

锁相倍频开关式跟踪滤波器

梅文华 杨天植

提 要 本文提出一种简单的跟踪滤波器电路,该电路可用于多普勒雷达,主要由开关式带通滤波器和锁相环组成。实验结果表明,它具有捕捉范围宽、捕捉时间短和在噪声背景下有令人满意的性能等特点。

一、引 言

在对弹体测速的技术中,多普勒频率跟踪滤波器必须做到:

- i) 跟踪输入信号的频率变化,输出多普勒频率信号;
- ii) 滤去部分输入的噪声,提高输出信噪比;
- iii) 对多普勒信号进行适当倍频,以提高输出终端分辨率亦即提高测速精度。

一般枪炮火箭弹从发射到击中目标整个弹道中速度变化剧烈,且弹体回波面积小,信号微弱,进入到跟踪滤波器的往往是淹没在噪声之中的信号,因此为了准确测量弹体速度,需要解决速度变化范围大(要求带宽宽)与提高信噪比(要求带宽窄)的矛盾。此外还要求捕捉时间短,以便于准确及时推算出初速。

已提出过多种方案,有些已制成产品并正在使用^{[1][2]}。但如何设计一种电路简单、性能优良的跟踪滤波器仍是人们努力的一个目标。这里介绍一种利用开关式带通滤波器及锁相环路而设计的跟踪滤波器。这种电路体现了电路简单、性能优良的特点。本文同时给出实际电路和测试结果。我们称这种电路为锁相倍频开关式跟踪滤波器。

二、锁相倍频开关式跟踪滤波器总体方案

低速空气炮速度约50m/s,高速火炮约1500m/s,对3cm连续波雷达,对应的多普勒频率约3~100KHz。现设计范围为3~120KHz;要求输入信噪比低至1/6时仍能正常锁定跟踪。

如图1是跟踪滤波器基本方框图。带有噪声的信号通过开关式带通滤波器,由于开关式带通滤波器的带宽与中心频率无关,可以做得很窄(相对噪声带宽而言),噪声部

分地被抑制, 再通过放大和低通滤波, 达到一定电平且提高了信噪比的信号推动锁相环工作, 环路锁定后, 输出信噪比更高的倍频信号 Nf (波形为方波), 倍频信号又作为钟脉冲, 控制开关式带通滤波器的中心频率。这样就实现了跟踪滤波, 并保持带宽为一常数。由于输出的是锁定后的高信噪比的倍频信号, 提高了终端的计数精度和分辨率, 亦即提高了测速精度。

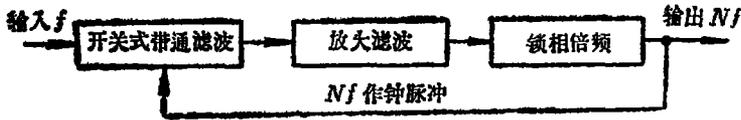


图 1 锁相倍频开关式跟踪滤波器方框图

三、开关式带通滤波器的原理及特性

通过一个开关来逐个地接通 N 个低通滤波器, 可构成一带通滤波器。每个电容被周期地选入, 选入时间是 $1/NF_c$, 其中 N 是开关的掷数, F_c 是开关频率。如果输入频率和开关频率或开关频率的谐波相等, 则每个周期接入每个电容正好是在输入波形的同一位置, 于是电容被充电到输入电压值, 结果输出是一个类似于输入的阶梯波。如果输入频率高于或低于 F_c 和 nF_c , 则电容选入时是处于输入波形的不定位置, 这时电容上的平均电压非常低。这种滤波器称为开关式带通滤波器^[3]。

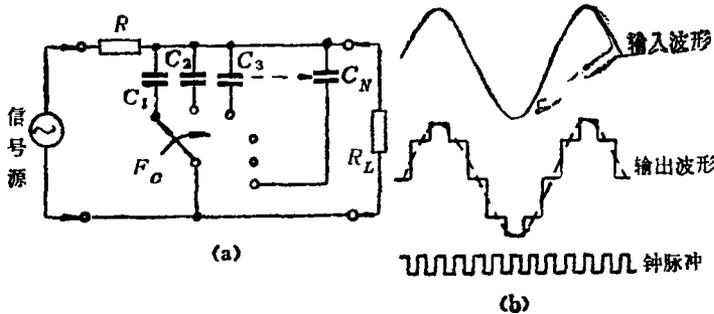


图 2 开关式带通滤波器

现在我们简介一下该滤波器的传递函数。实际上这就是梳形滤波器。设 N 个通路分路网络为单节 RC 低通滤波器, 各有在 $S = -\alpha = -1/RC$ 的一个单极点: $H(s) = \alpha/(S + \alpha)$ 。那么 N 通路滤波器的传递函数可求出^[4]为

