

一种支持任意码率的高斯低通滤波器设计

王仁智, 孔雅, 张春泽

(天津讯联科技有限公司, 天津 300308)

摘要: GMSK(高斯最小偏移键控)调制技术具有较高的频谱调制效率, 适用于航空航天高码率遥测领域。高斯低通滤波器是 GMSK 调制技术的关键单元。介绍了高斯低通滤波器的设计原理, 通过采用 LUT 查表法和异或运算的方法在 Xilinx 的 FPGA 中实现了一种支持任意码率、低资源消耗的高斯低通滤波器。对仿真和实现结果进行分析, 该滤波器在未使用 DSP48E1s 资源和较少的 LUT 资源条件下实现了任意码率切换功能。

关键词: FPGA; GMSK; 低通滤波器; 遥测

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.201039

中文引用格式: 王仁智, 孔雅, 张春泽. 一种支持任意码率的高斯低通滤波器设计[J]. 电子技术应用, 2021, 47(7): 61-63, 68.

英文引用格式: Wang Renzhi, Kong Ya, Zhang Chunze. Design of a Gaussian low pass filter with arbitrary bit rate[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(7): 61-63, 68.

Design of a Gaussian low pass filter with arbitrary bit rate

Wang Renzhi, Kong Ya, Zhang Chunze

(Tianjin Xunlian Technology Co., Ltd., Tianjin 300308, China)

Abstract: GMSK(Gaussian filtered minimum shift keying) modulation technology has high spectrum modulation efficiency, which is suitable for aerospace high bit rate telemetry. Gaussian low pass filter is the key unit of GMSK modulation technology. The design principle of Gaussian low pass filter was introduced, a Gaussian low-pass filter with arbitrary bit rate and low resource consumption was implemented in Xilinx FPGA, with LUT look-up table method and XOR operation used. Arbitrary rate switching function was achieved without using DSP48E1s resources and less LUT resources through the simulation and implementation results.

Key words: FPGA; GMSK; low pass filter; telemetry

0 引言

目前国内主流总体单位在航空、航天领域使用最广泛的 PCM-FM 遥测系统^[1]最高遥测码率仅为 2 Mb/s。而我国遥测标准(国家军用标准 GJB21)主要参考了国际遥测标准 IRIG106 的最新版本, 已经将遥测系统的最高码率提高到 20 Mb/s。随着国内总体单位对遥测码率不断提高的需求, 高码率以及码率可任意切换是遥测系统的发展趋势。但是随着遥测码率的不断提高和作用距离的不断增加, 遥测系统对遥测体制的功率利用率和频段利用率要求随之提高。GMSK(高斯滤波最小频移键控)调制作为一种连续相位调制, 具有频谱带宽小、频带利用率高、邻带干扰小和频谱滚降特性好的特点^[2-4], 同时, 由于 GMSK 调制信号的恒包络特性, 其经过射频非线性功率放大器后失真小, 在高码率的遥测系统中获得广泛应用。

GMSK 调制是先对遥测数据进行高斯预滤波再对滤波结果进行 MSK 调制实现的, GMSK 调制器的原理框图如图 1 所示, 其中高斯滤波器作为 GMSK 的主要构成单



图 1 GMSK 的调制原理框图

元, 是 GMSK 的设计的关键^[5-6]。

传统的数字滤波器为了保持频谱特性不变, 在码率需要改变时通过更改时钟速率来维持滤波器的频谱特性和相位特性。为了降低 FPGA 内部跨时钟域的设计难度以及提高滤波器频谱特性^[7], 本文采用一种固定频率的系统时钟作为滤波器的系统时钟, 数据通过结合使能信号和相位信号并采用改进的滤波器结构实现了一种支持任意码率的高斯低通滤波器。

1 高斯低通滤波器模型

高斯低通滤波器是一种线性平滑滤波方法, 传输函数和冲击响应函数分别如式(1)和式(2)所示^[8-9]:

$$H(f) = e^{-\frac{f^2}{2\pi^2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$h(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中, $\sigma = \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi B}$, B 是高通滤波器的 3 dB 带宽。

一个宽度为 T_b 的矩形脉冲通过传输函数为式(1)的高斯滤波器的响应如式(3)所示:

$$g(t) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{t - \frac{T_b}{2}}{\sqrt{2} \sigma} \right) - \operatorname{erfc} \left(\frac{t + \frac{T_b}{2}}{\sqrt{2} \sigma} \right) \right] \quad (3)$$

