

串行直扩 MSK 调制信号产生及 FPGA 实现

张家庆, 袁小琦, 朱唯唯, 谢仁宏

(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 鉴于常规并行直扩 MSK 调制器的硬件实现占用资源较大且在高数率场所实现困难, 研究了一种直扩 MSK 信号串行产生方法, 并通过硬件实现证实了该方法的可行性和优越性。串行产生方式是将直扩 BPSK 信号经过转换滤波器作用后得到直扩 MSK 信号, 算法核心在于转换滤波器的设计, 具体方法为采用凸优化算法设计出的滤波器具有较小的阶数, 使得硬件实现占用资源较少。结果表明, 在低速率条件下两者输出的直扩 MSK 信号性能一致, 而串行方式硬件复杂度小得多; 在高速率条件下并行方式实现困难, 而串行方式能更好地适用于高速率的直扩系统。

关键词: 串行调制; 直扩 MSK; FPGA; 凸优化; 转换滤波器

中图分类号: TN914.42 **文献标识码:** A

Generation method of serial MSK DSSS modulation and FPGA implementation

ZHANG Jia-qing, YUAN Xiao-qi, ZHU Wei-wei, XIE Ren-hong

(School of Electronic and Optical Engineering, NJUST, Nanjing 210094, China)

Abstract: The resource of direct sequence spread spectrum (DSSS) MSK signal on the hardware system is very big, which uses conventional parallel generation method, and DSSS MSK signal is hard to be implemented in high rate system. Thus, a serial of DSSS MSK signal generation method was studied on, it confirms the feasibility and superiority of this method through the hardware implementation. The serial DSSS MSK signal was formed by putting the spread spectrum BPSK signal into a transformed filter. Thus, building an appropriate transformed filter (TF) became the crux of algorithm. A method of convex optimization was used to build TF, and the filter of this method has smaller order and is less resource consumed. The results showed that the output properties of the two MSK signal were the same under the condition of the low rate, but the hardware complexity of serial signal was much less. The parallel MSK signal has more implementation difficulties under the condition of high speed, but the serial mode can be better applicable to the high rate of spread spectrum system.

Key words: serial modulation; DSSS MSK; FPGA; convex optimization; transformed filter

0 引言

扩频通信即扩展频谱通信, 与传统的通信方式相比, 具有低截获性、多用户随机选址能力、抗干扰性等优点。MSK 调制信号具有包络恒定、频谱利用率高、能量集中、旁瓣衰减快、带外辐射功率低、对非线性失真不敏感等优点。直扩 MSK 通信体制兼具上述两者的优点, 在很多保密通信要求较高的系统

(军用通信) 中得到了广泛应用。

直扩 MSK 信号产生的方法有常规正交通道法^[1]、利用声表器件的 PSK 转换法和冲激法^[2]等。

收稿日期: 2016-05-10

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (SJZZ15_0049)

作者简介: 张家庆 (1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为 FPGA 设计、数字信号处理。

如常规的方法采用正交并行双通道结构,将扩频后的数据分别做基带成型、正交调制、合成后输出。该算法必须保证两路正交信号的严格同步,在高速率通信系统中不能保证误码率,且这种调制方式实现较为复杂,不能用于高速率场合。

为了适应高速率系统,Amoroso F、Kivett J 等人在 1977 年提出了一种串行 MSK 产生方法^[3],即将 BPSK 调制信号通过转化滤波器后得到 MSK 调制信号。直扩 MSK 串行产生方法的设计核心是转换滤波器的设计,滤波器的设计好坏直接影响信号输出。文献[4]中分别用巴特沃兹逼近,切比雪夫 2 型滤逼近和最小二乘 FIR 滤波器逼近设计了转

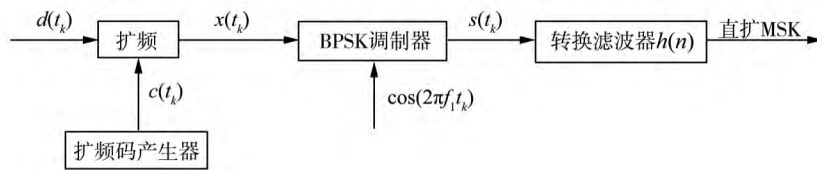


图1 串行直扩 MSK 信号调制器

换滤波器,但逼近效果一般。文献[5]中设计了一种专用的复解析带通滤波器,降低了算法的复杂程度。本文提出了一种基于凸优化的数字转换滤波器设计方法,用软件仿真分析了该方法的性能,并通过 FPGA 实现了数字域串行直扩 MSK 调制信号的产生。