$$H_{\Sigma}(S) = A \frac{1 + e^{-ST}}{1 - e^{-(S+\alpha)T}}$$

其中 A 是比例常数, T 为转换周期, 而

$$e^{-\alpha T} = \frac{1 - \frac{(R+R_L)d}{2RR_L C}}{1 + \frac{(R+R_L)d}{2RR_L C}}$$

d 为采样门宽, 亦即开关与每个电容的接触时间。这里有 $T/d = N$ 。

该滤波器的频率响应曲线为

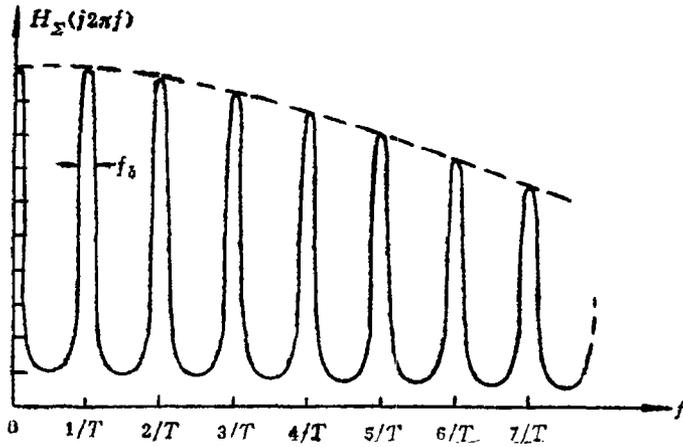


图 3 具有单极点低通分路网络和矩形脉冲调制的梳形滤波器的频率响应。这个曲线图的相关参数为 $\alpha T = 0.2$ 和 $d = 0.05T$

在 α 小时, 梳形滤波器齿带宽大致为

$$B \approx \frac{\alpha}{\pi} \approx \frac{d}{\pi T} \frac{R + R_L}{RR_L C} = \frac{R + R_L}{\pi N R R_L C}$$

开关式带通滤波器有如下几个特性:

- i) 滤波器的中心频率取决于钟脉冲频率, 改变开关频率可方便地改变通带的中心频率;
- ii) 可以工作在十分宽的频率范围;
- iii) 温度稳定性非常好;
- iv) 带宽正比于 $1/NRC$ (不考虑负载 R_L 时, 亦即 $R_L = \infty$ 时), 可以通过改变 N 、 R 、 C 的值来改变, 带宽与中心频率无关。

实验结果证实了以上四个特性。

四、设计实例

图 4 是锁相倍频开关式跟踪滤波器的实验电路。图中 MC14051、CD4024 及 R 、 $C(\times 8)$ 构成开关式带通滤波器。MC14051 是一模拟多路调制器, 由二进制计数器 CD4024 来推动, 钟脉冲频率是八倍于所需的中心频率。相对于其它开关式带通滤波器电路, 此电路所用集成电路少, 较简单; 且开关掷数为 8, 满足要求。取电容 C 值为 0.01μ , 可变电阻 R 可用一电位器以调节带宽, 亦可用阻值不同的电阻进行换档以改变带宽。

图 4 中单片集成锁相环 MC14046 和二进制计数器 CD4024 构成锁相倍频电路。

我们使用 PD II, 相对 PD I 它具有较复杂的受逻辑门所控制的四个边沿触发器和三态输出电路。虽然它的噪声容限没有 PD I 那样高, 但它具有一些优点; 可避免象

