

UWB脉冲正交综合优化设计算法

陈国东, 武穆清

(北京邮电大学宽带通信网络实验室 北京 海淀区 100876)

【摘要】从提高频谱利用率和满足FCC辐射掩模规定的角度出发,采用频域反推和时域正交综合相结合的设计方法,利用扁长椭球波函数(PSWF)来生成脉冲基。在此基础上,应用基于有限项PSWF脉冲基的正交综合来优化设计UWB成形脉冲。仿真结果表明该算法设计的脉冲不仅能很好地满足FCC辐射掩模的要求,而且具有较好的频谱利用率。

关键词 脉冲优化设计; 正交综合; 扁长椭球波函数; 频谱利用率; 超宽带系统
中图分类号 TN915.142 文献标识码 A

Optimal Pulse Design Based on Synthesis of PSWFs for UWB

CHEN Guo-dong and WU Mu-qing

(Broadband Communication Network Laboratory, Beijing University of Posts and Telecommunications Haidian Beijing 100876)

Abstract A novel ultra-wideband (UWB) pulse design algorithm combining the methods of spectrum analysis and orthogonal basis synthesis in time domain is presented to improve the spectrum utilization efficiency and conform the federal communications commission (FCC) emission mask constraint. UWB pulse can be obtained by orthogonal synthesis of finite number of prolate spheroidal wave function (PSWF) pulse basis, which matching FCC emission mask. The simulation results show that the pulse designed by this algorithm can perfectly meet the requirement of FCC emission mask and has higher spectrum utilization efficiency.

Key words optimal pulse design; orthogonal synthesis; prolate spheroidal wave function; spectrum utilization efficiency; ultra-wideband system

在UWB系统设计中,由于要求UWB信号的功率谱密度需严格限定在特定的辐射掩模之内,而信号功率谱的形状又主要取决于UWB脉冲的波形,因此,UWB脉冲的设计和优化显得尤为重要。文献[1-3]采用从频域出发来反求时域脉冲波形的方法,所设计的系列脉冲符合美国联邦通信委员会(FCC)的规定,但脉冲的频谱利用率却不高,最高的仅为39.2%。文献[4-6]从时域出发,基于某种特定函数来设计UWB脉冲,但都存在某些不足:文献[4]所设计的高斯组合脉冲没有在全频域上符合FCC的辐射掩模规定;文献[5]所设计的脉冲的频谱利用率虽然高达83.77%,却需要多达33个时延高斯脉冲的组合,复杂度高;文献[6]选用Rayleigh脉冲,其最高频谱利用率也仅为40.24%。本文提出了一种设计UWB脉冲的新算法,采用频域和时域相结合的设计方法。即先借用PSWF的特性,从频域出发根据特定辐射掩模的约束条件反求出相应的脉冲基,然后基于PSWFs脉冲基的正交综合来设计既符合FCC辐射掩

模规定又具有较高频谱利用率的UWB成形脉冲。

1 PSWFs脉冲基的导出

扁长椭球波函数集^[7] $\{\varphi_i(t)\}$ 在无穷区间和有限区间都是正交的。事实上,PSWF函数系列是带限 $[-W, W]$ 和时限 $L^2[-T/2, T/2]$ 空间上的完备正交基。它们是下列积分方程的特征函数:

$$\int_{-T/2}^{T/2} \varphi(x) \frac{\sin \omega(t-x)}{\pi(t-x)} dx = \lambda \varphi(t) \quad (1)$$

式中 $\varphi(t)$ 为扁长椭球的本征函数; λ 为其对应的本征值。它们都是扁长椭球参量 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(1)可以看出,输入函数 $\varphi(t)$ 经过角频率 ω 限制和时间 $T/2$ 限制之后,系统的输出函数仍为它自身 $\varphi(t)$,但要乘上一个小于1的表示能量集中度的衰减因子 λ 。进一步对式(1)进行变换可得:

$$\lambda \varphi(t) = \varphi(t) \otimes 2W \sin 2Wt \quad (2)$$

收稿日期: 2007-03-26; 修回日期: 2008-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(60372101)