1 串行直扩 MSK 信号产生原理

串行直扩 MSK 信号调制结构图如图 1 所示,主要包括扩频、BPSK 调制、转换滤波器等模块。可以看出,与传统的并行直扩 MSK 信号调制器相比,串行直扩 MSK 信号调制器组成结构十分简单。

基带信号 $d(t_k)$ 与伪随机序列 $c(t_k)$ 作用实现扩频,其中扩频码产生器的输出为 gold 码序列;通过扩频后的输出信号送入 BPSK 调制器,与 $\cos(2\pi f_1 t_k)$ 相乘得到 BPSK 已调信号 $s(t_k)$ ^[6]。

$$s(t_k) = x(t_k) \cdot \cos(2\pi f_1 t_k) \quad (1)$$

其中,BPSK 调制器的载波频率为 $f_1 = f_0 - 1/(4T_c)$, f_0 为直扩 MSK 调制信号中心频率, T_c 为扩频码码片宽度。

BPSK 已调信号 $s(t_k)$ 经转换滤波器作用后,输出为直扩 MSK 信号。转换滤波器的冲激响应为:

$$h(t) = \begin{cases} \sin(2\pi f_2 t) & 0 < t < T_c \\ 0 & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $f_2 = f_0 + 1/(4T_c)$ 。直扩 MSK 信号的中心频率满足式(3)的条件。

$$\begin{cases} f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2} \\ |f_1 - f_2| = \frac{1}{2T_c} \end{cases} \quad (3)$$

将 BPSK 信号通过转换滤波器后产生的信号为 MSK 信号的串行法证明在文献[7]中已有叙述,这里不再赘述。

2 转换滤波器设计及仿真

用串行法产生直扩 MSK 信号的核心内容是转换滤波器的设计。滤波器的选取直接影响得到的直扩 MSK 信号性能。本文中采用了凸优化算法^[8]对滤波器的冲激响应进行逼近。

凸优化算法是一种全局优化算法。其解没有固定的表达式,但在实际应用中,有很多有效的算法能求解凸优化问题,如内点法等。现在,利用计算机可以轻松解决包含成百上千个约束的凸优化问题,而且耗时较短。虽然很多优化问题不是凸优化问题,但可以通过替换变量转换为凸优化问题。

凸优化问题的一般形式为:

$$\begin{aligned} \min f_0(x) \\ \text{subject to } Ax = b, \\ f_i(x) \leq 0 \quad i = 1, 2, \dots, m, \\ g_i(x, \mu) \leq 0 \quad \mu \in [0, \pi] \quad i = 1, \dots, p \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $x \in R^k$ 是优化变量, $f_0, \dots, f_m: R^k \rightarrow R$ 是凸函数,对于每一个 $w \in [0, \pi]$, $g_i(x, \mu)$ 是关于 x 的凸函数。 $Ax = b$ 为等式约束; $f_i(x) \leq 0$ 为一般不等式约束; $g_i(x, \mu) \leq 0$ 为半无限不等式约束。另外,如果目标函数 f_0 等于 0,则式(1)表示的问题可简化为检测约束条件的可行性问题。

转换滤波器的理想冲激响应如式(2)所示,傅里叶变换之后得到其传输函数为:

$$D(f) = \frac{\sin \pi T_c \left(f - f_0 - \frac{1}{4T_c} \right)}{\pi \left(f - f_0 - \frac{1}{4T_c} \right)} \quad (5)$$

其中, f_0 为载波频率, T_c 为扩频码周期。

对于上述特性的转换滤波器通常用 FIR 滤波器实现,可以用凸优化算法来设计逼近 $D(f)$ 的 FIR 滤波器系数。这里采用切比雪夫逼近法,切比雪夫

逼近法的基本思想,是使所设计的 FIR 滤波器的幅频特性与原滤波器的幅频特性误差最小。转换滤波器系数的设计可以转换为凸优化问题:

$$\min \left| \sum_{n=1}^N e^{-j2\pi f/f_0} \cdot h(n) - D(f) \right| \quad (6)$$

使用凸优化工具箱对式(6)进行优化,得到 $h(n)$ 的全局最优解。

通过切比雪夫逼近的凸优化算法设计出的滤波器优势明显,在保证滤波器的幅频特性误差的同时,可以将阶数做到很小,且仍能保证滤波器的相位响应为线性的。滤波器阶数很小也减少了硬件实现占用资源。与传统的滤波器设计方法相比,该方法的优点在于,可以根据确知的传输函数设计滤波器,使得设计出的滤波器传输函数满足设计要求,这一点打破了滤波器设计的传统禁锢。用凸优化算法设计的滤波器与原滤波器频率响应对比如图2所示,结果基本一致。