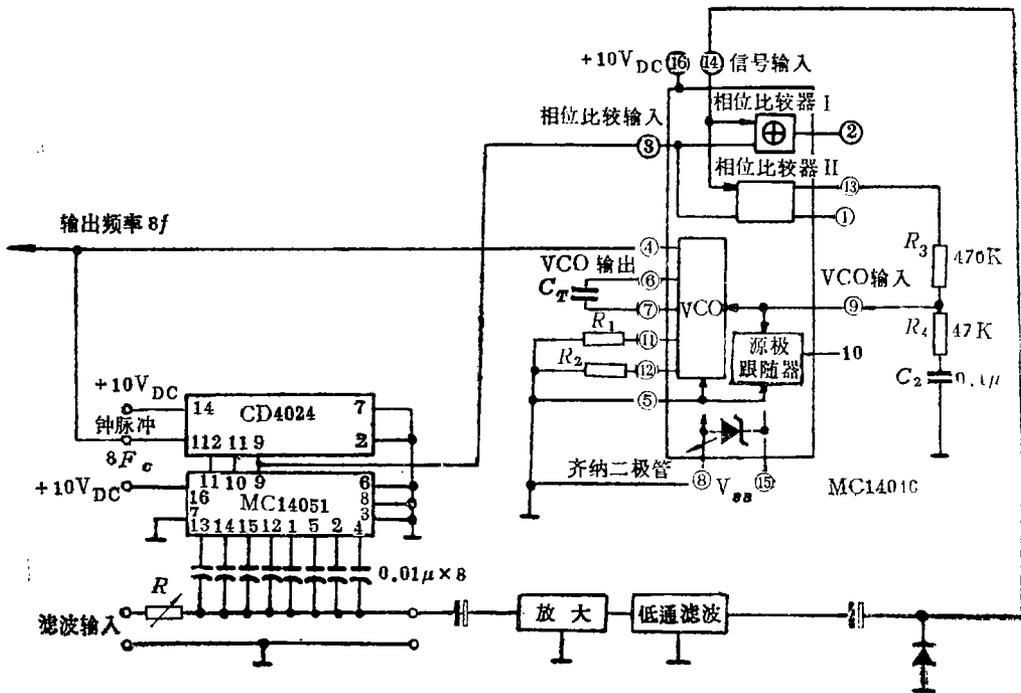


图 4 锁相倍频开关式跟踪滤波器实验电路

PD I 那样锁定在谐波上, 最大跟踪范围与输入信号波形的占空度无关; 使用 PD II 时, 环路捕捉范围与低通滤波器的时间常数无关。一般可以达到捕捉范围等于跟踪范围, 即

$$2f_c = 2f_L$$

使用 MC14046 锁相环时, 要适当选取外接部件。据文献[5]介绍:

$$\text{VCO 最小的输出频率: } f_{\min} = 1/R_2(C_T + 32P)$$

$$\text{VCO 最大的输出频率: } f_{\max} = 1/R_1(C_T + 32P) + 1/R_2(C_T + 32P)$$

通过反复实验, 结果不符合这两式。实验结果是:

$$\text{当 } R_1 = 6.2\text{K} \quad R_2 = 1\text{M} \quad C_T = 100\text{PF} \text{ 时}$$

$$\text{得 } f_{\min} = 23.6\text{KHz} \quad f_{\max} = 960\text{KHz}$$

由此, 对 MC14046 锁相环, 如使用 PD II, 无信号输入时 VCO 调节在最低频率 $f_{\min} = 23.6\text{KHz}$ 上。频率跟踪范围 $2f_L = f_{\max} - f_{\min} \approx 936\text{KHz}$, 频率捕捉范围 $2f_c = 2f_L = 936\text{KHz}$, 信号和比较器间的相位角通常锁定在 0° 。

图 4 中放大滤波使用四级运放, 由两块集成片 FG4558 实现。两级放大增益为 5×5 。两级滤波是巴特沃斯型无限增益多路反馈低通滤波器。现给定载频 120KHz , 增益 $G = 6$, 阶数 $n = 2$, 具体参数设计方法见文献[6]。

