



相位/比例鉴频综合实验电路的设计与实现

杨光义, 乔昊明, 王舒远, 曹子杰

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 为帮助学生更好地理解频率解调的知识点, 掌握不同的频率解调方案, 设计了一套相位/比例鉴频综合实验电路。利用信号源产生调频波作为电路输入, 通过选择开关实现比例鉴频器和叠加型相位鉴频器的灵活切换, 达到两种电路形式有机结合的目的。通过鉴频功能、鉴频灵敏度以及限幅作用的测试与分析, 深入探讨两种鉴频器的异同, 实现理论和实践的融会贯通。教学实践表明, 该实验效果良好, 适用于本科实验教学、大学生科研和电子设计竞赛等多种场合。

关键词: 调频波; 检波; 鉴频; 相频网络; 实验教学

中图分类号: TN761.2; G642.423

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20220582](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20220582)

Design and Implementation of Phase/Proportional Frequency Discrimination Integrated Experimental Circuit

YANG Guangyi, QIAO Haoming, WANG Shuyuan, CAO Zijie

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to help students better understand the knowledge of frequency demodulation and master different frequency demodulation schemes, a set of phase/proportional frequency discrimination comprehensive experimental circuit is designed. The frequency modulation wave generated by the signal source is used as the circuit input, and the flexible switching between the proportional frequency discriminator and the superimposed phase frequency discriminator is realized through the selection switch, so as to achieve the organic combination of the two circuit forms. Through the test and analysis of the frequency discrimination function, frequency discrimination sensitivity and amplitude limiting function, this paper deeply discusses the similarities and differences between the two frequency discriminators, so as to realize the integration of theory and practice. The teaching practice shows that the experiment has good effect and is suitable for many occasions, such as undergraduate experimental teaching, college students' scientific research and electronic design competition.

Key words: FM wave; detection; frequency discrimination; phase frequency network; experimental teaching

根据内容体系分工, 完整的高频电子线路课程分为基础篇、放大篇、产生篇、变换篇和控制篇。作为整个高频电子线路课程的重难点, 变换篇主要包括频谱线性变换电路和频谱非线性变换电路^[1]。其中, 频谱非线性变换又可细分为调频(相)和鉴频(相)。具体实现而言, 调频波可看成将调制信号积分后的调相波, 调频和调相之间可以相互转换。因此, 在频谱非线性变换章节中, 主要以调频波为主展开讨论。

以频率调制解调为例, 调频电路的作用是产生瞬时角频率按照调制信号规律变化的调频

波; 鉴频电路的作用是将输入信号的瞬时频率变换为相应的解调输出电压。本文将比例鉴频器和相位鉴频器整合在一套实验电路中, 通过开关实现比例鉴频器和相位鉴频器的灵活切换, 实现二者有机结合的目的。通过该实验电路的测试与分析, 可以更直观地展现比例鉴频器和相位鉴频器的联系与区别, 从而加深对这两种电路的理解^[2-3]。

1 原理介绍

根据电路形式的不同, 鉴频电路主要分为斜

收稿日期: 2022-09-26; 修回日期: 2023-04-20

基金项目: 武汉大学教学改革建设项目(2019JG074, 2020JG017); 武汉大学设备处实验技术项目(WHU-2022-SYJS-07)。

作者简介: 杨光义(1983-), 男, 博士, 高级实验师, 主要从事高频电路和图像处理方面的研究。E-mail:

ygy@whu.edu.cn

率鉴频器、相位鉴频器和比例鉴频器。斜率鉴频器通过 LC 谐振回路对调频波的载频适当失谐实现鉴频，结构较为简单，主要缺点是非线性失真严重，因此一般用于要求不高的场合。相位鉴频器分为叠加型和乘积型两类，目的是将调频波变换为调频-调相波，使相位的变化与瞬时频率的变化成正比，然后用相位检波器解调。相位鉴频器输出信号幅度大，缺点是存在寄生调幅，容易引起鉴频失真。比例鉴频器与叠加型相位鉴频器结果相似，又具有自限幅能力，通过牺牲输出幅度换取输出稳定性。本文重点研究叠加型相位鉴频器和比例鉴频器^[4-5]。