作者简介: 陈国东(1978-),男,博士生,主要从事超宽带无线通信和认知无线技术方面的研究。

式(2)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 的理想低通滤波器, 其输出为 $\lambda\varphi(t)$ 。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 $\lambda\varphi(t)$, 且满足:

$$\begin{cases} \lambda\varphi(t) = \varphi(t) \otimes h(t) \\ h(t) = 2f_u \operatorname{sinc} 2f_u t - 2f_l \operatorname{sinc} 2f_l t \end{cases} \quad (3)$$

式中 $h(t)$ 为理想带通滤波器的冲激响应。这也正是本文反求相应PSWFs脉冲基 $p_i(t)$ 的理论基础。在FCC室内辐射掩模中, 为了充分利用3.1~10.6 GHz频段, 可把该频段上的频谱模板等效为具有相同频谱特性的特定理想带通滤波器^[1], 即在式(3)中取 f_u 为10.6 GHz, f_l 为3.1 GHz。由于PSWF函数系列没有显式表达式, 一般只能通过求解得到其相应的近似解。因此, 通过对式(3)进行离散化处理可得到其对应的离散卷积形式, 并可进一步简化成一个Hermitian矩阵方程, 通过该Hermitian矩阵的特征值分解可求得 $\varphi(t)$ 的一系列近似数值解, 然后可以从中选取相应的特征值所对应的正交特征向量 $\tilde{\varphi}_i(t)$ 作为PSWFs脉冲基 $p_i(t)$ 。

2 UWB脉冲优化设计

本文基于PSWFs脉冲基的正交综合来设计UWB的成形脉冲, 使其在全频域满足FCC辐射掩模的规定, 并在此前提下尽可能地提高脉冲的频谱利用率。在对设计算法进行详细阐述之前, 先对算法中涉及的有限项PSWF脉冲基的选取进行理论上的分析, 对相关参量的设定和计算进行理论上的说明。

2.1 UWB脉冲正交综合

设所要设计的目标脉冲为 $p(t)$, 则在理论上可将该脉冲展开为无穷项PSWFs正交脉冲基之和。但在工程设计实际中, 一个信号的分解或综合都不可能是建立在无穷多个正交基的基础之上的。这样, 必然要对无穷项进行截断, 使其近似为有限项之和:

$$\tilde{p}(t) = \sum_{i=0}^N a_i \varphi_i(t) \quad (4)$$

式中 $\tilde{p}(t)$ 为目标脉冲 $p(t)$ 的近似值; N 为展开的PSWF函数最大的阶数; a_i 为对应脉冲基上的综合系数。因此, 如何选取 N 使得 $p(t)$ 由 $\{\varphi_i(t)\}$ 的有限项表示时精度高就显得至关重要了。

从信号能量最大化的角度来看, 要使 $\tilde{p}(t)$ 近似的精度高, 则最好使截断之后的脉冲能量能够在所期望的频段内尽量地保持原样, 即由截断而造成的带外信号能量损失应尽可能地小。而 λ_i 表示第 i 阶

PSWF函数基 $\varphi_i(t)$ 的能量集中度, 故在选取有限的展开项时应尽可能地选择具有较大 λ 值的函数基。其中, λ 为参数 C 的函数 $\lambda(C)$ 。因此, 在利用PSWF函数基来展开目标脉冲时, 参数 C 的选取是非常重要的。由PSWF的特性可知, 对应于 λ_0 的0阶扁长椭圆波函数 $\varphi_0(t)$ 具有最大的能量集中度, 其带外能量损失最小。文献[8]已经证明, λ_0 与参数 C 之间存在如下近似关系式:

$$1 - \lambda_0 \approx 4\sqrt{\pi C} e^{-2C} \quad (5)$$

这样, 为了使 λ_0 能取得最大值1, C 至少应该大于等于8。另外, PSWF函数的阶数 i 与其对应的能量集中度 λ_i 和参数 C 之间也存在着显著的关联。从文献[9]可知, 当 $i \leq 2C/\pi$ 时, λ_i 接近1; 当 $i > 2C/\pi$ 时, λ_i 经历指数衰减迅速趋于0。综上所述, 一个脉冲信号基于PSWF函数基的展开是可以为有限项的, 且一般可这样设定: 取 $C \geq 8$, 当精度要求不是特别关注时, 可取函数展开的有限项 $N=2C/\pi$, 这样设计的复杂度低; 当要求高精度度时, 可取函数展开的有限项 $N=C$, 这样所截断的误差较小。

