

文章编号:1001-893X(2011)01-0031-04

GMSK 调制器电路设计与 FPGA 实现^{*}

李汉桥¹, 陈海腾², 姚亚峰²

(1. 武汉软件工程职业学院 软件工程系, 武汉 430076 ;2. 中国地质大学 机械与电子信息学院, 武汉 430074)

摘 要:分析了 GMSK 调制原理, 设计了 GMSK 调制器的一种全数字实现电路。该电路采用查表法实现高斯滤波功能, 采用 CORDIC 算法完成正交调制信号输出, 具有电路规模小、精度可调、应用灵活等特点。该电路通过了 FPGA 验证并成功应用于 TETRA 集群通信系统。

关键词:TETRA 集群通信; 软件无线电; 数字调制; 数字信号处理; 高斯滤波最小频移键控; 电路设计
中图分类号:TN911.72 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2011.01.007

Design and FPGA Implementation of a GMSK Modulator Circuit

LI Han-qiao¹, CHEN Hai-teng², YAO Ya-feng²

(1. Department of Software & Engineering, Wuhan Vocational College of Software and Engineering, Wuhan 430076, China; 2. School of Mechanical & Electronic Information, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The theory of GMSK (Gaussian Filtered Minimum Shift Keying) modulation is analysed and the circuit of modulator is implemented. The Gauss filter is implemented based on lookup table and the orthogonal modulation signal is generated by CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer) algorithm in GMSK modulator circuit, so the circuit is simple, adjustable and flexible. It is verified by FPGA and is successfully applied in TETRA communication systems.

Key words: TETRA trunking communication; software defined radio (SDR); digital modulation; DSP; GMSK; circuit design

1 引 言

高斯滤波最小频移键控 (Gaussian Filtered Minimum Shift Keying, GMSK) 调制技术是在 MSK (Minimum Shift Keying) 调制基础上发展起来的一种数字调制方式, 其特点是数据流进行频率调制前先通过一个高斯滤波器进行预调制滤波, 以减小两个不同频率载波切换时的跳变能量, 使得在相同数据传输速率时频道间距可以变得更紧凑。GMSK 调制信号在交越零点不但相位连续, 而且平滑过渡, 因此 GMSK 信号比 MSK 信号具有更窄的带宽, 可以满足移动通信中对带外辐射的严格要求, 它是 GSM 移动通

信标准和 TETRA 集群通信标准中所规定的调制方式, 在无线通信中得到了广泛应用^[1,2]。

GMSK 调制器一般采用模拟滤波器和压控振荡器来实现, 但模拟电路的实现方式灵活性低, 参数配置需要通过改变片外硬件参数来实现^[3,4]。由于全数字化通信系统的发展, 使得过去以模拟或模数混合的 GMSK 调制器已不能适应现代化系统需求, 因而要求调制器设计的全数字化。本文设计了一种全数字的 GMSK 调制器电路, 该调制器采用正交调制方法, 输入序列先通过数字高斯滤波器, 再进行数字积分, 然后再对积分相位通过坐标旋转数字计算 (Coordinate Rotation Digital Computer, CORDIC) 方法分别获取正余弦值, 即得到调制的基带正交信号。

^{*} 收稿日期: 2010-10-26; 修回日期: 2010-12-14

本文详细介绍了该调制器设计原理和方法,接着还对其进行了 Matlab 仿真和 FPGA 原型验证,并且给出了关键设计源码。该调制器电路具有全数字化、便于集成等特点,可以方便应用于软件无线电、数字中频等收发设备。

2 基本原理

GMSK 调制原理就是输入的双极性不归零码(NRZ)先通过高斯滤波器进行滤波,然后再进行 MSK 调制,即 GMSK 调制是在 MSK 调制器之前加入高斯低通预调制滤波器实现的。GMSK 调制器设计重点是高斯滤波器的设计。

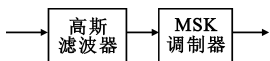


图 1 GMSK 调制器原理图

Fig.1 Schematic diagram of GMSK modulator

高斯滤波器的传输函数为

$$H(f) = \exp(-a^2 f^2) \tag{1}$$

式中, a 是与高斯滤波器的 3 dB 带宽 B_b 有关的一个常数。改变 a , 则 B_b 将随之改变。

该滤波器的冲激响应为

$$h(t) = \frac{\sqrt{\pi}}{a} \exp\left[\left(\frac{-\pi t}{a}\right)^2\right] \tag{2}$$

