

一种无线电信号的模拟调制参数测量系统设计^{*}

刘星雨 姜乃卓 徐宇航 张子达 吴俊毅
(南京大学电子科学与工程学院 南京 210023)

摘要:无线电信号的模拟调制参数测量在无线电检测定位、通信发射机测试校准,民用船舶的导航通信等领域都有广泛应用。设计实现了一种基于超外差结构的无线电信号模拟调制参数的测量系统,以 STM32F4 系列单片机作为控制核心,包括的主要硬件电路模块有本振信号源、混频器、LC 无源滤波器、锁相环、低噪声放大器、包络检波电路、鉴频电路等。系统可自动识别普通调幅波、调频波、未调制的单频载波等模拟调制类型,完成无线电信号解调输出的同时自动测量出载波频率、调制信号频率、调幅指数、调频指数等主要调制参数。实测结果表明,系统对调制类型识别正确,调幅或调频信号的解调波形信噪比高、无明显失真,载波频率测量的相对误差小于 10^{-5} ,主要调制参数测量的相对误差均小于 5%。

关键词:无线电信号;载波频率;调制类型识别;调制参数测量

中图分类号: TM935.26 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5010

Design of an analogue modulation parameter measuring system for radio signals

Liu Xingyu Jiang Naizhuo Xu Yuhang Zhang Zida Wu Junyi
(School of Electronic Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The measurement of analog modulation parameters of radio signals has extensive applications in various fields, including radio detection and positioning, communication transmitter testing and calibration, and navigation communication of civil ships. An analogue modulation parameter measuring system for radio signal is designed and realized. STM32F4 series microcontroller is used as the control core of the system and superheterodyne structure is adopted. The main hardware circuit modules consist of a local oscillator signal source, mixer, LC passive filter, phase-locked loop, low-noise amplifier, envelope detection circuit and frequency discriminator circuit. This system is capable of automatically identify analog modulation types such as ordinary amplitude modulation, frequency modulation, and unmodulated single-frequency carrier. It can also automatically measure major modulation parameters including carrier frequency, modulation signal frequency, modulation index, and maximum frequency deviation of the carrier. The experimental results demonstrate modulation types can be accurately identified. Moreover, the demodulated waveform of both amplitude and frequency modulated signals exhibits a high signal-to-noise ratio and no obviously distortion. Furthermore, the relative error of measuring the carrier frequency is less than 10^{-5} , while the relative error of measuring the main modulation parameter is less than 5%.

Keywords: radio signal; carrier frequency; modulation type identification; modulation parameter measurement

0 引言

无线电信号的模拟调制参数测量在现实生活中具有广泛应用。一方面可以为信号发生器提供有效可靠的检

验手段,同时对数字通信发射机中的特殊问题进行故障诊断;另一方面可用于通信装备输出调制信号的调制度分析或雷达发射机测试。目前国内外仪器厂商设计的商用专业信号源分析仪、安装在频谱分析仪或示波器上的商用信

收稿日期:2023-12-01

^{*} 基金项目:2020 年教育部产学合作协同育人项目(202002302026)、2021 年教育部第二批产学合作协同育人项目(202102165015)、国家级大创项目(202310284101Z)、省级大创项目(202210284348Y)资助

号解调软件可以解调各类模拟调制的无线电信号,输出解调的模拟波形,但是不能自动识别调制类型,解调时需要已知调制类型、载波频率和主要调制参数,无法自动测量主要的模拟调制参数。因此设计制作一个无线电信号测量系统,可自动识别普通调幅(amplitude modulation, AM)、调频(frequency modulation, FM)等模拟调制类型、自动测量显示载波频率、调幅/调频指数、最大频偏、调制信号频率等主要调制参数,测量误差尽量小,载波频率至少覆盖常用的业余无线电频率范围 7~30 MHz,在通信和仪器仪表领域是具有广泛应用需求的。

在已有研究中,使用频谱分析仪测量模拟调制参数是最普遍的方法^[1-3]。但对于 FM 信号,频谱仪无法直接测得最大频偏、调频指数等参数,需要使用哈伯雷法、贝塞尔零值法等方法进一步计算^[4-5],不够便捷快速,需要进行大量且耗时的额外函数运算,计算成本较高。丁鹏等^[6]提出的基于频谱分析仪的全数字的模拟信号解调分析方法使用了上层主机软件,解调得到的调制指数及调制频偏的准确度可达到 95% 以上,但仍需要使用频谱分析仪,且解调调频信号时必须满足若干限制,如差分鉴频的相位差的范围应限制在 2π 以内,否则将影响解调结果的准确度。以上研究使用的调制参数测量方法均需要使用频谱分析仪,因此测量系统成本相对较高,且自动化程度低,同时对参数测量范围有较多限制,无法测量载波频率。张峰等^[7]提出了一种调制参数的高精度测量算法,但算法复杂度高,消耗算力大,计算时间长,需要高速采样来保证测量精度,

对处理器和硬件系统要求较高;且需通过内插的方式进行数据重建,否则会造成精度损失。郭裕丰等^[8]使用模拟锁相环解调输出信号,降低了测量电路的复杂度,但只能在已知载波频率的条件下解调 FM 信号,并且允许的载波频率变化范围较小,只有 30~38.61 MHz,无法覆盖常用的业余无线电频率范围。

