

一种新的超宽带脉冲信号优化设计方法^{*})

庄陵^{1,2} 仇国庆³ 唐贤伦³ 曹长修¹

(重庆大学自动化学院 重庆 400044)¹ (重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)²
(重庆邮电大学自动化学院 重庆 400065)³

摘要 从数值逼近理论出发按照 Chebyshev 最佳一致逼近准则将超宽带信号设计成符合 FCC 频谱模板的信号,与同类方法相比更容易控制设计精度,具有更高的频谱利用率,改善了 UWB 通信系统的性能,方法适用于不同的频谱模板。在理论分析的基础上对方法进行了阐述和模拟仿真,仿真结果验证了该超宽带脉冲信号设计方法的有效性。

关键词 超宽带,最佳一致逼近,脉冲无线电,功率谱密度

Novel Optimization Design Method for UWB Pulse

ZHUANG Ling^{1,2} QIU Guo-qing³ TANG Xian-lun³ CAO Chang-xiu¹

(College of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, China)¹

(College of Communications and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)²

(College of Automation, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)³

Abstract A novel design method for ultra-wideband pulse was presented based on numerical approximation theory. With Chebyshev best uniform approximation rule, the ultra-wideband signal was conformed to FCC spectral mask, which could reduce the interference with other wireless systems and improve the performance of UWB communication system. Comparing with other methods, it is easy to control design precision, and uses spectrum more sufficiently. It is also applicable to different spectral mask. After theoretical analysis, the method was fully expatiated on. The simulation result shows that this method is effective.

Keywords Ultra-wideband, Best uniform approximation, Pulse radio, Power spectral density

1 引言

随着无线多媒体业务需求的增长,短程高速无线通信已经成为未来通信技术的重要发展趋势之一。市场需要一种技术来解决高速网络接入需求与拥挤的频谱资源分配之间的矛盾,超宽带(ultra-wideband, UWB)通信以其高带宽容量大、成本低、功耗小等特点成为备受关注的重要解决方案。

超宽带系统使用非常宽的频带来收发极窄的无线电脉冲,因此总是有部分频带与现有的无线系统交叠,如何实现频谱资源共享是 UWB 研究必须关注的问题。为了与现有无线系统进行兼容,2002 年美国联邦通信委员会(FCC)颁布了在民用通信中开放超宽带设备频谱的规范,对超宽带系统的功率谱给出了具体的限定^[1]。这一规范得到广泛的认可,被各国引用或作为参考频谱模板,所以设计满足模板要求的超宽带脉冲就变得至关重要。近年来,研究者从频带利用率等各个角度出发进行 UWB 脉冲波形优化设计,给出了一些符合频谱模板要求的脉冲波形^[2]。文献[3,4]中设计出了实用的 UWB 脉冲波形,但没有充分利用频谱模板给出的频带,文献[5]通过加窗的方法得到截短脉冲,但设计精度不易掌握,因此给出的 UWB 脉冲波形还不具备理想的特性。所以 UWB 脉冲波形的优化设计依旧是一个值得研究的重要问题。

文章从频谱模板出发,以数值逼近思想进行超宽带脉冲波形的设计,在阐述加权 Chebyshev 最佳一致逼近准则^[6]的基础上提出了一种新的 UWB 脉冲波形设计方法,并通过实验验证其有效性。

2 FCC 频谱模板

FCC 关于超宽带设备的规范分为室内和室外两个不同规范^[1]。由于 UWB 系统主要工作在室内环境,设计根据室内模板进行研究仿真。具体的限定功率值见表 1。

表 1 FCC 频谱模板

频率/GHz	室内功率/dB
0~0.96	0
0.96~1.61	-34
1.61~1.99	-12
1.99~3.1	-10
3.1~10.6	0
>10.6	-10

为了提高频谱利用率,设计要给出满足模板要求且带内能量尽可能高的脉冲波形。模板中 3.1GHz~10.6GHz 这个较宽范围是 FCC 分配给 UWB 的免授权频段,在发射功率低于-41.3dBm/MHz 的情况下可以完全被使用,因此设计的超宽带脉冲归一化频谱应该充分利用这个矩形区域即:

$$X(f) = \begin{cases} 1 & f \in (3.1\text{GHz}, 10.6\text{GHz}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