由此可知, 单个脉冲宽度为 T_b 的矩形脉冲通过高斯滤波器的响应为

$$g(t) = \frac{1}{2T_b} \left[Q\left(2\pi B_b \frac{t - T_b/2}{\sqrt{\ln 2}}\right) - Q\left(2\pi B_b \frac{t + T_b/2}{\sqrt{\ln 2}}\right) \right] \tag{3}$$

式中, $Q(t) = \int \sqrt{2}/2 \exp(-x^2/2) dx$, B_b 为高斯滤波器的 3 dB 带宽, T_b 为脉冲宽度。

由于理想的高斯滤波器取值范围是 $(-\infty, \infty)$, 它是物理不可实现的, 因此实际系统中需要对 $g(t)$ 进行截短或近似。截短后的高斯滤波函数为

$$g_T(t) = \begin{cases} g(t), & |t| \leq \frac{N}{2} T_b \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \tag{4}$$

式中, N 为截短长度。

在工程应用中, 往往对单个矩形脉冲通过高斯滤波器的响应波形进行 $3T_b$ 或 $5T_b$ 截短即近似。 $3T_b$ 截短后的带外能量只占 0.7%, $5T_b$ 截短后的带外能量只占 1.5124×10^{-8} 。在采取 $3T_b$ 截短时, 单个矩

形脉冲通过滤波器后, 其输出扩展到 $3T_b$ 码元宽度。也就是说, 当输入一个宽度为 T_b 的脉冲时, 其响应输出被展宽, 其输出将影响前后各一个码元的响应, 当然它也受到前后各一个码元的影响。可见, 输入码元在通过高斯滤波后, 已不可避免地引入了码间干扰。但有意引入可控的码间干扰, 以压缩调制信号的频谱, 解调时利用预知前后码元的相关性, 仍可以准确地进行解调判决。

3 电路设计

GMSK 调制器具体设计思路是: a_n 输入序列通过高斯滤波后的输出是通过查找表获取, 然后对输出值进行累加(完成积分过程), 获得积分相位信号, 再对相位信号通过 CORDIC 算法获得 $\sin$ 、 $\cos$ 值, 即是我们需要的基带 I、Q 信号。该调制器具体完成的功能如图 2 所示。

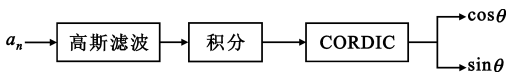


图 2 GMSK 调制器组成框图

Fig.2 Component diagram of GMSK modulator

GMSK 调制器电路设计主要是数字高斯滤波器的设计。本文设计的高斯滤波器是通过对理想的“高斯滤波矩形脉冲响应”进行 $5T_b$ 截短获得的, 也可以看成是对理想的“高斯滤波矩形脉冲响应”进行加矩形窗获取的(其矩形窗窗口宽度为 5 倍码元宽度)。也就是说, 单个码元输入, 通过滤波后扩展为 5 码元宽度的输出数据。假设单个码元进行 50 点采样, 即每个码元含 50 个样点, 那么单个码元经过 $5T_b$ 截短的高斯滤波, 则对应 250 个样点值输出。而多个连续码元经过滤波器后, 则需要对各个码元滤波后的扩展结果进行叠加运算, 就可以得到整个“比特流”经过高斯滤波的结果。由于在一个码元时间里采样点数和滤波后的输出值是有限的和确定的, 所以可以制作成表格存储在 ROM 中, 这样可以大大简化滤波器设计, 本文即采用查表法实现高斯滤波器。

设计高斯滤波器, 首先是调制参数的选取和确定。具体调制参数包括带宽 B_b 、码元传输速率 R_b (与码元宽度 T_b 相关)、采样速率 f_s (决定了每个码元的采样点数)、高斯滤波器的截短长度 N 等。设码元传输速率 $R_b = 16 \text{ kbit/s}$, 采样率 $f_s = 50R_b$ (即每个码元采样 50 个点), $B_b \times T_b = 0.3$ 。选取 $5T_b$ 的高