五、性能测试及分析

通过实验, 测得开关式带通滤波器滤波性能如图 5(a)、(b) 及表 1 所示; 测得环路

噪声性能如表 2 及图 6 所示, 测得捕捉性能如表 3 所示。

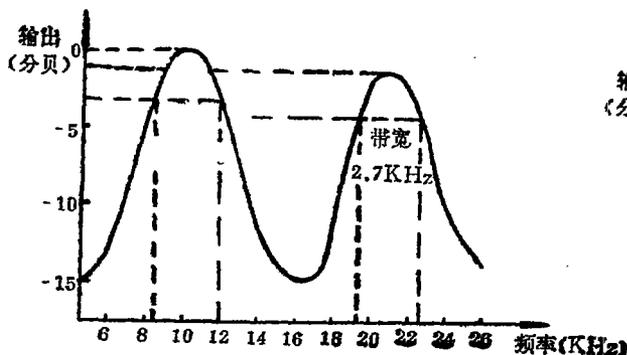


图 5(a) 钟脉冲频率 80KHz
 $R=1K\Omega$ $C=0.01\mu$
 时的频率响应曲线

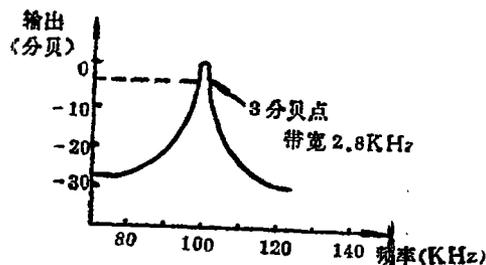


图 5(b) 钟脉冲频率 800KHz
 $R=1K\Omega$, $C=0.01\mu$
 时的频率响应曲线

表 1 开关式带通滤波器带宽与电阻的关系
 ($N=8, C=0.01\mu$ 不变)

R (K Ω)	...	1	2	8	5.1	10	...
BW (KHz)	...	2.7	1.35	0.90	0.53	0.27	...

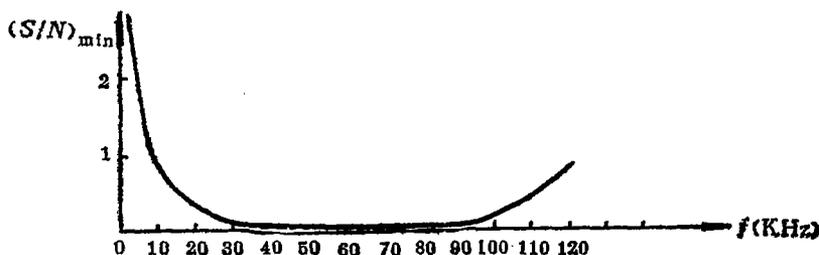


图 6 环路噪声性能: 锁定所需最小输入信噪比

从图 5(a)、(b) 可以看出: 1. 滤波器的中心频率取决于钟脉冲频率, 改变开关频率可方便地改变通带的中心频率; 2. 带宽与中心频率无关; 3. 开关式带通滤波器可工作在十分宽的频率范围; 4. 与开关频率的谐波相等的频率成分, 可通过带通滤波器而不被抑制。

从表 1 可以知道: 带宽正比于 $\frac{1}{NRC}$, 通过改变 N 、 R 、 C 的值来改变。实测值与理论值 $\frac{1}{\pi NRC}$ 基本吻合。

由于开关式带通滤波器的主要器件 MC14051 的温度稳定性很高, 可稳定工作的温度范围为 $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$, 且电阻 R 和电容 C 可选用温度稳定性高的, 故开关式带通滤波器的温度稳定性非常好。

表 2 环路噪声性能测试数据

频率 $f(\text{KHz})$	噪声 $V_N(\text{mV})$	锁定时信号噪声 $V_{SN}(\text{mV})$	失锁时 $V_{SN}(\text{mV})$	环路进入跟踪时 S/N	环路退出跟踪时 S/N
3	9.5	30	17	8.97	2.20
4		29	17	8.32	2.20
5		25	15	5.93	1.49
6		17.5	14.5	2.39	1.33
7		15.5	13.5	1.66	1.02
8		15.0	13.5	1.49	1.02
9		13.5	12.5	1.02	0.731
10		12.5	12	0.731	0.596
20		11	10	0.341	0.108
30		10	10	0.108	0.108
40		10	9.8	0.108	0.064
50		9.8	9.8	0.064	0.064
60		9.8	9.8	0.064	0.064
70		9.8	9.8	0.064	0.064
80		9.8	9.8	0.064	0.064
90		9.8	9.8	0.064	0.064
100		10.5	10	0.222	0.108
110		11	10	0.341	0.108
120	9.5	13	10	0.872	0.108

(R=1K Ω C=0.01 μ 时测得的数据)