其中, $\sigma = \frac{\sqrt{\ln 2}}{2\pi B}$, $\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$, 即互补误差函数。

$g(t)$ 函数曲线与 B 和 T_b 的值有关, GMSK 中的高通滤波器的特性采用 B 值与 T_b 的乘积(即 BT)表示。取不同 BT 值绘制 $g(t)$ 曲线, 波形如图 2 所示^[10-11]。

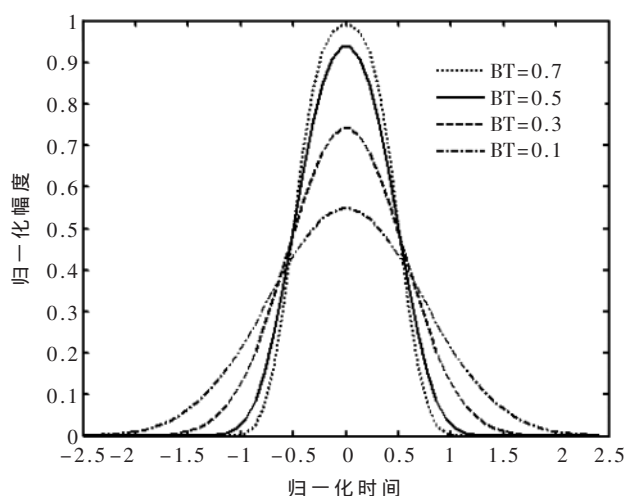


图 2 $g(t)$ 函数的波形曲线

图 2 中横坐标为码元时间长度 T_b , 通过观察可见, BT 越大, $g(t)$ 波形的越高瘦, 码元波形越尖锐; BT 值越小, $g(t)$ 波形的越矮胖, 码间串扰也越严重。应根据不同的使用环境而决定最终的 BT 值。当 BT 值不小于 0.5 时, 当前码元相位路径只受相邻的 3 个码元影响; 而当 BT 值小于 0.5 时, 当前码元相位路径有可能会受到相邻的 5 个码元影响, 甚至更多。低 BT 值的 GMSK 调制在移动通信领域使用较多, 而遥测领域 GMSK 使用的 BT 值一般不会低于 0.5 (BT=0.5 的情况最多)。

下面给出受相邻 3 个码元影响共 8 种情况下的相位路径变化曲线列表^[12-13], 如表 1 所示。

GMSK 调制器中的预滤波器如果使用表 1 的穷举方法设计, 则需要消耗大量的 FPGA 资源。更何况如果是低 BT 值的滤波器, 穷举相位路径不再是表 1 中的 8 种, 而是增加到了 32 种, FPGA 资源的消耗更是惊人。为此, 本文提出了一个改进的滤波器结构, 在降低资源消耗的同时能支持任意码率的切换。

2 高通低通滤波器的改进

高通滤波器在 GMSK 调制中的作用是平滑相位轨

表 1 相位路径曲线

相邻码元	相位路径变化曲线函数 $f_n(t)$
000	$f_0(t) = -1$
001	$f_1(t) = \operatorname{erf} \left[\frac{2B\pi}{\sqrt{2\ln 2}} (t - T_b) \right]$
010	$f_2(t) = \operatorname{erf} \left[\frac{2B\pi}{\sqrt{2\ln 2}} t \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{2B\pi}{\sqrt{2\ln 2}} (t - T_b) \right] - 1$
011	$f_3(t) = \operatorname{erf} \left[\frac{2B\pi}{\sqrt{2\ln 2}} t \right]$
100	$f_4(t) = -\operatorname{erf} \left[\frac{2B\pi}{\sqrt{2\ln 2}} t \right]$
101	$f_5(t) = \operatorname{erf} \left[\frac{2B\pi}{\sqrt{2\ln 2}} (t - T_b) \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{2B\pi}{\sqrt{2\ln 2}} t \right] + 1$
110	$f_6(t) = -\operatorname{erf} \left[\frac{2B\pi}{\sqrt{2\ln 2}} (t - T_b) \right]$
111	$f_7(t) = 1$