1.1 叠加型相位鉴频器

叠加型相位鉴频器原理框图如图 1 所示，先将调频信号 v_{FM} 经过线性相频特性网络，得到调频-调相信号 $v_{PM/FM}$ 。再将调频-调相信号 $v_{PM/FM}$ 和调频信号 v_{FM} 相加，形成调频-调相-调幅波信号 $v_{AM/PM/FM}$ ，然后通过包络检波将原始低频调制信号解调输出，从而达到鉴频的目的。

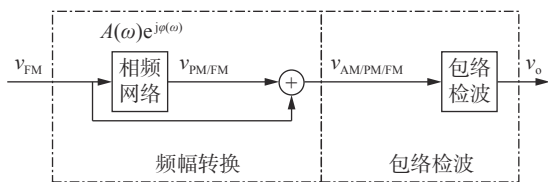


图 1 叠加型相位鉴频器原理框图

图 1 中，在载波频率 ω_c 附近，线性相频特性网络的幅频特性 $A(\omega) = A_0 / \sqrt{1 + \xi^2} \approx A_0$ ，相频特性 $\phi(\omega) = \arctan \xi - \pi/2 \approx \xi - \pi/2$ ， $\xi = k_0 \Delta\omega$ 为广义失谐系数^[6-8]。假设输入调频信号 $v_{FM} = V_{sm} \cos(\omega_c t + m_f \sin \Omega t)$ ，经过线性相频特性网络后，得到的调

频-调相信号为：

$$v_{PM/FM} = A_0 V_{sm} \cos[\omega_c t + m_f \sin \Omega t + \varphi(\omega)] = A_0 V_{sm} \cos[\omega_c t + m_f \sin \Omega t + k_0 \Delta\omega - \pi/2] \quad (1)$$

将调频-调相信号 $v_{PM/FM}$ 与输入信号 v_{FM} 相加，形成调频-调相-调幅波信号：

$$v_{AM/PM/FM} = v_{PM/FM} + v_{FM} = V_{sm} \sqrt{1 + A_0^2} \sqrt{1 + [2A_0 / (1 + A_0^2)] \cos[k_0 \Delta\omega - \pi/2]} \times \cos[\omega_c t + m_f \sin \omega t - \tau] \approx V_{sm} [1 + A_0 \cos[k_0 \Delta\omega - \pi/2]] \times \cos[\omega_c t + m_f \sin \omega t - \tau] = V_{sm} [1 + A_0 \sin k_0 \Delta\omega] \cos[\omega_c t + m_f \sin \omega t - \tau] \quad (2)$$

其中， $\sin \tau = \frac{1 + A_0 \sin \xi}{\sqrt{1 + A_0^2 + 2A_0 \sin \xi}}$ ， $\cos \tau = \frac{A_0 \cos \xi}{\sqrt{1 + A_0^2 + 2A_0 \sin \xi}}$ 。通过包络检波器检波后，得到输出信号为：

$$v_o = k_D V_{sm} [1 + A_0 \sin k_0 \Delta\omega] \quad (3)$$

式中： k_D 为二极管检波增益^[9]。

当 $|k_0 \Delta\omega| \leq \pi/6$ 时，输出信号可近似为：

$$v_o \approx k_D V_{sm} [1 + A_0 k_0 \Delta\omega] = k_D V_{sm} [1 + A_0 k_0 k_f v_\Omega] \quad (4)$$

式中： k_f 为调频灵敏度， v_Ω 为调制信号。

可以看出，叠加型相位鉴频器经过“频幅转换-包络检波”两步信号处理，实现了调频信号到调频-调相-调幅信号再到原始低频调制信号的鉴频目的。实际应用中，为了去掉式(4)中的直流分量，同时提高输出灵敏度，往往采用双回路二极管检波，实现差分输出^[10]。

