

基于 CPLD 的开关电容组式跟踪滤波器设计与实现*

彭永棒, 孙奉娄, 蓝加平, 陈 锟

(中南民族大学 电子信息工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对大动态范围高灵敏度短波接收机射频前端信号处理需要, 提出并实现了一种基于 CPLD 的开关电容组式跟踪滤波器与变容二极管电调谐滤波器串联方案, 并对该滤波器性能进行了评估。实验结果表明, 该滤波器可以工作于 1 MHz~30 MHz 频段, 带宽易调, 设计简单, 且具有稳定的带宽和很高的温度稳定性。实测的滤波器 3 dB 带宽为 300 kHz~700 kHz, Q 值为 11.8 dB~25 dB, 通带增益为 2.5~4.5, 能很好地满足接收机设计指标。

关键词: CPLD; 开关式电容; 跟踪滤波; 短波

中图分类号: TN911.72

文献标识码: B

文章编号: 1674-7720(2013)03-0019-04

Design and implementation of the switch-capacitor-group-style tracking filter based on CPLD

Peng Yongbang, Sun Fenglou, Lan Jiaping, Chen Kun

(College of Electronics and Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the RF front-end needs of the large dynamic range and high sensitivity shortwave receiver, this paper proposes a design method of the switch-capacitor-group-style tracking filter based on CPLD and the varactor electric tuned filter in series. Then it makes a performance evaluation of the tracking filter. The experimental results indicate that the tracking filter can work well on the frequency band between 1 MHz to 30 MHz. The experiment also shows that the design provides a stable bandwidth and higher temperature stability. The observed data of the filter shows that the 3 dB bandwidth is 300 kHz to 700 kHz, with high Q value of 11.8 dB to 25 dB, and the passband gain is 2.5 to 4.5. The experimental results can meet the design indicators of the receiver very well.

Key words: CPLD; switch-capacitor-group-style; tracking filter; shortwave

跟踪滤波器^[1]指滤波器的中心频率能自动地跟随信号频率变化,从而达到在强噪声干扰中提取有用信号的带通滤波器。它主要应用于振动监测和控制、扫频或跳频雷达接收机、数字电视接收机、水声信号处理等领域^[2-4]。

目前,跟踪滤波器的设计主要有开关电容跟踪滤波器^[5-6]、自适应跟踪滤波器^[7]和变容二极管电调谐 LC 谐振跟踪滤波器^[8]等。开关电容滤波器主要工作于音频范围内,从几赫兹到数百千赫兹。自适应跟踪滤波算法复杂,多用数字信号处理算法,不适合于模拟信号的跟踪滤波,且信号处理速度慢,不能满足实时性要求。变容二极管电调谐 LC 谐振跟踪滤波器工作频率高,速度快,电

路由纯硬件搭建,主要缺点是受温度影响很大,中心频率可能出现漂移,因此不宜作窄带滤波,可用于对环境温度要求不高的宽带滤波。还有一些特殊用途的跟踪滤波器,如应用于数字电视等接收机的高频头或调谐器^[9]等,这类跟踪滤波器面向专门的应用,不具备短波、窄带和通用的特性。

现在应用于高频信号的窄带跟踪滤波器鲜有好的解决方案,特别是像快速跳频通信^[10]对保密性的要求很高,要求跟踪滤波器能够快速准确地实现频率跟踪,这都不是上述几种滤波器能够实现的。目前适合短波频段的专用跟踪滤波器很少,针对这种情况,本文将设计并实现了工作于 1 MHz~30 MHz 频段的基于开关式电容组的跟踪滤波器。

* 基金项目: 国家自然科学基金仪器专项(41127003); 湖北省自然科学基金重点项目(2010CDA062); 国家科技基础性专项重点项目(2008FY120100)