迹变化, 使之无陡峭边沿, 亦无拐点^[14-15]。GMSK 与 MSK 相位轨迹图对比如图 3 所示。

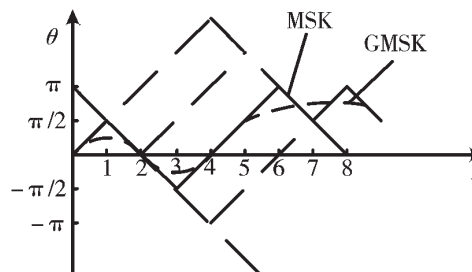


图 3 GMSK 的相位轨迹

传统高通滤波器可以使用 IIR 滤波器结构或 FIR 滤波器结构^[16], 但是这两种传统结构滤波器频谱特性与码率有关, 考虑到传统的 GMSK 调制器在高通滤波器还需要一个积分器, 积分器对于码率的变化也很敏感。为了适应任意码率切换, 本文提出的改进措施包括: (1) 滤波器和积分器的结构合二为一; (2) 改进滤波器的结构。

2.1 滤波器和积分器的结构合二为一设计

传统的 GMSK 调制器设计中一般先进行高通低通滤波再进行相位积分, 本文采用了合并高通滤波器和积分器的设计, 与传统的高通滤波器采用式(3)中 $g(t)$ 作为 FIR 滤波器的系数不同, 本文的改进是先将 $g(t)$ 进行积分处理, 积分后的曲线如图 4 所示。

图 4 中横坐标为码元时间长度 T_b , 通过使用 $g(t)$ 积分后的曲线作为滤波器系数去设计 FIR 滤波器, 实现积分器与滤波器合并设计的目的。

2.2 滤波器结构改进

传统的高通滤波器通常采用 FIR 滤波器结构, 如图 5 所示。

这种结构中, 需要使用多个乘法器, 本文中采用双极性编码与异或操作结合的方法代替传统乘法器, 来降低资源的消耗。同时为了支持任意码率切换, 本文采用

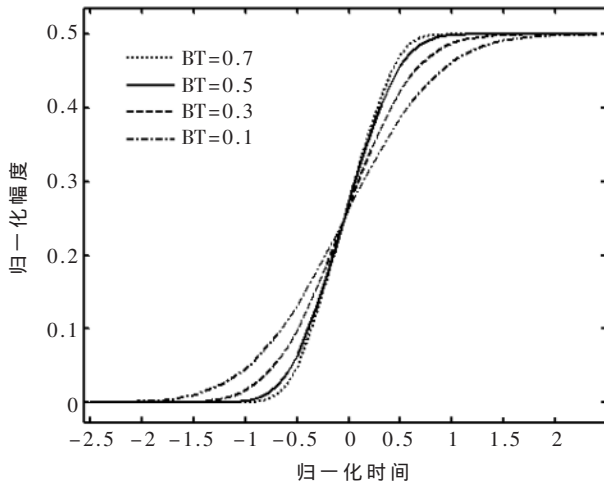
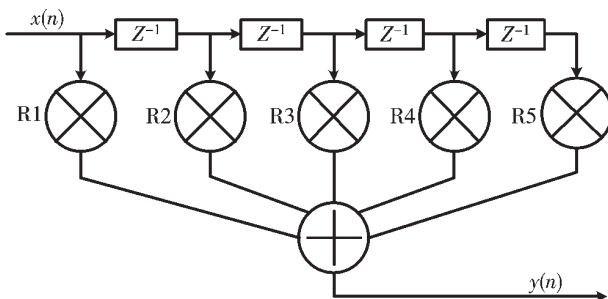
图4 $g(t)$ 函数积分后的曲线

图5 传统高斯滤波器结构

滤波器系数 LUT 来代替滤波器系数,使用数据相位 phase 信号来作查找表的地址。改进后的滤波器结构如图 6 所示。

3 仿真实现

对本文的改进高斯滤波算法使用 Xilinx 的 FPGA 进行了设计实现, FPGA 型号为 XC7K325T-FFG900。且进行了仿真和电路测试,仿真结果如图 7 所示。

图 7 中, $x(n)$ 是未进行高斯低通滤波的相位信号, $y(n)$ 是经过本文介绍方法的高斯低通滤波器的信号。经过

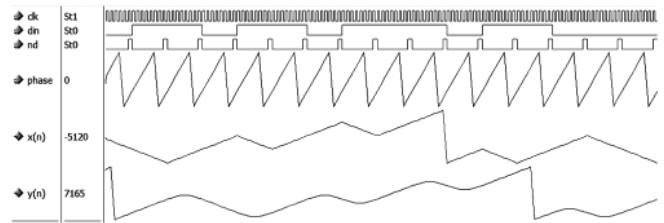


图7 MSK 和 GMSK 调制相位对比

$y(n)$ 与 $x(n)$ 相比, 相位信号经过高斯低通滤波器之后其相位变化曲线获得了平滑效果, 避免了拐点的出现。

为了进一步验证该滤波器的性能, 将该部分代码封装成固化的功能模块, 结合 cordic 模块完成 GMSK 调制, 对滤波性能进行进一步的验证, 仿真效果如图 8 所示。

