

基于Parks-McClellan算法的超宽带脉冲波形优化设计

肖尚辉¹, 江毅²

(1. 四川宜宾学院物理与电子信息系 四川 宜宾 644007; 2. 北京理工大学光电工程系 北京 海淀区 100081)

【摘要】 基于Parks-McClellan算法讨论并分析了一种超宽带无线脉冲波形的优化设计方法, 利用该方法设计得到的超宽带脉冲波形可以充分利用并且满足FCC的频谱要求。相应的结果既适用于单频带模式超宽带系统, 也适用于多频带模式超宽带系统。

关键词 超宽带技术; 超宽带脉冲波形; Parks-McClellan算法
中图分类号 TN915.142 文献标识码 A

Optimal Design for Ultra-Wideband Pulse Waveform Based on the Parks-McClellan Algorithm

XIAO Shang-hui¹, JIANG Yi²

(1. Department of Physics and Electronic Information, Yibin University Yibin Sichuan 644007;

2. Department of Optical & Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology Haidian Beijing 100081)

Abstract Based on the Parks-McClellan algorithm, this paper introduces a pulse shape design for UWB wave. The wave obtained by this method can optimally utilize the bandwidth by the FCC spectral mask. The result is suitable for both single band or multi-band UWB system.

Key words ultra-wideband technology; ultra-wideband pulse shape; Parks-McClellan algorithm

超宽带(Ultra-Wideband, UWB)技术或称冲激无线电(Impulse Radios, IR)技术是无线通信中的一种非常有发展前景的新技术, 特别适宜于短距离室内无线通信^[1]。它不使用载波电路而是直接通过发送纳秒级脉冲来传输数据, 因而UWB系统不需要复杂的调制/解调电路、滤波器等, 通常是对具有很陡上升和下降时间的冲激脉冲进行直接调制, 从而获得具有吉赫兹量级带宽的信号, 所以UWB脉冲信号又被称为“基带信号”或“无载波信号”^[2]。由于带宽很宽, 频谱通常从直流延伸到吉赫兹量级, UWB脉冲信号具有高分辨率、高数据传输率、低截获率、低功率谱密度、低功耗等优点, 在很多领域中得到广泛应用。

1 UWB脉冲信号的描述

在UWB无线电中典型的调制是二进制脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM), 跳时码可实现多址功能并平滑发射谱^[3]。若用 $p(t)$ 表示单周期脉冲, 则单个UWB发射机的发射波形为:

$$u(t) = \sum_k \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p}} p(t - kT_f - c_k T_c - s(\lfloor k/N_f \rfloor) \Delta) \quad (1)$$

式中 ε 为单个脉冲的发射能量; $\varepsilon_p = \int p^2(t) dt$; T_f 为帧持续时间; T_c 为码片周期, 并且 $T_f = N_c T_c$; $c_k \in [0, N_c - 1]$ 为跳时序列, 并且周期为 N_f ; $s(n)$ 为信息符号; Δ 为调制因子。

如果定义:

$$p_s(t) = \sum_{k=0}^{N_f-1} \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_p}} p(t - kT_f - c_k T_c)$$

则发射信号为:

$$u(t) = \sum_n \sqrt{\varepsilon} p_s(t - nT_s - s(n) \Delta) \quad (2)$$

收稿日期: 2004-09-24

基金项目: 四川省教育厅青年基金资助项目(2003A042)

作者简介: 肖尚辉(1973-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事现代信号处理、UWB无线技术等方面的研究。

式中 $T_s = N_f T_f$ 。

发射信号的功率谱密度为^[4]：

$$\Phi_{uu}(f) = \frac{\mathcal{E}}{T_s} |P_s(f)|^2 \times \left[\frac{1 - \cos(2\pi\Delta f)}{2} + \frac{1 + \cos(2\pi\Delta f)}{2T_s} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \delta(f - \frac{k}{T_s}) \right] \quad (3)$$

式中 $P_s(f)$ 为 $p_s(t)$ 的Fourier变换。若单周期脉冲 $p(t)$ 采用Gaussian波形，则：

$$p(t) = g(t) = 2\sqrt{e}A \frac{t}{\tau_g} \exp(-2(\frac{t}{\tau_g})^2) \quad (4)$$

式中 τ_g 为单周期Gaussian脉冲波形最大值与最小值之间的时间间隔； A 为波形峰值。 $g(t)$ 的Fourier变换为：

$$G(f) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2e}{\pi}} \frac{Af}{f_g^2} \exp(-\frac{1}{2}(\frac{f}{f_g})^2) \quad (5)$$