1.2 比例鉴频器

如图 2 所示，比例鉴频器的频幅转换电路与叠加型相位鉴频器基本相同，主要的改进包括以下 3 个方面。

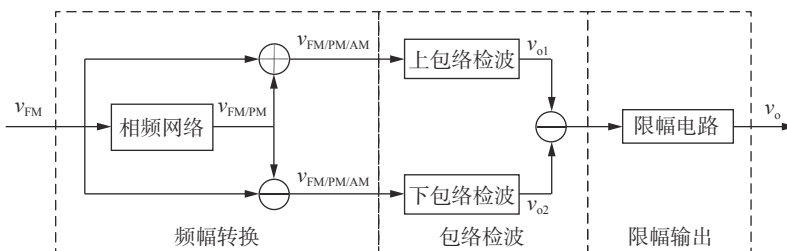


图 2 比例鉴频器结构框图

1) 二极管方向不同

在叠加型相位鉴频器的基础上，改变其中一路检波二极管的极性，使两个检波二极管的方向相反，形成环路顺向，实现上下包络检波。

2) 输出位置不同

叠加型相位鉴频器的输出信号由上下两端的对地输出相减得到，而比例鉴频器的输出信号由最末端中点的对地输出直接得到。

3) 增加限幅电路
比例鉴频器的输出端并接大电容和大电阻,

以抑制寄生调幅干扰。比例鉴频器和叠加型相位鉴频器之间的异同点如表 1 所示。

表 1 比例鉴频器和叠加型相位鉴频器的异同点

| 电路形式 | 不同点 | 相同点 |
|----------|--|-------------------------------------|
| 叠加型相位鉴频器 | 两个检波二极管方向相同 输出信号由上下两端的对地输出相减得到 | 都是将输入的调频波变换为调频-调相-调幅波, 然后利用包络检波实现解调 |
| 比例鉴频器 | 两个检波二极管方向相反 输出信号由最末端中点的对地输出直接得到 输出端并接大电容和大电阻, 以抑制寄生调幅干扰 鉴频输出幅值仅为叠加型相位鉴频器的一半 | |

2 实验电路设计

为了更直观地展现比例鉴频器和相位鉴频器的联系与区别, 将比例鉴频器和叠加型相位鉴频

器(为表述方便, 叠加型相位鉴频器后续简称相位鉴频器)整合在一套实验电路中, 通过选择开关实现两种电路形式的灵活切换, 达到二者有机结合的目的, 具体实验电路如图 3 所示。