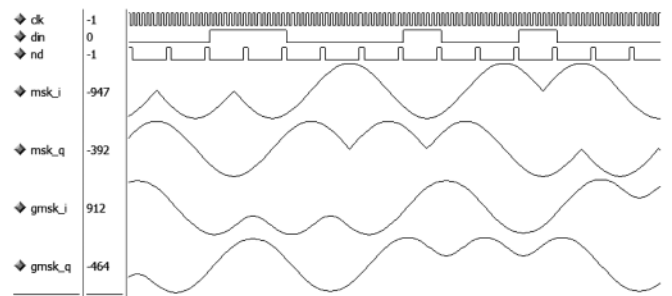


图8 MSK 和 GMSK 调制曲线对比

图 8 中, clk 为时钟信号, din 为数据信号, nd 为数据使能信号, msk_i 和 msk_q 为未经过高斯滤波器产生的调制信号(即 MSK 调制信号)。gmsk_i 和 gmsk_q 为经过高斯滤波器产生的调制信号(即 GMSK 调制信号)。可见 GMSK 调制信号的波形避免了 MSK 调制信号中的陡峭拐点。

对该种高斯滤波器的资源消耗情况进行分析评估, 如表 2 所示。可见本设计使用极低的 FPGA 资源完成了一款支持任意码率的滤波器设计。

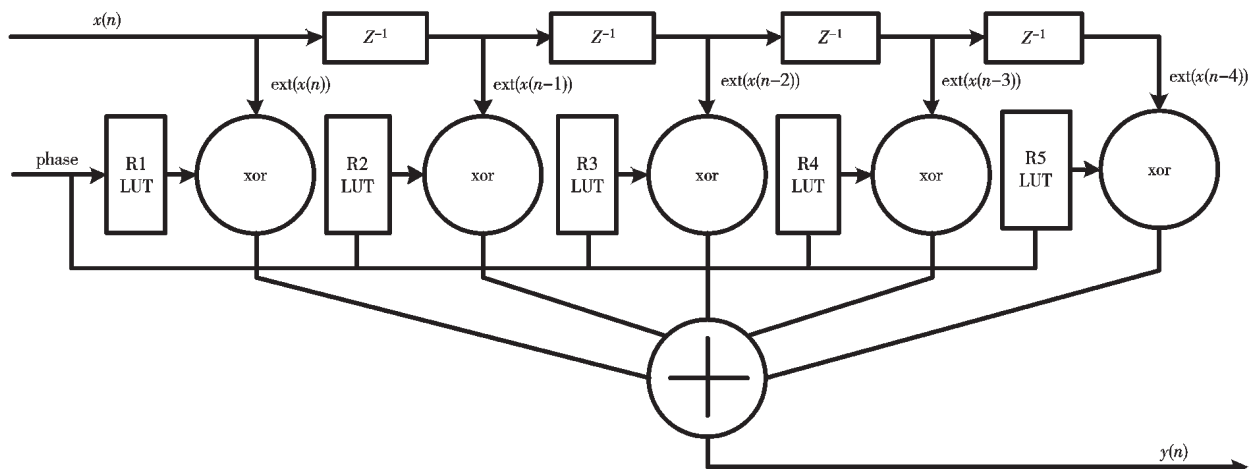


图6 改进后的高斯滤波器结构

(下转第 68 页)

- [6] CHOI J, CHOE C, PARK D, et al. Practical LPI communication with noise-shaped signaling[C]. IEEE ICTC 2019, 2019: 332-337.
- [7] 曾小东. 直扩通信信号低截获性能分析[J]. 无线电工程, 2020, 50(11): 917-920.
- [8] SHEN Y Y, WANG Y Q, YU X L, et al. Whole-region hybrid search algorithm for DSSS signal acquisition[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 95(2): 1265-1284.
- [9] 江波, 杜欣军, 杨宇晓. 基于混沌粒子群优化的低截获概率编队通信方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(12): 93-97.
- [10] 杨宇晓, 周建江, 徐川. 射频隐身数据链功率控制方法研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(12): 80-84.
- [11] 时晨光, 丁琳涛, 周建江. 基于 Stackelberg 博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 29-41.