1 滤波器设计方案

考虑到开关电容组跟踪滤波器的特性和器件选择,本文采用开关式电容组滤波器与变容二极管电调谐串联组合的设计方案,系统框图如图1所示。

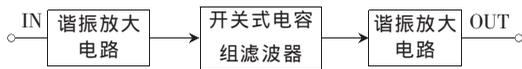


图1 系统框图

1.1 开关式电容组滤波器

本开关式电容组滤波器原理^[1]如图2所示。这种滤波器一般工作于低频范围,其温度稳定性好,中心频率和带宽便于调节,很适于跟踪滤波。图2中,单刀 N 掷开关周期性地接通 N 个RC积分器。每个电容被周期性地接入,接入时间为 $1/(N \times f_c)$,其中 N 为电容个数,即开关的掷数, f_c 为开关频率。当输入信号频率和开关频率为整数倍关系时,每个周期接入各电容正好处于输入波形的同一位置,通过RC积分器对电容充电,于是电容被充电到对应输入电压值,从而在每个信号周期保持相同电压值,输出波形为近似于输入波形的阶梯波。这就相当于是对输入信号的 N 倍采样,输出的采样信号仍能保持原始信号波形,如果输入频率不等于开关频率或开关频率的倍频,则电容选入时处于输入信号波形的不定位置,电容上的电压不能保持充电到同样的电压值,此时,电容上的平均电压非常低,从而达到滤波效果。图2所示滤波器的幅频特性示意图如图3所示。其为一个以 f_c 为基频的梳状滤波器, f_c 的倍频点同样能通过信号。

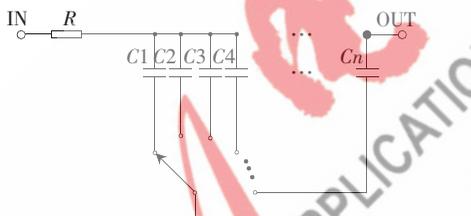


图2 开关式电容组滤波器原理图

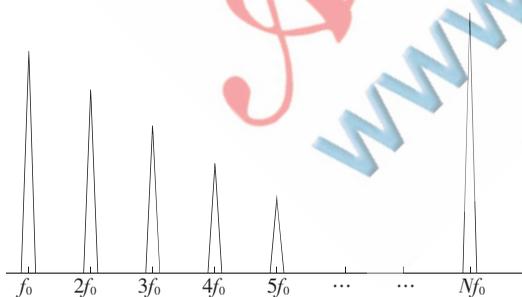


图3 开关式电容组滤波器幅频特性示意图

为了实现短波雷达接收机模拟前端的滤波,本文设计了一个可以工作于短波范围的带通滤波器,利用CPLD OD输出的高阻特性和CPLD的高速开关能力,用CPLD作为单刀 N 掷开关来控制电容组,周期性地接通 N 个RC积分器来实现高频滤波器的设计。

该滤波器中电容和电阻的温度稳定性极强,因此其

带通特性基本不受温度影响,且参数设计简单。

1.2 宽带谐振放大电路

跟踪滤波器仅在某一个特定时刻通过对应中心频率的信号,而由图3可以看到开关电容组的梳状滤波特性,因此必须要滤除其余倍频信号,即抑制其谐波。为此,设计了一个基于变容二极管电调谐LC谐振跟踪滤波器的宽带谐振放大电路,将此电容组滤波器置于两个谐振放大电路之间,将谐振放大电路的带宽调节到合适位置,以滤除输入信号中的倍频信号成分。本谐振放大电路不仅具有抑制倍频信号的功能,还能对输入输出信号进行放大。由于电容组滤波器插入损耗较大,且受系统同步开关噪声(SSN)的影响,因此通过前级谐振放大电路对弱信号进行放大,可以提高系统的信噪比。该谐振放大电路的通频带也是可跟踪的,随中心频率同步调节。变容二极管的温度稳定性差,因此不宜设计成窄带跟踪滤波器,这里设计为一个宽带选频跟踪滤波器,用于滤除电容组滤波器的倍频干扰。

2 硬件电路设计

2.1 电容组滤波器设计

要实现30 MHz的中心频率滤波器,如果采用10个电容就必须满足至少300 MHz的开关频率要求。考虑到普通模拟开关的开关速度不高,本文采用CPLD,利用其引脚的三态特性,通过软件设置引脚为低电平(开通)和高阻(关断)状态来作为电容选择开关。由于CPLD漏极开路引脚存在钳位,因此输入信号的电压峰值应在0~3.3 V范围内,需给信号一个合适的静态工作点。本滤波器插入损耗较大,电容组滤波器输出阻抗受负载影响较大,因此增加一级跟随器作为阻抗匹配,提高其带负载能力。图4为电容组滤波器原理图。