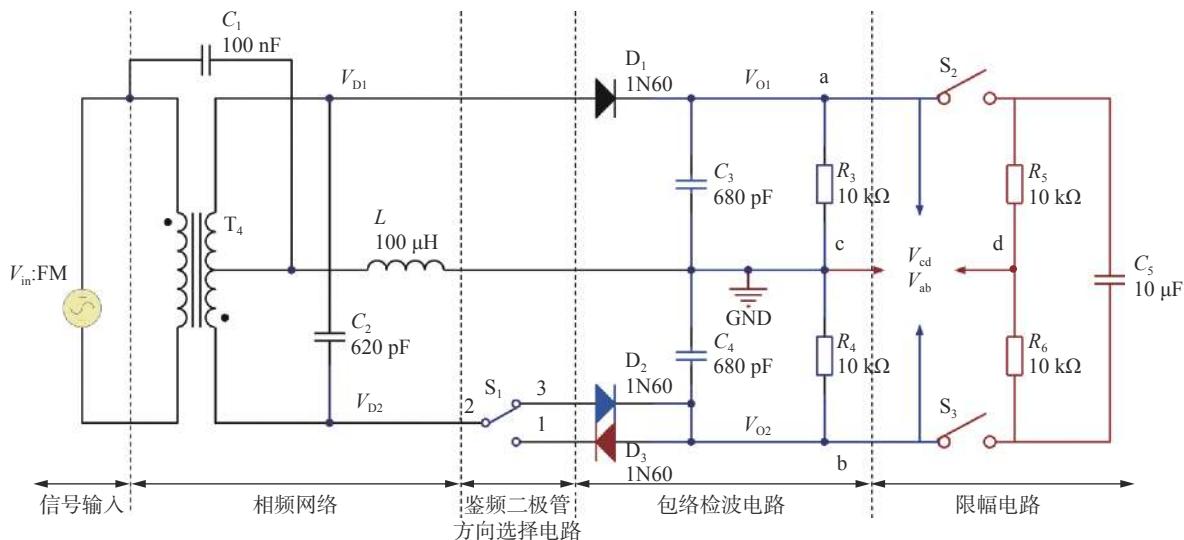


图 3 实验电路图

图 3 主要包括 5 大部分, 分别为信号输入、相频网络、包络检波电路、检波二极管方向选择电路和限幅电路。信号输入由高频信号发生器完成, 相频网络由中周 T_4 和电容 C_2 构成^[11-13], 包络检波电路由检波二极管 D_1 、 D_2 (或 D_3)、电容 C_3 、 C_4 和电阻 R_3 、 R_4 共同组成。检波二极管方向选择电路由单刀双掷开关 S_1 实现, 当开关 S_1 选择“2-3”时, 检波二极管 D_2 连入电路, 当开关 S_1 选择“2-1”时, 检波二极管 D_3 连入电路。限幅电路由电阻 R_5 、 R_6 和电容 C_5 共同组成, 当开关 S_2 和 S_3 闭合时接入电路。

可以看出, 当开关 S_1 选择“2-3”、开关 S_2 和 S_3 断开时, 电路形式为相位鉴频器, 输出信号从 a、b 点之间引出。当开关 S_1 选择“2-1”、开关 S_2 和 S_3 闭合时, 电路形式为比例鉴频器, 输

出信号从 c、d 点之间引出。具体情况汇总如表 2 所示。

表 2 鉴频电路形式选择

| 电路形式 | 开关状态 | | | 电路输出 | 备注 |
|-------|-------|-------|-------|------|----------------------------|
| | S_1 | S_2 | S_3 | | |
| 相位鉴频器 | 2-3 | × | × | a-b | D_1 、 D_2 连入电路, 断开限幅电路 |
| 比例鉴频器 | 2-1 | √ | √ | c-d | D_1 、 D_3 连入电路, 接入限幅电路 |

分析图 3 可知, 相位鉴频器输出电压 $V_{ab} = v_{o1} - v_{o2} = K_d(v_{d1} - v_{d2})$, 其中 K_d 为包络检波系数, v_{d1} 和 v_{d2} 为两路包络检波电路的输出电压。而在比例鉴频器电路中, 虽然加入限幅电路可以抑制寄生调幅, 维持输出电压稳定, 然而, 通过电阻 R_5 和 R_6 的分压 ($R_5, R_6 \gg R_3, R_4$), 最终得到输出电压 $V_{cd} = (v_{o1} -$

$v_{o2})/2 = K_d(v_{d1} - v_{d2})/2$ ，输出幅值仅为相位鉴频器的一半，这可以认为是加入限幅电路的代价^[14-16]。

3 测试与分析

实验电路测试在配备有高频仪器的实验室完成，基本的测试仪器包括：RIGOL 公司生产的高频信号源 DG4162 和直流稳压电源 DP832，Keysight 公司生产的数字示波器 DSOX2022A 和网络分析

仪 E5063A。条件允许的实验室还可以选配频谱分析仪和 LCR 测试仪，以便开展更丰富的测试。

3.1 鉴频功能测试与比较

输入信号设置为调频波，载波频率 $f_c = 6.5 \text{ MHz}$ ，调制波频率 $f_\Omega = 40 \text{ kHz}$ ，频率偏移 $\Delta f_m = 500 \text{ kHz}$ ，峰峰值 $V_{S\text{-}P} = 5 \text{ V}$ 。按照表 2 选择电路形式为叠加型相位鉴频器或比例鉴频器，测试并记录关键点波形，汇总如表 3 所示。

表 3 鉴频电路关键点波形

| 电路形式 | 相位鉴频器 | 比例鉴频器 |
|--------|-------|-------|
| 电路输入 | | |
| 包络检波输入 | | |
| 电路输出 | | |