- [12] 侯立志, 何晶, 傅玉鑫, 等. 自适应调零天线抗干扰性能影响因素研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(1): 193-197.
- [13] 曾浩, 方贝贝, 吉利霞, 等. 一种抗脉冲干扰的调零天线波束合成方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 27-32.
- [14] 何召阳, 王谦喆, 祝寄徐, 等. 飞机高机动飞行双机通信性能优化研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(2): 119-122.
- [15] 王明伟, 李立欣, 张会生, 等. 基于定向天线和最佳中继选择 AF 策略的协作通信系统[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 87-93.

(收稿日期: 2020-12-12)

作者简介:

高鹏程(1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 航空电子、传感器管理。



扫码下载电子文档

(上接第 63 页)

表 2 资源消耗情况

资源名称	数量/个	总量/个	消耗占比/%
Slice Registers	165	407 600	<1
Slice LUTs	164	203 800	<1
Occupied Slices	62	50 950	<1
RAMB36E1/FIFO36E1s	2	445	<1
RAMB18E1/FIFO18E1s	1	890	<1
DSP48E1s	0	840	0

4 结论

本文介绍了一种基于 LUT 查表法和异或运算的滤波器设计方法, 这种方法能有效降低 FPGA 资源消耗; 同时介绍了一种特殊的滤波器系数计算方法, 能将积分器和滤波器合二为一。采用以上两种设计方法制作的高斯低通滤波器能支持任意码率切换, 对于设计通用型 GMSK 调制器具有重要意义。本文中对于设计方法进行了实现和仿真, 并对具体的 FPGA 资源消耗情况进行了分析, 其设计模块单元已经在航天某院某遥测系统中获得了应用, 使用效果良好, 复用性强。

参考文献

- [1] 孙雪峰, 王志有, 宋锐, 等. 新型航天遥测信号调制解调技术[J]. 测试技术学报, 2016, 30(1): 34-39.
- [2] 李峰. 一种 GMSK 调制器的简化设计[J]. 现代导航, 2015(2): 138-143.
- [3] 游莎莎, 刘胜利, 罗雷刚, 等. GMSK 调制技术及其在遥测中的应用分析[J]. 无线电工程, 2011, 41(12): 41-43.
- [4] 樊宏伦. 基于 FPGA 的 GMSK 调制器的设计实现[J]. 哈尔滨商业大学学报(自然科学版), 2014, 30(3): 361-364, 373.
- [5] 赵伟, 徐海川, 张兰. GMSK 调制的两点注入算法实现[J]. 现代电子技术, 2012, 35(15): 76-78.

- [6] 周三文, 卢满宏, 黄建国. 数字可变符号率调制器设计[J]. 遥测遥控, 2013, 34(3): 39-42.
- [7] 白昊, 任泽宇. 一种改进的 GMSK 全数字正交调制算法[J]. 火控雷达技术, 2016, 45(3): 38-42.
- [8] 王伟程, 李艳华, 周三文. 任意采样率变换数字重构滤波器设计[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(4): 360-365.
- [9] 陈志堂, 唐博, 秦开宇. 新型 GMSK 调制实现算法研究与设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(11): 41-45.
- [10] DEVI M D. Ber performance of GMSK using MATLAB[J]. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering and Technology, 2013, 2(4): 1389-1392.
- [11] 赵彦惠. 基于相位累加实现 GMSK 调制器的技术分析[J]. 无线电工程, 2013, 43(3): 20-23.
- [12] 唐智灵, 李钺, 李思敏. 任意信息速率的 GMSK 信号调制解调方法[J]. 电讯技术, 2019, 59(11): 1299-1305.
- [13] 韩喆, 陈赵, 戚磊. 基于开源软件无线电的 GMSK 调制器设计[J]. 自动化应用, 2015(12): 26-27.
- [14] 陈敬乔, 尚春杰, 王力男, 等. 一种新的 GMSK 调制器的设计与实现方法[J]. 无线电工程, 2014, 44(7): 79-82.
- [15] 李汉桥, 陈海腾, 姚亚峰. GMSK 调制器电路设计与 FPGA 实现[J]. 电讯技术, 2011, 51(1): 31-34.
- [16] 钱者凤, 刘明, 杨文举. 基于数字正交方式实现的一种 GMSK 调制[J]. 信息技术, 2014(11): 171-174.

(收稿日期: 2020-10-26)

作者简介:

王仁智(1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 遥测遥控、单脉冲跟踪接收、无线通信、信号处理。

孔雅(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 无线通信、自组网通信、遥测遥控。

张春泽(1978-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向: 信息传输与处理、卫星导航与应用。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所