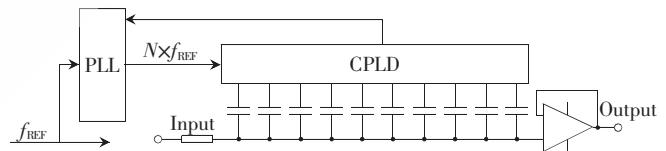


图4 电容组滤波器原理图

本电路中的锁相环通过PC总线配置工作参数,可直接通过CPLD进行配置,提供参考频率的 N 倍频信号作为开关时钟。

2.2 谐振放大电路设计

通过设计谐振放大电路来滤除电容组滤波器中心频率的倍频干扰。通过调节变容二极管反向电压来调节谐振选频电路的中心频率和选频特性。将此选频网络带宽调节到中心频率二倍频以下的合适位置,以起到倍频抑制的作用。谐振放大的另一个作用是对输入信号进行放大以提高信噪比,以适合电容组滤波器的要求。谐振放大电路原理图如图5所示。

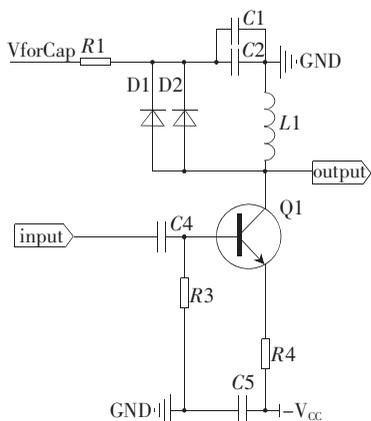


图5 谐振放大电路原理图

跟踪滤波的中心频率设计为从1 MHz~30 MHz变化,低频段的中心频率倍频也在此范围以内,因此,选频网络也必须是可跟踪的。这就要求变容二极管容值可调,可通过调节变容二极管反向电压来实现。采用D/A转换器来实现电压调节,原理图如图6所示,通过CPLD切换变容二极管反向电压值来调节谐振频率。

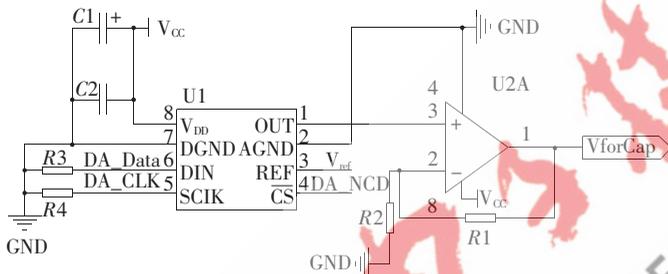


图6 D/A 调压电路原理图

3 实验结果

3.1 滤波器带通参量分析

通过扫频仪对本滤波器的带通特性及其参数进行了分析。图7分别给出了带宽BW与中心频率 f_c 、电容个数 N 、电阻 R 、电容 C 的关系曲线。可以看出,滤波器通频带与中心频率成正比,而与电容个数 N 、电阻值 R 、电容值 C 成反比,即 $BW \propto f_c / (N \times R \times C)$ 。

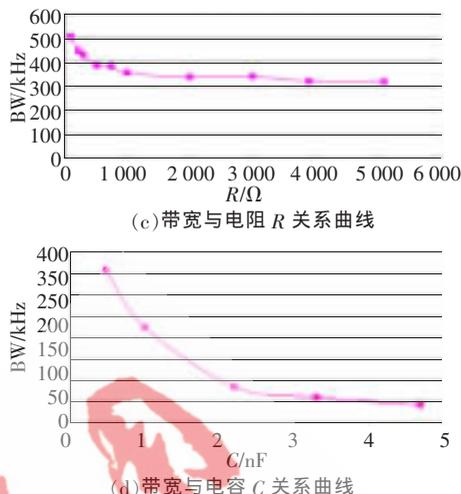
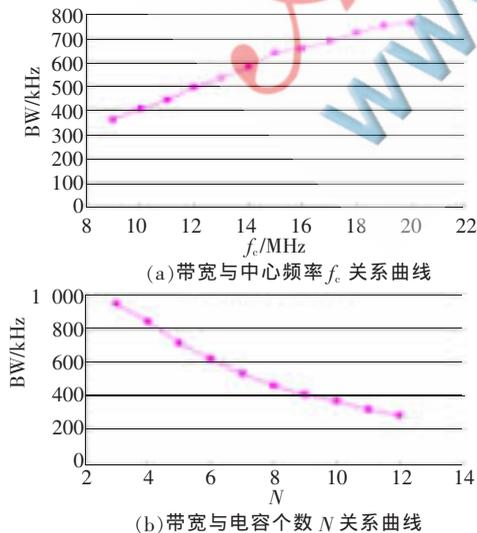