同时, 为了描述所设计的目标脉冲对频谱模板所允许带宽和功率的有效利用程度, 可借用文献[5,10]中的概念来定义在UWB频段 $[f_l, f_u]$ 的频谱利用率为:

$$\phi = \frac{P_{\text{OBI}}}{P_{\text{FCCmax}}} \times 100\% \quad (6)$$

式中 P_{OBI} 是目标脉冲的总功率; P_{FCCmax} 是FCC掩模所允许的最大总功率。

2.2 UWB脉冲设计算法

从各设计参量的说明可知, 目标脉冲 $p(t)$ 可以表示为PSWF正交脉冲基的有限项之和。因此, 本文设计的关键就是如何选取各脉冲基上的综合系数, 以使目标脉冲符合设计的要求。本文将根据所选取的各个PSWF脉冲基的能量集中度特点, 通过迭代算法来修改相应PSWF脉冲基上的综合系数, 实现目标脉冲的功率谱逼近FCC辐射掩模, 并使得目标脉冲的频谱利用率达到某个预先设定的阈值之上。在迭代计算综合系数的过程中, 采用内外两重迭代算法, 内层迭代主要是通过逐个增加脉冲基的方法来求得符合FCC辐射掩模要求的相关系数值, 外层迭代则主要是通过改变内层迭代步长的方式使得目标脉冲的频谱利用率达到设定的某个阈值的规定。这不仅简化了计算, 而且也使得目标脉冲的设计具有了更大的灵活性。通常, 0阶PSWF脉冲基的能量集中度最高, 且其功率谱形状很平滑, 故在迭代计算

时应尽量使该脉冲基上的综合系数最大。值得一提的是,在迭代过程中,选择不同的频谱利用率阈值作为外层迭代中止条件,最后的综合系数是不同的,因此这种方法所得到的综合系数不是唯一的,即可以得到多个符合要求的成形脉冲。

3 仿真结果及分析

首先,根据本文第2节所述的原理生成所需的PSWF脉冲基。在仿真中,设定系统参量 $C = 7.5\pi$,求得相应的特征值 λ_i ,如图1所示。从图1可以看出当 $i \leq 2C/\pi = 15$ 时, λ_i 确实是趋于1的;而当 $i > 15$ 时, λ_i 迅速衰减为0,这和理论上的结果是完全一致的。

