(3):30-33.  
FU Hai-yang, DAI Zhen-hua, ZHENG Jian-guang, et al. RAKE receiver with carrier coherent demodulation for multi-path signals[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2010, 33(3): 30-33. (in Chinese)

#### 作者简介



马英杰(通讯作者) 女,1979年6月出生  
于吉林省通化市.现为北京电子科技学院教师.  
主要从事认知超宽带无线通信方向研究.手机:  
13241880235.  
E-mail: dmzm12@163.com



李 驰 男,1979年8月出生  
于河南省驻马店市.现为北京市信息科学研究所工程师.主要  
从事信息技术方向研究.  
E-mail: lichis5673@tom.com