式中 $f_g := 1/(\pi\tau_g)$ 。

2 UWB脉冲信号优化设计

对于给定区间 $[a, b]$ 上的连续函数 $f(x)$ ，在所有 n 次多项式的集合 φ_n 中，可唯一得到多项式 $\hat{p}(x)$ ，使其在 $[a, b]$ 上对 $f(x)$ 的偏差，与其他一切属于 φ_n 的多项式 $p(x)$ 对 $f(x)$ 的偏差相比是最小的，即：

$$\max_{a \leq x \leq b} |\hat{p}(x) - f(x)| = \min \{ \max_{a \leq x \leq b} |p(x) - f(x)| \} \quad (6)$$

这即是Chebyshev逼近理论，可利用“交错点组”方法构造出该最佳一致逼近多项式 $\hat{p}(x)$ 。文献[5-6]应用Chebyshev逼近理论提出了Parks-McClellan算法。

若设计并构建单周期脉冲为：

$$p(t) = \sum_{n=0}^{M-1} w[n]g(t - nT_0) \quad (7)$$

式中 $w[n]$ 为加权系数，且不同 T_0 取值可影响 $w[n]$ 的选择。采用跳时(Time Hopping, TH)和二进制PPM技术的多频带UWB系统发射机结构的实现方式如图1所示。

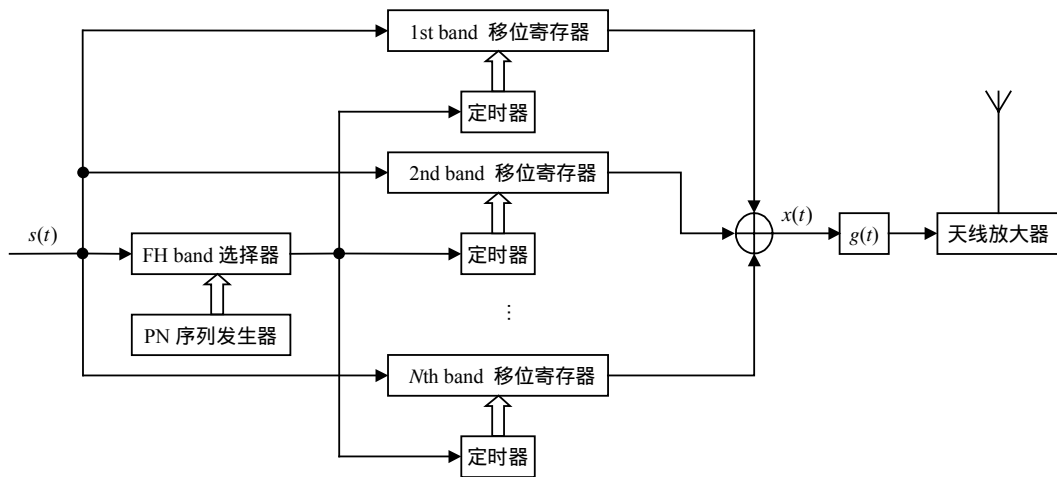


图1 采用TH和PPM的多频带UWB系统发射机结构实现方式

若对式(7)进行Fourier变换，可得：

$$P(f) = W(e^{j2\pi f T_0})G(f) \quad (8)$$

式中

$$W(e^{j2\pi f T_0}) = \sum_{n=0}^{M-1} w[n]e^{-j2\pi f T_0 n}$$

如果 T_0 值已经确定，根据式(7)可知，设计脉冲 $p(t)$ 的问题即是寻找 M 个加权系数 ($w[0], w[1], \dots, w[M-1]$)，使其有：

$$|W(e^{j2\pi f T_0})|: \begin{cases} \approx \frac{P_d(f)}{|G(f)|} & f \in [0, \frac{1}{2T_0}] \\ < \frac{M(f)}{|G(f)|} & f \in [\frac{1}{2T_0}, +\infty] \end{cases} \quad (9)$$

式中 $M(f)$ 为 FCC(Federal Communications Commission) 对室内 UWB 系统的频谱限制; $P_d(f)$ 为接近 $M(f)$ 的期望信号频谱。如果式(6)中的 f_g 给定, 则脉冲波形 $p(t)$ 的设计问题还可简化成类似 FIR 滤波器设计, 即寻找一加权系数为 $(w[0], w[1], \dots, w[M-1])$ 的 M 阶 FIR 滤波器, 使离散时间傅里叶变换(DTFT)幅度 $|W(e^{j2\pi f T_0})|$ 逼近函数 $D(F/T_0)$, $F \in [0, 0.5]$; $D(f) := \frac{P_d(f)}{|G(f)|}$, $f \in [0, \frac{1}{2T_0}]$ 。