图7 带宽与中心频率 f_c 、电容个数 N 、电阻 R 、电容 C 的关系曲线

3.2 滤波器幅度参量分析

通过扫频仪对本滤波器的幅度特性及其参数进行了分析。输入信号为10 mV时,输出幅值 V_p 与中心频率 f_c 、电容个数 N 、电阻 R 、电容 C 的关系曲线如图8所示。可以看出,滤波器幅度与中心频率成反比,与阻值 R 成负指数关系,而与电容个数 N 、电容容值 C 成正比的变化趋势,即 $V_p \propto (N \times C) / R \times f_c$ 。

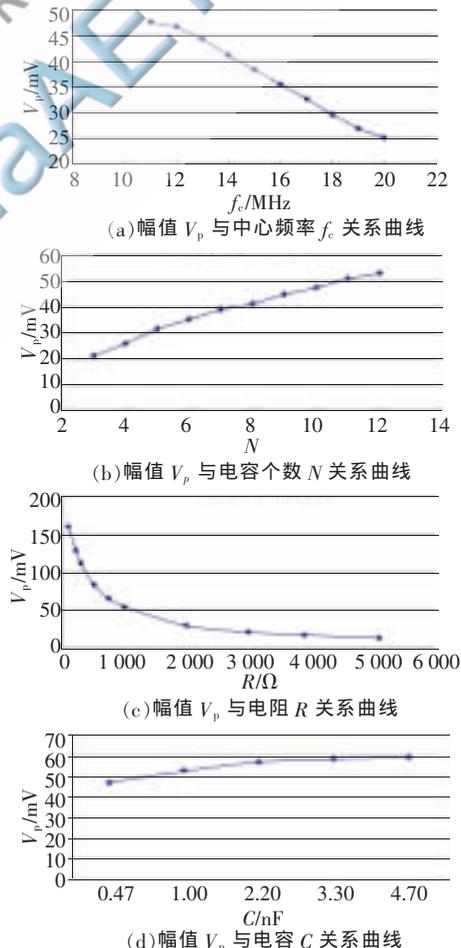


图8 幅值 V_p 与中心频率 f_c 、电容个数 N 、电阻 R 、电容 C 的关系曲线

可以看出,电阻越小,滤波器增益增大得越快。但是通过时域分析可知,随着 R 的减小,信号波形失真也越来越大。因此要综合考虑带通滤波器的各方面性能来选择 R 值。

3.3 滤波器噪声分析

由于CPLD高速开关引入了开关噪声,且噪声存在于带内,与所需的信号处在同一频点,无法去除。因此本滤波器只适于 $100\ \mu\text{V}$ 级以上的信号。图9为输入端接地时频谱仪观测到的系统开关噪声测量结果,其噪声信号大约在 $100\ \mu\text{V}$ 。

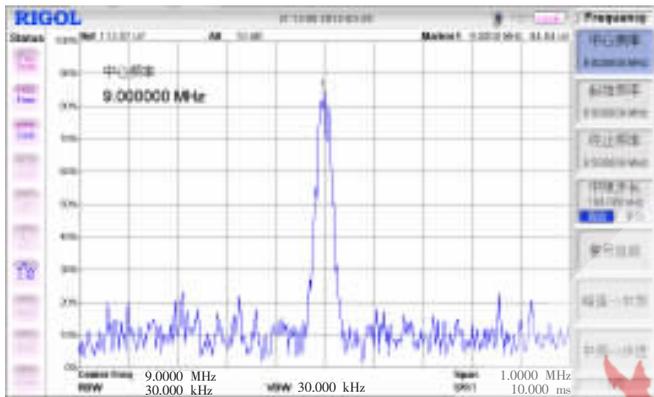


图9 系统开关噪声测量结果

3.4 滤波器实测数据

表1为所设计的跟踪滤波器输入电平 $10\ \text{mV}$ 时, $10\ \text{MHz}\sim 20\ \text{MHz}$ 频段内 $3\ \text{dB}$ 和 $6\ \text{dB}$ 带宽的幅频特性测试数据。

表1 部分频点 $3\ \text{dB}$ 和 $6\ \text{dB}$ 带宽的幅频特性实测结果

频率/MHz	幅值/mV	3 dB 带宽/kHz	6 dB 带宽/kHz
10	47.20	405	676
11	47.50	442	733
12	46.60	495	813
13	44.20	533	879
14	41.00	579	952
15	38.30	638	1 023
16	35.40	654	1 095
17	32.60	685	1 145
18	29.50	720	1 235
19	26.75	749	1 278
20	25.05	761	1 297