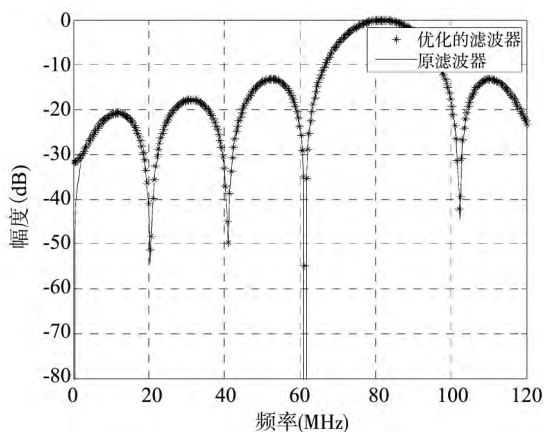


图2 优化所得滤波器及原滤波器的频率响应

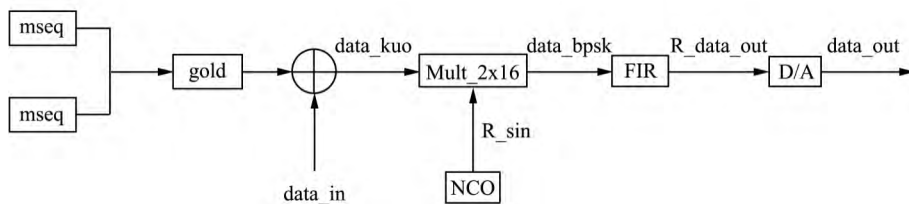


图4 顶层模块框图

后的数据 $data_kuo$ 与 NCO IP 核产生的 7.161MHz 载波信号 R_sin 用乘法器 IP 核相乘得到 BPSK 调制信号 $data_bpsk$ 。然后 BPSK 信号送入数字转换滤波器 FIR IP 核^[7]后输出为中心频率 7.673MHz 的直扩 MSK 调制信号 R_data_out 。最后将直扩 MSK 信号通过 D/A 转换得到模拟输出 dac_data ,分析输出的模拟信号的时域波形和频谱,验证整个系统的正确性。本文主要介绍了串行直扩 MSK 调制信号的产生算法以及在硬件平台上的实现,且与并行实现

设置载波频率 $f_0 = 76.725\text{MHz}$; 扩频码速率 $f_{gold} = 20.46\text{Mchip/s}$; 扩频码周期 $T_c = 1/f_{gold}$; 采样频率 $f_s = 12/T_c = 245.52\text{MHz}$; 设计转换滤波器时,在均方误差满足条件的前提下选取合适的滤波器阶数 $M=41$,得到直扩 MSK 调制频谱图如图3所示。

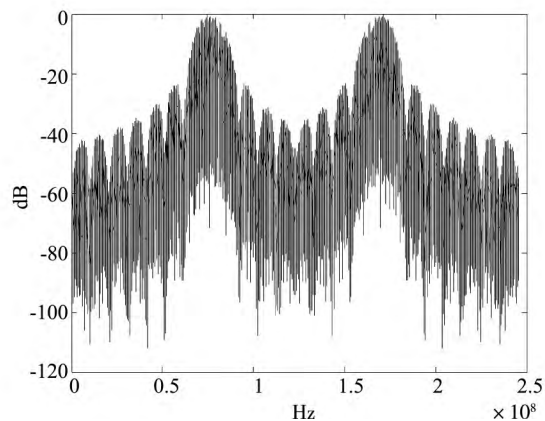


图3 串行直扩 MSK 信号功率谱仿真结果

3 串行直扩 MSK 信号的 FPGA 实现

整个系统采用 ALTERA 公司 QUARTUS II3.1 集成开发环境设计。硬件电路主要包括 EP3SE110F1152I4 的 FPGA 芯片和 AD9736 的 D/A 芯片。外部输入 900MHz 工作时钟给 D/A 芯片,芯片的输出时钟通过锁相环得到系统工作时钟。整体设计框图如图4所示。

①串行 MSK 信号产生的 FPGA 逻辑设计采用上述仿真算法,系统工作频率为 24.552MHz ,输入数据以 2kbit/s 的速率输入系统,与 2.046Mbit/s 的 gold 序列异或实现扩频作用。扩频数据双极性变化