为了减小实现的复杂性, 应获取最小 M 值, 对给定 T_0 值得到最小的时间延迟 $T_p = T_g + (M-1)T_0$ 。因此可采用 Parks-McClellan 算法, 若选用线性相位滤波器, 且有对称加权特性, $w[n] = w[2L-n]$, $n = 0, 1, \dots, 2L$, 则可将 M 阶加权系数降为 $L+1$ 阶 $\{w[n]\}_{n=0}^L$ 。若设 $w_L[n] = w[n+L]$, 则有:

$$W_L(e^{j2\pi f T_0}) = \sum_{n=-L}^L w_L[n] e^{-j2\pi f T_0 n} = w_L[0] + \sum_{n=1}^L 2w_L[n] \cos(2\pi f T_0 n)$$

且

$$|W_L(e^{j2\pi f T_0})| = |W(e^{j2\pi f T_0})|$$

在此基础上, UWB 系统脉冲波形可进一步设计为: 选取适当的加权系数 $\{w_L[n]\}_{n=0}^L$, 满足优化准则:

$$\min_{\{w_L[n]\}_{n=0}^L} \{ \max_{F \in \Gamma} \lambda(F) [D(F/T_0) - W_L(e^{j2\pi f T_0})] \}$$

式中 $\lambda(F)$ 为非负的加权函数; Γ 为在区间 $[0, 0.5]$ 上不相交时间间隔的并集。上述设计方法实际上是一个 Chebyshev 逼近问题, 根据 Parks-McClellan 算法, 可由“交错点组理论”对其进行求解。因此, 基于 Parks-McClellan 算法的 UWB 脉冲波形优化设计等效为 FIR 滤波器的优化设计问题。

3 设计结果

利用上述设计方法, 若单周期 Gaussian 脉冲波形的参数 f_g 选取为 6.85 GHz。对于单频带工作模式, 为了充分利用整个频段 $[3.1, 10.6]$ GHz, 必须满足 $\frac{1}{2T_0} > 10.6$ GHz。若设定 $\Gamma_1 = [0, 0.1107]$, $\Gamma_2 = [0.15, 0.33]$, $\Gamma_3 = [0.3786, 0.5]$, $T_0 = 35.7$ ps, 且当 $F \in \Gamma_1$ 时, 取 $\lambda(F) = 2$; 当 $F \in \Gamma_2 \cup \Gamma_3$ 时, 取 $\lambda(F) = 1$, 则可得到如图 2 所示的脉冲波形, $L=16$ 、 $T_0=35.7$ ps。对于多频带工作模式, $F \in \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3$, 若对子频带 1 设定 $\Gamma_1 = [0, 0.1107]$, $\Gamma_2 = [0.1178, 0.1928]$, $\Gamma_3 = [0.2, 0.5]$; 子频带 2 设定 $\Gamma_1 = [0, 0.2]$, $\Gamma_2 = [0.2071, 0.2821]$, $\Gamma_3 = [0.2892, 0.5]$; 子频带 3 设定 $\Gamma_1 = [0, 0.2892]$, $\Gamma_2 = [0.2964, 0.3714]$, $\Gamma_3 = [0.3785, 0.5]$; 且在 Γ_2 中取 $\lambda(F) = 5$, 在 $\Gamma_1 \cup \Gamma_3$ 中取 $\lambda(F) = 1$, 则可得到具有 3 个子频带 UWB 系统的时域脉冲波形和频域特性, 如图 3 所示, $L=100$ 、 $T_0=35.7$ ps。