斯截短波形,每 T_b 采样 50 点(每个样点用 16 位的二进制数表示),则产生 250 点高斯滤波器系数的 Matlab 代码如下:

```
Rb = 16000; % 码元传输速率
Tb = 1/16000; % 码元宽度
sample_number = 50; % 单个码元采样点数
fs = sample_number * Rb; % 采样率
Bb = 0.3/Tb; % 滤波器 3 dB 带宽
t = -2.49 * Tb : Tb/50 : 2.49 * Tb; % 5 Tb 宽度截短
coef = normcdf(2 * pi * Bb / (sqrt(0.69315)) * (t + Tb/2)) - normcdf(2 * pi * Bb / (sqrt(0.69315)) * (t - Tb/2));
norm_coef = coef/50; % 归一化处理
coef = dec2hex(round(2^16 * norm_coef)); % 16 进制表示
```

设 tpr0、tpr1、tprg2、tprg3、tprg4 为串行存储的连续 5 个码元,coef0、coef1、coef2、coef3、coef4 对应按区间分为五段的高斯滤波器系数,先对输入码元数据进行串行存储,然后根据连续的 5 个码元取值进行相应滤波器系数的叠加运算,即完成高斯滤波功能。实现高斯滤波器电路的 Verilog 代码如下:

```
reg tpr0, tpr1, tprg2, tprg3, tprg4;
always @ (posedge clk_16k or posedge rst)
if (rst)
begin
tprg0 <= 0; tprg1 <= 0; tprg2 <= 0; tprg3 <= 0;
tprg4 <= 0;
end
else
begin
tpr0 <= data_in; tpr1 <= tpr0; tpr2 <= tpr1; tpr3 <= tpr2; tpr4 <= tpr3;
end
reg signed [17:0] gauss_phase;
always @ (rst or tpr0 or tpr1 or tpr2 or tpr3 or tpr4 or coef0 or coef1 or coef2 or coef3 or coef4)
if (rst)
gauss_phase <= 18'b0;
else
begin
case( {tpr4, tpr3, tpr2, tpr1, tpr0} )
5'b00000: gauss_phase <= -coef4 - coef3 - coef2 - coef1 - coef0;
5'b00001: gauss_phase <= -coef4 - coef3 - coef2 - coef1 + coef0;
.....
5'b11110: gauss_phase <= coef4 + coef3 + coef2 + coef1 - coef0;
```

```
5'b11111: gauss_phase <= coef4 + coef3 + coef2 + coef1 + coef0;
default: gauss_phase <= 18'b0;
endcase
endcase
end
```

4 GMSK 调制器实现和仿真

在 Altera 公司的 CycloneII EP2C50F484I8 器件上实现了该调制器,并通过采用厂家提供的 CORDIC 模块求取正余弦值,得到正交两路信号,完成 GMSK 正交调制输出。该电路综合后只占 EP2C50F484I8 器件资源的 3%。在调制器电路和 Matlab 模块输入相同序列的情况下,它们的 I 路及 Q 路输出波形分别如图 3 和图 4 所示,该调制器电路仿真和 Matlab 的理论结果是吻合的,从而验证了我们设计的正确性。

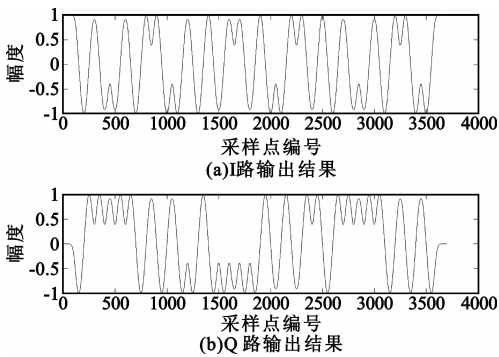


图 3 调制器 Matlab 仿真的 I 路/Q 路输出波形
Fig.3 The I/Q output waveforms of modulator by Matlab simulation

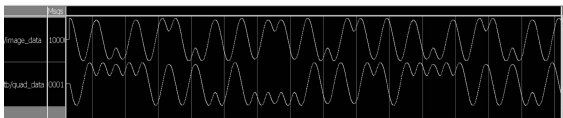


图 4 调制器电路 Modelsim 仿真的 I 路/Q 路输出波形
Fig.3 The I/Q output waveform of modulator circuit by Modelsim simulation