同时因为可实现的脉冲频谱边缘不可陡降,有过渡带,且通阻带内有波动,所以参照 FCC 模板,使得待设计的可实现的脉冲波形频谱与模板逼近,即可得到符合模板要求的 UWB 脉冲波形。设采样频率为 30GHz,以下在数字频率域阐述设计方法。

^{*})国家自然科学基金资助项目(项目编号 60506055)。庄陵 博士研究生,讲师,主要研究方向为无线通信网络与信息处理;仇国庆 副教授,主要研究方向为无线传感器网络;唐贤伦 博士,副教授,主要研究方向为计算机网络;曹长修 教授,博士生导师,主要研究方向为网络通信。

3 设计原理

设希望设计的脉冲频谱为 $H_d(e^{j\omega})$, 按照设计思路 $H_d(e^{j\omega})$ 的幅频特性 $H_d(\omega)$ 应该与 FCC 频谱模板一致。如果实际设计的脉冲频谱为 $H(e^{j\omega})$, 其幅频特性为 $H(\omega)$, 用 $E(e^{j\omega})$ 表示 $H_d(e^{j\omega})$ 和 $H(e^{j\omega})$ 之间的频响误差:

$$E(e^{j\omega}) = H_d(e^{j\omega}) - H(e^{j\omega})$$

其均方误差为: $e^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |E(e^{j\omega})|^2 d\omega$. 设计目的是使 e^2 小到满足设计精度。将加权误差 $E(\omega)$ 用下式表示:

$$E(\omega) = W(\omega)[H_d(\omega) - H(\omega)]$$

$W(\omega)$ 是误差加权函数用于控制设计精度, 在设计时事先给出。在逼近精度要求高的频段 $E(\omega)$ 取值较大, 反之较小。

$$\text{假设 } H(\omega) = \sum_{n=0}^{\frac{1}{2}(N-1)} a(n) \cos n\omega$$

$$\text{则 } E(\omega) = W(\omega)[H_d(\omega) - \sum_{n=0}^M a(n) \cos n\omega]$$

式中 $M = (N-1)/2$ 。最佳一致逼近问题是选择 $M+1$ 个系数 $a(n)$, 使加权误差 $E(\omega)$ 的最大值为最小, 即 $\min[\max_{\omega \in A} |E(\omega)|]$, A 表示 UWB 信号所在频带。最佳一致逼近着眼于在 A 上使 $E(\omega)$ 均匀一致。根据 Chebyshev 理论, 采用交错点组定理^[6]能够构造唯一的 M 次多项式 $H(\omega)$ 使 $E(\omega)$ 满足最大值最小, 等同于构造唯一的 M 次多项式 $E(\omega)$ 使 $E(\omega)$ 本身满足最大值最小。

Chebyshev 交错点组定理 设 $f(x)$ 是定义在 $[a, b]$ 上的连续函数, $P_N(x)$ 是 N 次多项式集中的一个阶次不超过 N 的多项式, 令 $E_N = \max_{a \leq x \leq b} |P_N(x) - f(x)|$, $P_N(x)$ 是 $f(x)$ 最佳一致逼近的充要条件是, 在 $[a, b]$ 上 $P_N(x)$ 至少存在 $(N+2)$ 个交错点: $a \leq x_1 < x_2 < \dots < x_{N+2} \leq b$ 使:

$$\begin{cases} E(x_i) = \pm E_N \\ E(x_i) = -E(x_{i+1}) \end{cases} \quad i=1, 2, 3, \dots, N+2$$

根据以上定理, 最佳一致逼近的充要条件是 $E(\omega)$ 在 A 上至少有 $M+2$ 个交错使得

$$\begin{aligned} E(\omega_i) &= -E(\omega_{i+1}) \\ |E(\omega_k)| &= \max_{\omega \in A} |E(\omega)| \end{aligned}$$

$$\omega_0 < \omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_{M+1}, \omega \in A$$

按照这个方法设计的频谱具有等波纹特性, 即设计出来的频谱均匀一致地逼近模板。

4 方法描述及仿真

分析 FCC 频谱模板得知待设计的脉冲频谱具有片断常数特性, 确定片断边缘、波动允许衰减和 M 值后, 如果知道 A 上的交错点频率 $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{M+1}$, 推得式子:

$$\begin{cases} W(\omega_k)[H_d(\omega_k) - \sum_{n=0}^M a(n) \cos n\omega_k] = (-1)^k \rho \\ \rho = \max_{\omega \in A} |E(\omega)|, k=0, 1, 2, \dots, M+1 \end{cases}$$