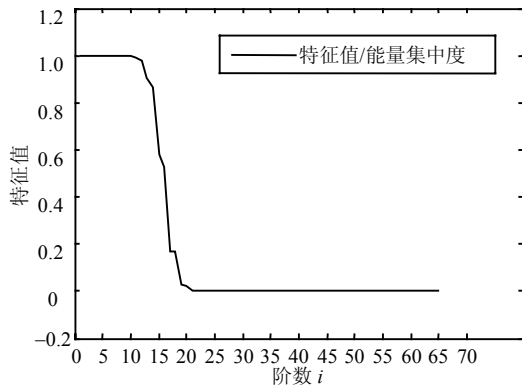


图1 PSWF特征值/能量集中度曲线图

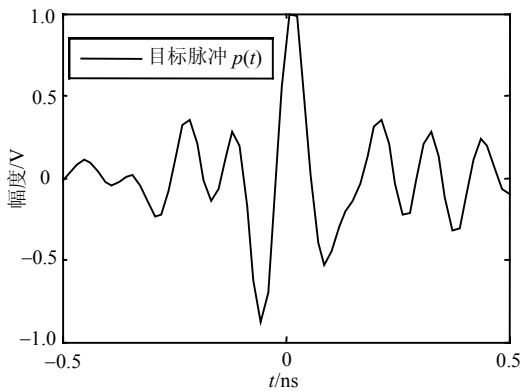


图2 目标脉冲 $p(t)$ 的波形, $N=15$

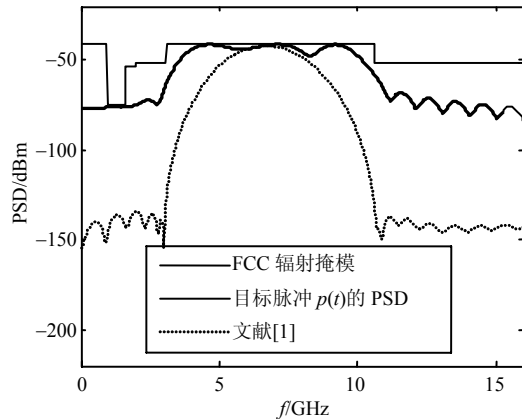


图3 目标脉冲 $p(t)$ 的功率谱密度, $N=15$

在生成了所需的PSWF脉冲基后,可利用脉冲基的正交综合设计算法来求得符合要求的综合系数,以生成最终的目标脉冲。先选取 $N = \text{round}(2C/\pi) = 15$,频谱利用率预定阈值设定为60%,其中函数 round 表示四舍五入的取整,应用迭代循环算法计算后可得到一组有效的综合系数。此时目标脉冲表示为 $p(t) = \sum_{i=0}^{15} a_i \tilde{\varphi}_i(t)$,其频谱利用率 $\phi_{\text{UWB}} = 60.07\%$,相应的波形及频谱密度分别如图2、图3所示。

再选取 $N = \text{round}(C) = 24$,此时目标脉冲 $p(t)$ 由25个PSWF脉冲基综合而成,精度更高。应用算法同样可求得符合要求的目标脉冲,其频谱利用率 $\phi_{\text{UWB}} = 65.16\%$,相应的波形及频谱密度分别如图4、图5所示。

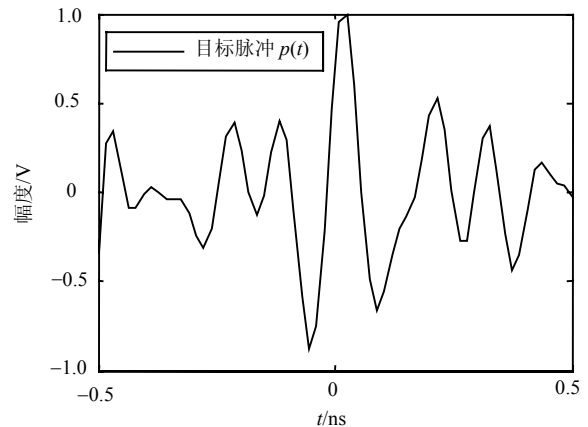


图4 目标脉冲 $p(t)$ 的波形, $N=24$

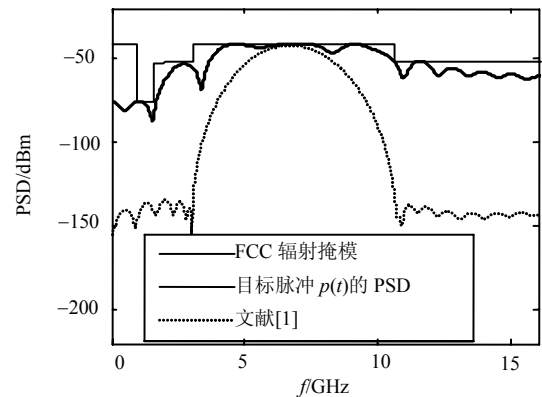


图5 目标脉冲 $p(t)$ 的功率谱密度, $N=24$

在仿真中,发现若 $N=24$ 时,在外迭代循环次数相同的情况下,目标脉冲能够取得更高的频谱利用率;而要取得与 $N=15$ 时一样的频谱利用率,其在进行外迭代循环计算的次数会明显减少。

4 结论

本文采用了频域反推和时域正交相结合的设计方法,基于PSWFs正交脉冲基的相关特性提出

了一种新的UWB成形脉冲设计算法。该算法所设计的UWB脉冲不仅满足了FCC辐射掩模的规定,而且大大提高了脉冲的频谱利用率。仿真结果与理论分析结论相一致,表明了该算法的简单及可行性。