5 结 论

基于查表法实现高斯滤波器的优点在于通过表的设计可以灵活产生具有任何特性的基带输出波形,同时还可以通过调整 CORDIC 电路的迭代次数和中间数据宽度来获得不同精度的 I、Q 两路正交调制信号输出,从而使该 GMSK 调制器电路具有精度可调、应用灵活等特点,已成功应用于数字中频收发信机。

参考文献:

- [1] Kazuaki Mupota. GMSK Modulation for Digital Mobile Radio Telephony[J]. IEEE Transactions on Communications, 1981, 29(7):1044 - 1050.
- [2] Souissi M G, Grati K, Ghazel A, et al. Software efficient implementation of GMSK modem for an automatic identification system transceiver[C]//Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Niagara Falls, ON, Canada: IEEE, 2008: 601 - 606.
- [3] 杨雪丽, 郑碧月, 朱广良. GMSK 调制信号的仿真[J]. 信息技术, 2004, 28(3): 13 - 15.
YANG Xue-li, ZHENG Bi-yue, ZHU Guang-liang. The simulation of GMSK modulation signal[J]. Information Technology, 2004, 28(3): 13 - 15. (in Chinese)
- [4] 庞沁华, 李卫东, 黄宇红. 数字移动通信高斯最小移频键控调制器[J]. 北京邮电大学学报, 1994(4): 20 - 25.
PANG Qin-hua, LI Wei-hong, HUANG Yu-hong. GMSK modulator in digital mobile communication[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 1994 (4): 20 - 25. (in Chinese)

作者简介:

李汉桥(1955 -), 男, 湖北武汉人, 现为武汉软件工程职业学院软件工程系教师、高级工程师, 主要研究方向为计算机应用技术;

LI Han-qiao was born in Wuhan, Hubei Province, in 1955. He is now a lecturer and also a senior engineer in Department of Software & Engineering, Wuhan Vocational College of Software and Engineering. His research concerns computer applications technology.

Email: 1106477661@qq.com

陈海腾(1988 -), 男, 江苏盐城人, 2010 年获南京信息工程大学学士学位, 现为中国地质大学机械与电子信息学院硕士研究生, 主要研究方向为无线通信、数字中频及软件无线电研究;

CHEN Hai-teng was born in Yancheng, Jiangsu Province, in 1988. He received the B.S. degree from Nanjing University of Information Science and Technology in 2010. He is now a graduate student. His research concerns wireless communication, digital IF and software defined radio(SDR).

Email: haitonchen@gmail.com

姚亚峰(1970 -), 男, 湖北黄梅人, 1992 年获华中师范大学学士学位, 2000 年获南京理工大学硕士学位; 2004 年获华中科技大学博士学位, 现为中国地质大学机械与电子信息学院副教授, 主要从事无线通信及 LTE 关键技术等方面的研究。

YAO Ya-feng was born in Huangmei, Hubei Province, in 1970. He received the B.S. degree from Huazhong Normal University, the M.S. degree from Nanjing University of Science and Technology, the Ph.D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1992, 2000 and 2004, respectively. He is now an associate professor. His research concerns wireless communication, key technology of LTE.

Email: yao_yafeng@sohu.com

《电讯技术》征稿的新要求

为了促进本刊的国际化进程, 进一步扩大影响力, 为广大科技人员搭建更高层次的学术研究和学术交流平台, 现对来稿作如下几点新的要求:

- (1) 来稿中的图题、表题应给出对应的英文翻译;
- (2) 中文参考文献采用双语著录;
- (3) 属于基金项目的来稿应给出项目的英文翻译, 可参见本刊网站提供的下载文档(各类基金资助中英文名称参考);
- (4) 提供作者简介的英文翻译, 其中应包括作者的出生年、籍贯、何时获得学位、研究方向等内容, 可参见 IEEE 系列刊物作者简介的翻译;
- (5) 欢迎具有高级职称或博士(含研究生)作者将原创性的研究成果直接以全英文论文投稿, 应注意语言流畅, 专业术语准确, 符合科技英语表达习惯, 并附上中文标题、单位、摘要和关键词, 以及中文作者简介;
- (6) 为了保证出版的及时性, 作者不得在自校阶段对稿件作大幅修改, 否则, 将按新投稿件处理, 编辑部保留追究由此造成的一切损失的权利。

更多信息请浏览本刊网站: www.teleonline.cn。

《电讯技术》编辑部