方式相比的优势,所以对并行实现方式 FPGA 设计部分不做详细介绍。

对于直扩 MSK 调制信号,理论主瓣宽度为 $B = 2 \times 0.75/T_c = 3.069\text{MHz}$ 。主副瓣比约为 -22dB 。将串行方式产生的信号与传统并行方式输出信号用频谱仪分析结果,分别对比两种方式占用的系统资源和输出信号频谱。频谱仪显示如图5所示。从图中读出,对于串行方式 $B = 3.06\text{MHz}$,主副瓣比为 -21dB ;对于并行方式 $B = 3.06\text{MHz}$,主副瓣比

为 -22dB。

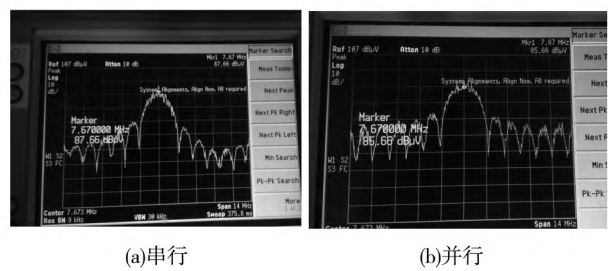


图 5 串行和并行产生的直扩 MSK 信号频谱

两种方式硬件资源占用情况如表 1 所示。结果表明,两种方式产生的信号频谱与理论信号基本一致,只是并行调制方式比串行占用了更多的硬件资源,特别是存储器和 DSP 资源。

表 1 串行和并行产生方式占用硬件资源对比表

	串行	并行
总引脚	39/744(5%)	39/744(5%)
总查找表	30/42 600(<1%)	0/42 600(0%)
总块存储	1060864	2121728
器位数	/8248320(13%)	/8248320(26%)
总 DSP 模块	2/896(<1%)	12/896(1%)
总锁相环	1/8(13%)	1/8(13%)
总寄存器	4744/85 200(5%)	1 331/85 200(2%)

②将上述实现方法中的系统工作频率放大 10 倍,即系统工作频率为 245.52MHz、直扩 MSK 信号载波频率为 76.725 后,并行调制方式在此硬件平台上不能满足时序要求,实现需要更高配置的硬件平台,因此不能应用于较高工作频率的通信系统中;而串行调制方式依旧能得到正确的直扩 MSK 信号输出,系统 Modelsim 仿真图 6 如图所示。

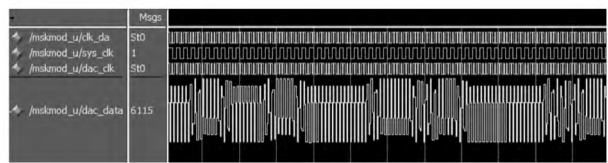


图 6 直扩 MSK 信号的 modelsim 仿真结果

用文件读写的方式将 Modelsim 仿真结果中的直扩 MSK 信号导出,然后用 MATLAB 画出信号功率谱如图 7 所示。图 7 与图 3 对照知两者功率谱基本一致,验证了系统的正确性。再通过频谱仪观察输出信号的频谱如图 8 所示, $B = 30.6\text{MHz}$,主副瓣比为 -21dB;结果也与理论频谱相符。

由于串行调制方式结构简单且占用硬件资源较少,所以能用于一些高速率场合。

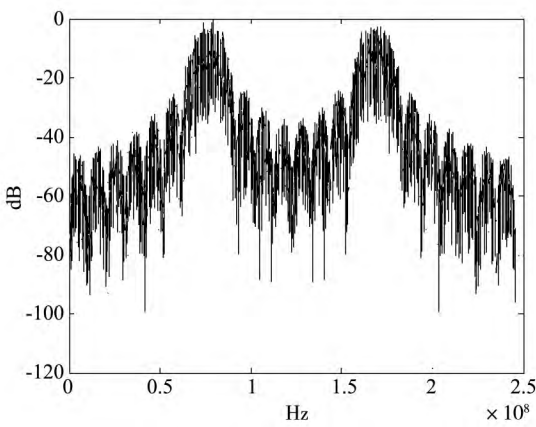


图 7 直扩 MSK 信号 Modelsim 仿真结果的功率谱



图 8 串行产生的直扩 MSK 信号频谱图

4 结束语

本文设计了一种串行直扩 MSK 调制信号的产生方法且在硬件平台上实现,并将串行调制方法与常规的并行产生方法做了对比,阐述了串行直扩 MSK 调制方式在硬件设计的突出优势。串行产生方式的主要设计内容为数字域转换滤波器的设计。本文中的转换滤波器设计采用凸优化算法,以滤波器传输函数为优化对象,逼近已知的传输函数,从而得到所需的滤波器系数。