从表 3 可以看出，两种鉴频器的输入均为调频波，参数保持一致；由式(2)可知，将相频网络输出和输入信号相加后，得到调频-调相-调幅波，这与表 3 中的包络检波输入波形是吻合的；相位鉴频器最终输出为 $V_{abp-p} = 451, f = 40 \text{ kHz}$ 的低频正弦波，比例鉴频器最终输出为 $V_{cdp-p} = 239, f = 40 \text{ kHz}$ 的低频正弦波，可见两种鉴频器都成功实现

了解调，并且比例鉴频器的输出峰峰值约为相位鉴频器的一半。

3.2 鉴频灵敏度测试与分析

保持载波频率 $f_c = 6.5 \text{ MHz}$ 、调制波频率 $f_\Omega = 40 \text{ kHz}$ ，改变频率偏移 Δf_m ，分别观察相位鉴频器和比例鉴频器的输出波形，记录输出波形峰峰值，如表 4 所示。根据表 4 绘制相应的鉴频特性

曲线, 如图4所示。从图中可以看出, 相位鉴频器的鉴频灵敏度为1.03 mV/kHz, 比例鉴频器的鉴

频灵敏度为0.36 mV/kHz, 再次验证相位鉴频器的鉴频灵敏度高于比例鉴频器^[14]。

表4 相位鉴频器比例鉴频器线性范围对比表

| 序号 | 频率偏移 $\Delta f/\text{kHz}$ | 输出 | | 序号 | 频率偏移 $\Delta f/\text{kHz}$ | 输出 | |
|----|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| | | 相位鉴频器 V_{abp-p}/mV | 比例鉴频器 V_{cdp-p}/mV | | | 相位鉴频器 V_{abp-p}/mV | 比例鉴频器 V_{cdp-p}/mV |
| 1 | 1 | 0 | 0 | 7 | 500 | 581.25 | 193.80 |
| 2 | 10 | 10.92 | 1.88 | 8 | 800 | 297.60 | 875.00 |
| 3 | 50 | 56.34 | 20.75 | 9 | 1000 | 934.75 | 367.20 |
| 4 | 70 | 81.12 | 27.30 | 10 | 1200 | 431.00 | 943.75 |
| 5 | 100 | 117.00 | 37.70 | 11 | 1500 | 925.00 | 445.55 |
| 6 | 300 | 353.70 | 119.70 | 12 | 1800 | 868.75 | 425.00 |