品质因数 $Q=f_p/BW_{3\text{dB}}$, Q 值随频率增大而减小。从 $10\ \text{MHz}\sim 20\ \text{MHz}$, Q 值由 25 减小到 11.8 。通带增益 $KP=A_r$,随着频率增高由 4.5 降低到 2.5 。

由于 $BW\propto f_c/(N\times R\times C)$,而 $Q=f_p/BW_{3\text{dB}}$,因此有 $Q\propto 1/N\times R\times C$ 。可见,只要选取合适的参数,就能够得到满足需要的滤波器。由图10可以看到其输入输出波形的对比,通道1为输入信号,通道2为输出信号。

本文提出并实现了基于CPLD的开关电容组跟踪滤波器与变容二极管电调谐滤波器串联方案的设计,通过分析实验数据,得出了带宽 BW 、幅值 A 和 Q 值分别与中心频率 f_c 、电容个数 N 、电阻 R 、电容 C 等参数的关系: $BW\propto f_c/(N\times R\times C)$, $A\propto (N\times C)/R\times f_c$, $Q\propto 1/N\times R\times C$ 。实测的滤波器 $3\ \text{dB}$ 带宽为 $300\ \text{kHz}\sim 700\ \text{kHz}$, Q 值为 $11.8\ \text{dB}\sim 25\ \text{dB}$,通带增益为 $2.5\sim 4.5$ 。测试结果表明本设计能很

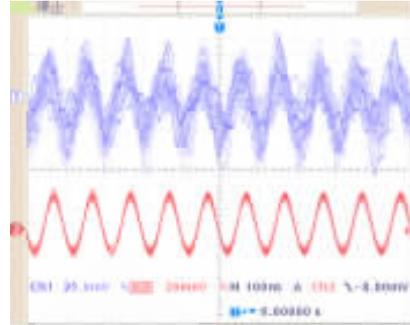


图10 时域滤波效果

好满足接收机的设计指标。

本滤波器的设计方法既可用于低频,也可用于高频。电路设计简单,性能稳定,不受环境温度等因素的影响,能应用于高频模拟前端,处理 $100\ \mu\text{V}$ 级以上信号。但是由于系统开关噪声的影响,对于微小信号滤波效果不是很好,有待于进一步针对开关噪声作深入研究。

参考文献

- [1] 陈照章.跟踪滤波器的设计及其应用[J].仪器仪表学报,2001(3):244-246.
- [2] 陶利民,肖定邦,温熙森.用于动平衡测试的MDAC窄带跟踪滤波器[J].国防科技大学学报,2006(2):102-105.
- [3] 陈新宁.跳频通信侦察技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2006.
- [4] 吕元通.窄带跟踪滤波技术的应用研究及硬件电路实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.
- [5] 庞长涛,张建明,高燕红,等.滚动接触疲劳实验机跟踪滤波器设计[J].航空精密制造技术,2011(1):1-4.
- [6] 殷苏民,吉彬斌,鲍红力,等.基于MAX263的带通跟踪滤波设计[J].电子技术应用,2012,38(1):54-56.
- [7] 郭华.自适应滤波算法及应用研究[D].兰州:西北师范大学,2007.
- [8] GUYETTE A C. Alternative architectures for narrowband varactor-tuned bandpass filters [C]. Microwave Integrated Circuits Conference, EuMIC 2009, 2009:475-478.
- [9] SUN Y, JEONG C, LEE I, et al. A 50-300-MHz low power and high linear active RF tracking filter for digital TV tuner ICs[C]. IEEE Custom Integrated Circuits Conference, 2010:1-4.
- [10] 孙剑川,凌涛.短波战术跳频通信系统的技术现状和发展[J].通信与广播电视,2002(3):1-6.
- [11] 吕广平.集成电路应用500例[M].北京:人民邮电出版社,1983.

(收稿日期:2012-09-05)

作者简介:

彭永棒,男,1988年生,硕士研究生,主要研究方向:信号检测与信息处理。

孙奉葵,男,1957年生,硕士,教授,主要研究方向:低温等离子体和电力电子应用。

蓝加平,男,1979年生,硕士,实验师,主要研究方向:电离层探测设备研发。

《微型机与应用》2013年第32卷第3期