参 考 文 献

- [1] PARR B, CHO B, WALLACE K. A novel ultra-wideband pulse design algorithm[J]. IEEE Communications Letters, 2003, 7(5): 219-221.
- [2] DILMAGHANI R S, GHAVAMI M, ALLEN B, et al. Novel UWB pulseshaping using prolate spheroidal wave functions[C]//Proc 14th IEEE International Symposium on Personal, Indoor & Mobile Radio Communications (PIMRC2003). BJ: [s.n.], 2003, 602-606.
- [3] ZHANG H G, KOHNO R. SSA realization in UWB multiple access systems based on prolate spheroidal wave functions. [J]. IEEE WCNC 2004, 2004, 3(21-25): 1794-1799.
- [4] 林志远, 魏 平. 一种新的UWB 通信脉冲设计[J]. 通信学报, 2006, 27(7): 123-126.
LIN Zhi-yuan, WEI Ping. Novel UWB communication pulse design method[J]. Journal on Communications, 2006, 27(7): 123-126.
- [5] WU X R, TIAN ZH, DAVIDSON T N, et al. Optimal waveform design for UWB radios[J]. Proc IEEE ICASSP'04, 2004: 521- 524.
- [6] 邹卫霞, 周 正. 基于频段及带宽限制设计UWB脉冲的算法[J]. 北京邮电大学学报, 2005, 28(5): 94-97.
ZOU Wei-xia, ZHOU Zheng. Algorithm for UWB pulse based on the frequency band and bandwidth constraint[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2005, 28(5): 94-97.
- [7] 陶纯堪, 陶纯匡. 光学信息论[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
TAO Chun-kan, TAO Chun-kuang. Theory of optics information[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [8] SLEPIAN D. Some asymptotic expansions for prolate spheroidal functions[J]. Math Physics, 1965, 44: 99-140.
- [9] CHEN Q Y, GOTTLIEB D, HESTHAVEN J S. Spectral methods based on prolate spheroidal wave functions for hyperbolic PDEs[J]. SIAM Journal on Numerical Analysis, 2005, 43(5): 191-933.
- [10] MARIA-GABRIELLA D B, GUERINO G. Understanding ultra wide band radio fundamentals[M]. America: Pearson Education, 2004: 111-113.

编辑 张 俊

(上接第659页)

- [2] LI Jian-jun, KIM H, KIM S, et al. A new cell structure for distributed wireless communication system without inter-cell interference[C]//IEEE Global Telecommunications Conference. Saint Louis, Missouri, USA: IEEE, 2005.
- [3] HU Hong-lin, MARTIN W, LUO Ji-jun. Adaptive transmission mode selection scheme for distributed wireless communication systems[J]. IEEE Communications Letters, 2006, 10(7): 573-575.
- [4] LI Zheng, WANG Yu, WU Wei-ling. Position location and direction assisted handoff algorithm in DWCS[C]//IEEE 15th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications. Barcelona, Spain: IEEE, 2004: 663-666.
- [5] CHEN Peng, LI Zheng, WU Wei-ling. A class of antenna dynamic selection algorithm based on E_b/I_0 in DWCS[C]//2004 International Conference on Signal Processing and Communications. Bangalore, India: [s.n.], 2004.
- [6] LIN J C. Health effects: scientific research and mobile phone testing[J]. IEEE Microwave Magazine, 2002, 3(4): 26-30.
- [7] KATZ M, FITZEK F H P. Cooperative techniques and principles enabling future 4G wireless networks[C]//2005 International Conference on Computer as a Tool. Serbia and Montenegro Belgrade: [s.n.], 2005.
- [8] KERPEZ K J. A radio access system with distributed antennas[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1996, 45(2): 265-275.
- [9] HAMALAINEN S, HOLMA H, TOSKALA A. Capacity evaluation of a cellular CDMA uplink with multiuser detection[C]//IEEE 4th International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Mainz, Germany: IEEE, 1996.
- [10] NAHLER A, IRMER R, FETTWEIS G. Reduced and differential parallel interference cancellation for CDMA systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(2): 237-247.

编辑 黄 莘