由于串行产生方式的原理结构简单,且用凸优化算法设计的转换滤波器阶数比常规滤波器小得多,使得这种方式在硬件实现上有很大的优势。不仅能占用更少的系统硬件资源,而且能更好地适应高频率场合。另外,接收端在对串行直扩 MSK 信号解扩解调,是将直扩 MSK 信号通过匹配滤波得到直扩 BPSK 之后再行解调、同步等处理。而直扩 BPSK 的处理算法较为成熟,降低了接收机的开发难度和成本。

参 考 文 献:

[1] 闫涛, 张大鹏, 陶祁. 采用延时积分的 MSK 软判决解调方法[J]. 电讯技术, 2015(3): 275 - 278.
[2] 奚曼, 武建华. PSK 转换法产生直序扩频 MSK 信号研究[J]. 遥测遥控, 2002, 23(1): 16 - 20.
[3] Amoroso F, Kivett J. Simplified MSK Signaling Technique [J]. IEEE Transactions on Communications, 1977, 25(4): 433 - 441.

(下转第 63 页)

以数据库为中心的隐私保护方法是将来研究的趋势。解决轨迹隐私问题更多的取决于基于位置的应用、策略以及所要保护的目标。本文方法是如何为移动目标寻找一个有效地隐私保护与访问控制方法。也就是说,一个索引结构和用户隐私集成在数据库级别上。选择这种方法是因为与先前介绍的方法相比,它具有灵活性好、效率和性能高的特点,而以前的相关工作只关心如何建立一个有效的移动对象索引。一旦有需要,它很容易扩展到其他层次(例如,索引的数据挖掘或应用程序管理)。另外,鉴于目前手机等移动终端的普及,持续研究位置轨迹隐私能够促进基于位置的应用在管理、基于知识决策、服务选择、预测、智能等方面的使用,增强用户的安全感,进一步扩大 LBS 的应用领域和范围。

位置服务的发展,离不开隐私保护技术的保驾护航。设计出能够平衡服务质量和用户敏感信息安全的隐私保护方法,能够促进位置服务的应用与发展。目前,已经出现基于用户位置和轨迹的隐私保护方法,但在理论上还缺乏深入研究,在技术上缺少统一的标准。今后的工作应该关注位置服务质量,以建立与之平衡的隐私保护技术,这样既不影响用户对服务的体验,又有效地保证用户信息的安全。另外,在法律方面,还应建立相应完善的法律体系。

- [1] Chow C Y, Mokbel M F. Enabling Private Continuous Queries for Revealed User Locations [M] // Advances in Spatial and Temporal Databases. Springer Berlin Heidelberg, 2007: 258 – 275.
- [2] Ho J T, Dearman D, Truong K N. Improving users' security choices on home wireless networks. [C] // Proceedings of the Sixth Symposium on Usable Privacy and Security. ACM, 2010: 1 – 12.
- [3] Hao Y, Zhang H, Wang L. Secure Spread-Spectrum Watermark Detection Based on Extended TPM [C] // isdpe. IEEE Computer Society 2007: 350 – 352.
- [4] Beresford A, Stajano R, Stajano F, et al. Location Privacy in Pervasive Computing. IEEE Pervasive Computing [J]. IEEE Pervasive Computing, 2003, 2(1): 46 – 55.

[4] Ren Jing-qiu, Zhang Guang-hua, Wan Qing. Design and Performance Analysis of Transformed Filter in SMSK Spread Spectrum Modulation[C]. IEEE International Conference on Computational Science and Engineering. IEEE Computer Society, 2011: 295 - 301.

[5] 王奎甫, 程菊明, 张向群. 等. 最小频移键控信号的调制解调方法及专用的复解析带通滤波器设计方法: CN1017417-88 A[P]. 2010.

- [6] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理[M]. 北京: 国防大学出版社 2008.
- [7] 郭建蓬, 海磊. 基于 System View 的串行 MSK 调制与解调的仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2008, 36(11): 179-181.
- [8] Stephen Boyd, Lieven Vandenbergh. 凸优化[M]. 北京: 清华大学出版社 2012.
- [9] 刘华东. Altera 系列 FPGA 芯片 IP 核详解[M]. 北京: 电子工业出版社 2014.

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net> 63