表 3 捕获性能：捕捉时间测试结果

f (KHz)	3	4	5	6	7	8	9	10	20	30
R=1K 时 $T_{(ms)}^T$	5.0	5.4	4.9	4.8	4.9	4.8	4.4	4.9	5.7	7.2
R=200 Ω 时 $T_{(ms)}^T$	6.6	4.5	4.6	4.8	4.3	3.1	3.2	2.2	1.6	1.6

f (KHz)	40	50	60	70	80	90	100	110	120
R=1K 时 $T_{(ms)}^T$	7.8	8.1	9.9	11.8	13.9	17.2	19.4	27.5	33~40
R=200 Ω 时 $T_{(ms)}^T$	1.2	2.4	3.4	5.1	7.2	10	16	23~28	25~30

也可看出该系统性能优良, 方案可行: 在某最佳频段上, 锁定所需最小输入信噪比小于 $1/6$, 并且当预置的 VCO 最低频率为 23.6KHz 时, 仍能在 40ms 内捕捉到频率为 120KHz 的信号 (对应锁相倍频 VCO 振荡频率 960KHz)。也就是说, 该系统能捕捉到 3KHz~120KHz 中的任何信号。

假设输入信号带宽为 120KHz, 而 $R=1K$, $C=0.01\mu$ 时开关式带通滤波器的带宽为 2.7KHz, 则开关式带通滤波器信噪比增益为

$$10 \lg \frac{(S/N)_o}{(S/N)_i} = 10 \lg \frac{B_i}{BW} = 10 \lg \frac{120}{2.7} = 16.5 \text{dB}$$

再加上锁相环路的滤波性能, 整个环路的噪声性能是很好的。

纵观整体方案, 这实际上是在一锁相倍频环路前加一级带通特性不变而中心频率随钟脉冲频率变化的开关式带通滤波器。带通滤波器和锁相环都有助于提高信噪比, 锁相环路中的鉴频—鉴相器能减短锁相倍频环路的捕捉时间, 从而缩短整个环路的捕捉时间。因此环路的噪声性能和捕捉性能是良好的。

六、结 语

本文提出了一种跟踪滤波器——锁相倍频开关式跟踪滤波器方案, 通过实验验证, 这种方案是可行的。电路简单、可工作在十分宽的频率范围、捕捉快、噪声性能良好, 是这种环路的特点。

实验环路中还存在一些问题: 如在 30~120KHz 范围内, 增大信号幅度到一定值时反而会失锁, 这有待更深入的探讨。由于时间关系, 未能对环路元器件、参数进行优选, 现对电路优化问题提几个设想:

两级巴特沃斯型无限增益多路反馈低通滤波器中元件参数应尽量逼近设计值, 同时用电位器调节至最佳状态;

在锁相环输入端加一级施密特触发电路以整形, 使输入至锁相环的信号波形为脉冲波形, 而不是梯形波或三角波;

锁相环低通滤波器的时间常数限制了系统跟踪输入信号频率变化的速度, 因此实际应用时考虑弹体速度的变化率, 应通过实验调试到锁相环工作在最佳状态。

一旦电路优化并解决锁定指示等附带性的问题, 这种方案是有其实际应用价值的。

参 考 文 献

- [1] 国防科大四系, 640 测速雷达更新终端技术说明书, 1985.
- [2] 中国人民解放军 59182 部队, 靶场试验技术——国外若干种多普勒测速雷达汇编 (上、下册), 1983.
- [3] 吕广平、徐笑貌编, 集成电路应用 500 例, 人民邮电出版社, 1983.
- [4] [美] 加博 C. 特默斯, 桑吉特 K. 米特纳编, 王志洁译, 现代滤波器理论与设计, 人民邮电出版社, 1984.
- [5] 沈雷, CMOS 锁相环 (上、下), 电子技术应用, No.12, 1982 及 No.1, 1983.
- [6] [美] D.E. 约翰逊, J.L. 希尔伯恩著, 潘秋明译, 有源滤波器的快速实用设计, 人民邮电出版社, 1980.

Tracking Filter with a Switched Bandpass Filter and a PLL

Mei Wenhua Yang Tianzhi

Abstract

This paper presents a simple tracking filter circuit, which is applicable to Doppler radar sets and consists mainly of a switched bandpass filter and a phase-locked loop. Experimental results demonstrate that it is characteristic of wide capture range, short capture time and satisfactory performance under noisy environment.