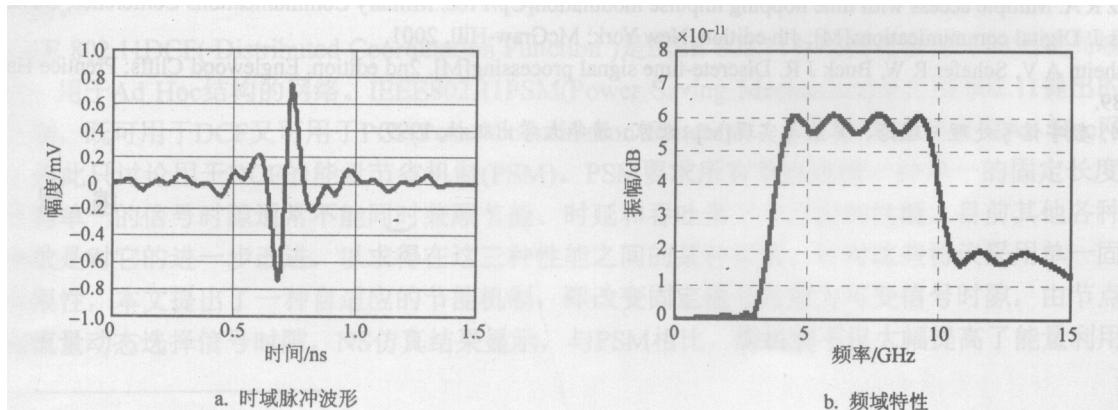


图 2 单频带脉冲波形及其频域特性

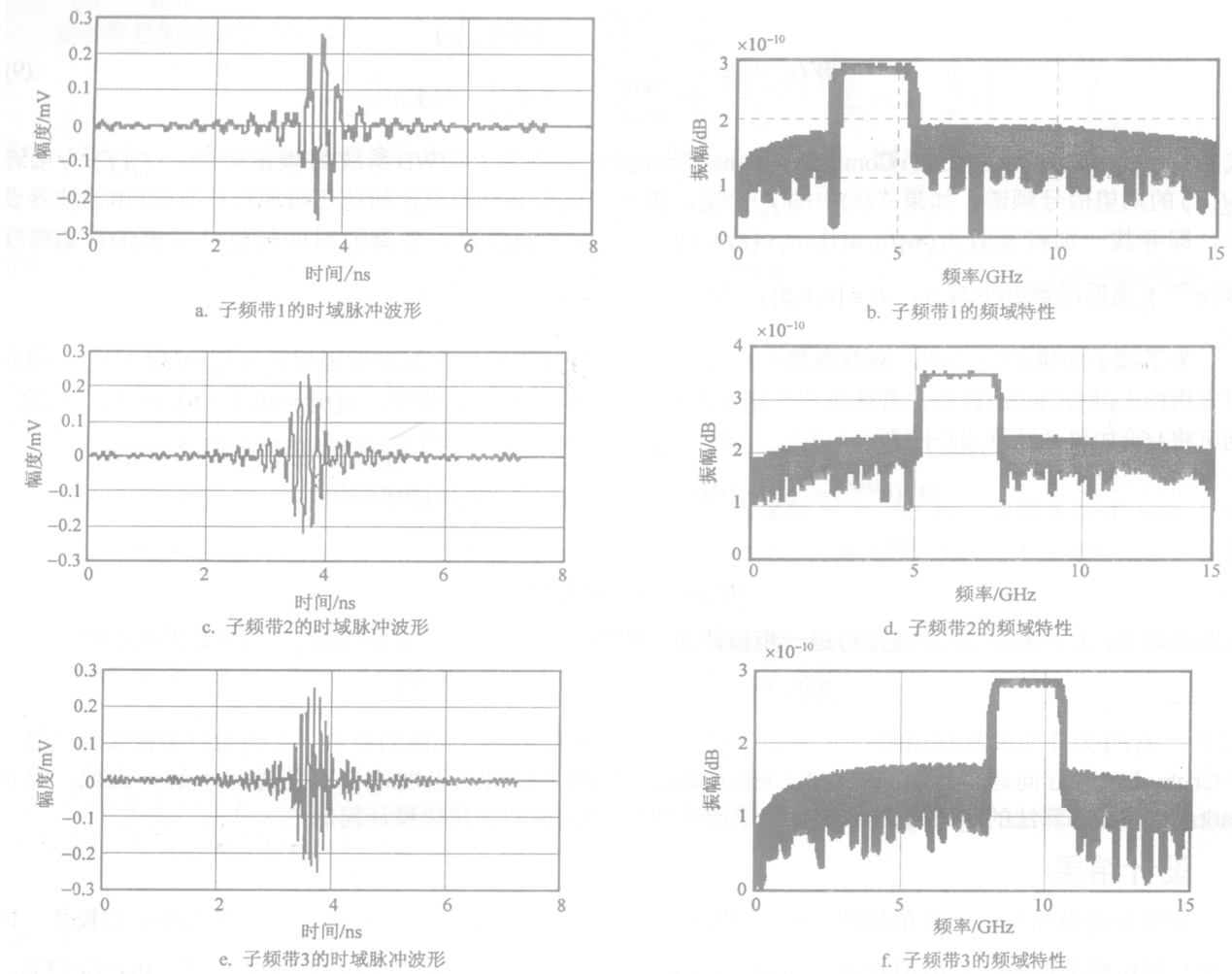


图3 多频带脉冲波形及其频域特性

由此可知,该优化设计方法得到的脉冲波形不仅满足FCC的频谱限制要求,而且能充分优化利用可用的频率带宽资源。

参 考 文 献

- [1] Win M Z, Scholtz R A. Impulse radio: how it works[J]. IEEE Commun. Lett., 1998, 2: 36-38.
- [2] Bennett C L, Ross G F. Time-domain electromagnetics and its applications[J]. Proc. IEEE, 1978, 66: 299-318.
- [3] Scholtz R A. Multiple access with time hopping impulse modulation[C]//Proc. Military Communications Conference, Boston, 1993.
- [4] Proakis J. Digital communications[M]. 4th edition. New York: McGraw-Hill, 2001.
- [5] Oppenheim A V, Schaffer R W, Buck J R. Discrete-time signal processing[M]. 2nd edition. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1999: 388-389.
- [6] 胡广书. 数字信号处理 - 理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

编辑 黄 莘