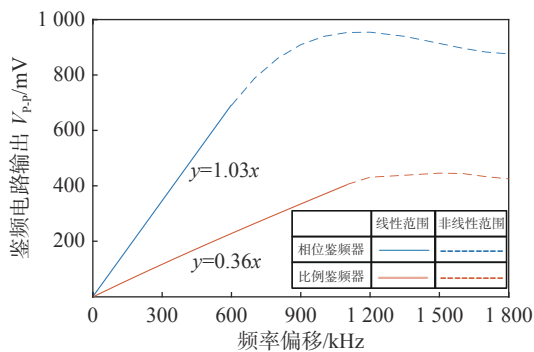
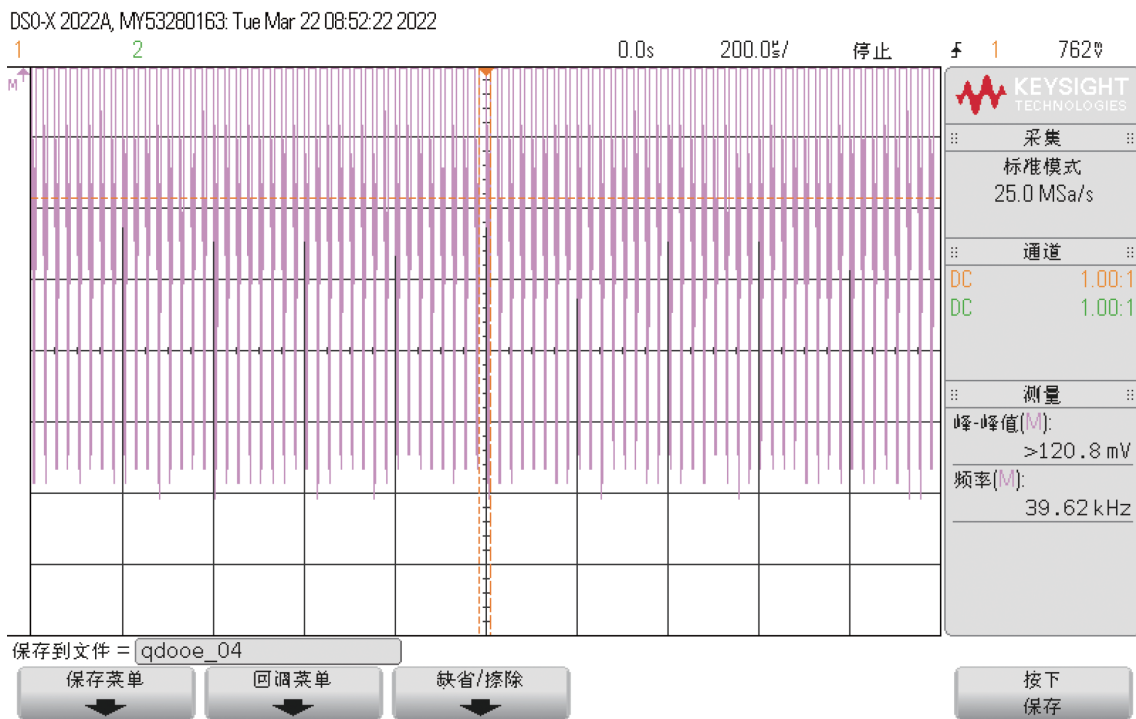