上式展开是矩阵形式, ρ 是加权误差最大绝对值。变化上式有:

$$\begin{cases} \rho = \frac{\sum_{k=0}^{M+1} a_k H_d(\omega_k)}{\sum_{k=0}^{M+1} (-1)^k a_k / W(\omega_k)} \\ a_k = (-1)^k \frac{1}{\prod_{i=0, i \neq k}^{M+1} \frac{\cos \omega_i - \cos \omega_k}{\cos \omega_i + \cos \omega_k}} \end{cases}$$

求得 $a(n)$ 即可得到脉冲波形 $h(n)$ 。但实际上交错点是不知

道的, 可通过 Remez 算法进行多次迭代计算得到。

将待设计的脉冲频谱划为 3 个片断, 分别的边缘为 $0.2067\pi, 0.2133\pi, 0.7000\pi, 0.7067\pi$, 允许衰减为 $0.02, 0.10, 0.32$, 得到图 1 的脉冲波形频谱, 与 FCC 模板相比特别在 $3.1\text{GHz} \sim 10.6\text{GHz}$ 这个频段有很好的近似, 充分利用了模板频谱。图 2 是脉冲时域波形, 是一个亚纳秒级的脉冲。对脉冲信号要求不同时, 可以通过改进逼近精度、边缘参数及波动衰减参数得到符合要求的波形。

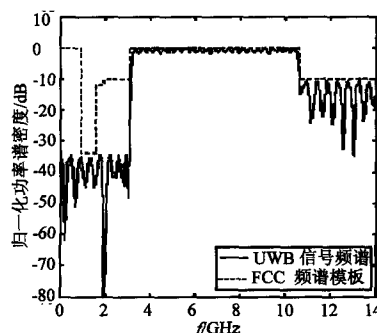


图 1 UWB 脉冲信号频谱

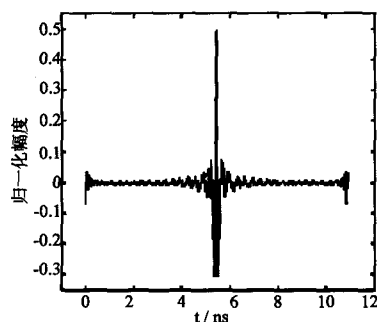


图 2 UWB 脉冲波形

结束语 FCC 对超宽带可利用的带宽和信号发射功率所作的限制使研究者在设计 UWB 脉冲波形时可避开窄带系统的某些重要频段。充分利用 FCC 模板, 可优化 UWB 脉冲信号形式, 最大限度地提高系统性能。本文设计的 UWB 信号脉冲波形在频域均匀一致地逼近模板, 很好地满足了 FCC 辐射遮蔽要求, 充分利用了规范中给出的免授权频段, 同时能够根据需要灵活调整逼近精度, 得到不同的脉冲波形。分析设计方法可知, 如果变换为其他模板, 该方法同样适用。仿真试验结果验证了本方法的有效性, 对于 UWB 在实际系统中的使用有很好的指导意义。所以该方法设计的脉冲可以作为 UWB 通信的一种基础脉冲形式。

参考文献

- [1] Docket 98-153, Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-wideband Transmission Systems. First Report and Order[S]. USA: Federal Communications Commission, 2002
- [2] Abu-Suleiman G S. A study of composite modulation scheme for impulse ultra wide-band communications[D]. Arlington, USA: The university of Texas at Arlington, 2004
- [3] Luo Zhendong, Gao Hong, Liu Yuan'an, et al. Ultra-wideband pulse design approach for multiple narrowband interference suppression[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(1): 55-58
- [4] 赵君喜. UWB 无线电脉冲波形设计研究[J]. 通信学报, 2005, 26(10): 102-106
- [5] 邹卫霞, 裴晶, 周正. UWB 脉冲的优化设计[J]. 北京邮电大学学报, 2006, 29(4): 65-68
- [6] Rabiner L R, McClellan J H, Parks T W. FIR digital filter design techniques using weighted Chebyshev approximation // Proc. IEEE. Apr. 1975, 63: 595-610