图4 相位鉴频器和比例鉴频器鉴频特性曲线对比

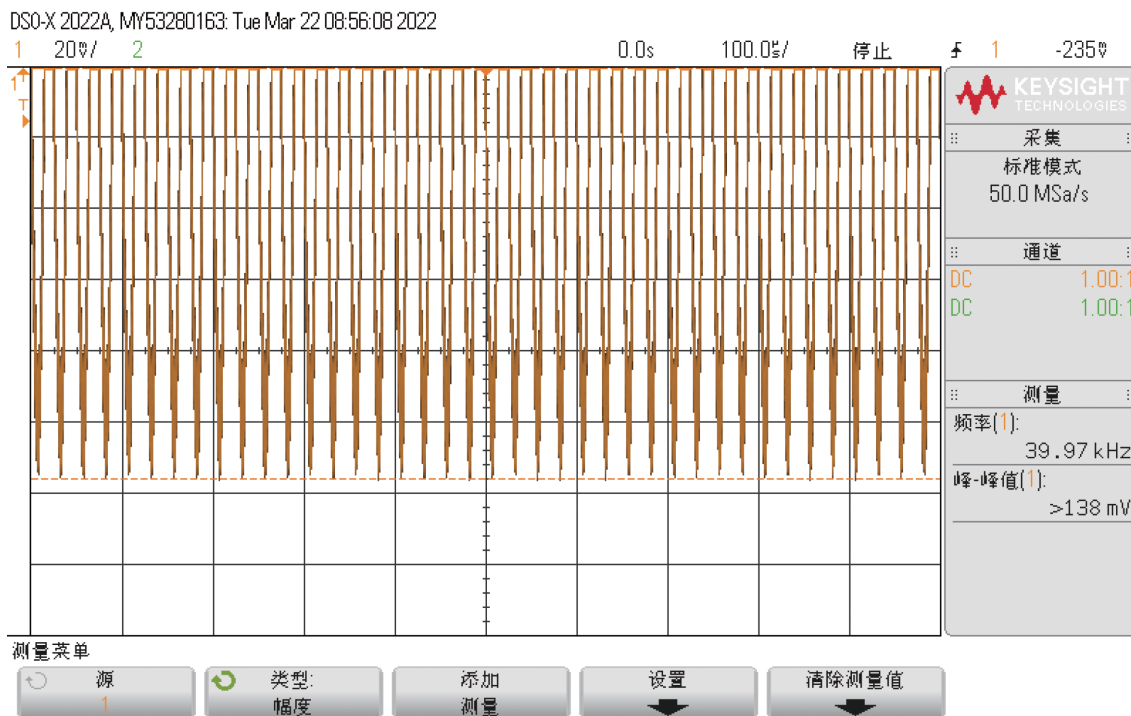
3.3 限幅作用分析

与相位鉴频器相比, 比例鉴频器具有限幅作用, 能够有效抑制寄生调幅干扰。也就是说, 比例鉴频器的输出比相位鉴频器的输出更加稳定。为了直观的体现两种鉴频器输出的区别, 图5突出展示了两种鉴频器的输出波形细节。仔细观察两幅波形图的波峰, 可以明显看出相位鉴频器的输出存在扰动, 而比例鉴频器的输出较为稳定, 这与1.2节所描述的原理是一致的。



(a) 相位鉴频器输出细节

图5 两种鉴频器输出波形



(b) 比例鉴频器输出细节

图 5 (续)

4 结束语

本文设计了一套相位/比例鉴频综合实验电路，将叠加型相位鉴频器和比例鉴频器合二为一，增强实验的综合性和趣味性，提高学生参与实验积极性的同时，深化学生对频率解调的认识。本文从叠加型相位鉴频器和比例鉴频器的原理入手，通过理论分析、公式推导和框图实现 3 个角度梳理和总结，着重分析了两种鉴频器的联系与区别，使得这两种电路的异同一目了然，有助于加深学生对相关原理的理解。实验结果表明，本文设计的实验电路成功地实现了调频信号的解调，得到了与理论分析一致的实验结果。

参考文献

[1] 张肃文. 高频电子线路[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[2] 王红霞, 解锋. 高频电子线路课程建设与教学改革探索[J]. 实验室科学, 2021, 24(4): 126-129.

[3] 黄扬帆, 甘平, 刘晓, 等. 高频电路实验教学改革的探索[J]. 实验室研究与探索, 2011, 30(7): 285-287.

[4] 杜永泰. 乘积型相位鉴频器的深入分析[J]. 电气电子教学学报, 2002(3): 37-39.

[5] 高峰. 雷达接收机相位鉴频器的设计[J]. 火控雷达技术, 2002(3): 54-58.

[6] 王议锋, 陈晨, 陈博, 等. LLC谐振变换器的变压器绕组

优化设计[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1252-1261.

[7] 何俊, 陈进, 毕果, 等. 振动调频信号的时延二次变换解调研究[J]. 振动与冲击, 2007(7): 36-39.

[8] 郭刚, 杨海运, 刘勇, 等. 基于RLC参数模型的变压器绕组断线谐振暂态响应分析方法[J]. 变压器, 2022, 59(3): 31-36.

[9] 高美蓉. 二极管峰值包络检波器特性研究[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(11): 37-41.

[10] 丛雯珊, 余岚, 沃江海, 等. 载频带宽同步倍频的高频大带宽线性调频信号光产生方法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(5): 140-146.

[11] 谢志远, 李杰, 郭磊, 等. 基于变压器匹配的5G通信手机功率放大器设计[J]. 微电子学, 2021, 51(6): 833-837.

[12] 杨光义, 张从新, 李高旭, 等. 基于阻抗控制的甚高频调频接收系统[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(4): 618-623.

[13] 李明孜, 高玲. 调频信号FM-AM转换数字解调研究[J]. 现代电子技术, 2009, 32(23): 57-60.

[14] 刘建英, 毕胜, 吴东华, 等. 可控变压整流器的参数灵敏度分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 466-472.

[15] 陈泓波. 调频式电容位移传感器中鉴频技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[16] 陈建良, 吕小红. 电视机中比例鉴频器的研究[J]. 信息技术, 2006(9): 81-82.