本文设计实现了一种无线电信号测量系统,基于超外差结构,以硬件电路为主,可自动识别业余无线电频段的 AM 波、FM 波、未调制单频载波等模拟调制类型,用硬件电路完成无线电信号解调输出的同时自动测量出载波频率、调制信号频率、调幅/调频指数等主要调制参数。系统创新性的使用了快速载波频率测量技术,实现了大范围、高精度、全自动、快速度的无线电信号载波频率测量。

1 测量系统的整体结构

系统整体结构和包含的主要电路模块如图 1 所示,系统主要由调制类型识别模块、调幅波解调模块和调频波解调模块 3 部分组成,常用的 STM32 系列单片机作为系统的控制与计算核心单元。首先调制类型识别模块会判断待测无线电信号的调制类型,随后将信号送入对应调制类型的解调模块进行解调,最后单片机采样解调信号,通过快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析频谱,测量计算出和调制类型对应的主要调制参数,显示到液晶屏幕上。本文系统的主要工作流程如图 2 所示。

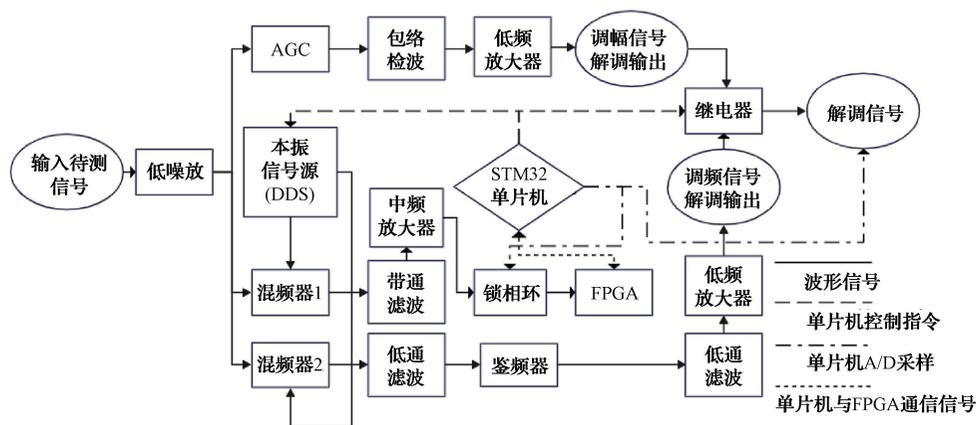


图 1 系统整体结构框图和主要电路模块

Fig. 1 System architecture diagram and main circuit modules

系统的具体测量技术指标如下:1)输入无线电信号的载波电压峰峰值范围 10~100 mV;2)载波频率范围 7~30 MHz,调制信号频率范围 1~10 kHz;3)可自动识别的调制类型包括单频调制(调制信号为正弦波)的普通调幅波、单频调制(调制信号为正弦波)的调频波或未调制的单频载波,其中调幅波的调幅指数 m_a 范围为 $0.2 \leq m_a \leq 1$,调频波的调频指数 m_f 范围为 $1 \leq m_f \leq 6$,对应的最大频偏 Δf_m 的测量范围为 1~60 kHz;4)可自动输出解调波形

并在液晶屏幕上显示波形及频谱;5)可自动测量显示的主要参数包括载波频率、调幅/调频指数、最大频偏、调制信号频率和电压峰峰值等。

电源模块提供多路互相隔离的 ± 3.3 与 ± 5 V 直流电源,分别给系统的各硬件电路模块供电,实现各模块电源之间的相互隔离,可降低模块之间的反馈与相互干扰。系统中高频电路模块的输入与输出阻抗均为 50Ω ,实现阻抗匹配,模块之间的信号互联均采用双芯同轴线,提高屏

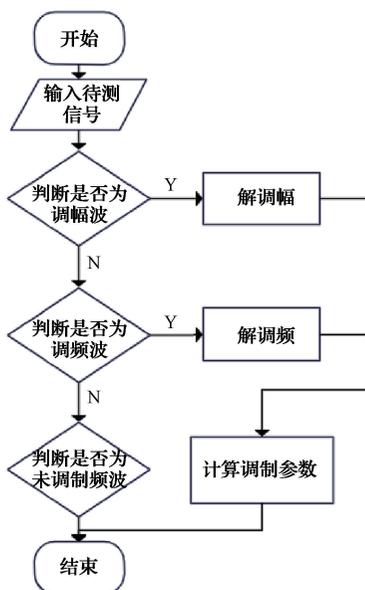


图2 系统的主要工作流程

Fig. 2 Main workflow diagram of the system

蔽效果,减小高频信号传输过程中的反射与干扰。系统中预留了多处测试点,可观察本振信号和混频输出波形、锁相环的跟踪波形、观察检波与鉴频电路模块的输出波形等重要信号。

2 测量系统的硬件电路设计

2.1 调制类型识别模块电路设计

调制类型识别模块可判断待测无线电信号的调制类型,且当输入为调频/调幅波时,测量出对应的载波频率。

1) 调幅波类型判断的工作原理

输入待测无线电信号后,单片机先控制继电器使调幅波解调模块的输出导通,调频波解调模块的输出此时断开。待测信号先输入自动增益控制(automatic gain control, AGC)电路稳定输出幅度并使幅度达到检波电平的要求,然后进入包络检波电路,输出的解调信号经低频电压放大后送入单片机进行采样,同时计算解调信号的电压峰峰值,并判断解调波形是否为正弦波,若是正弦波,则判定待测信号为普通调幅波。若不是则单片机会控制继电器使调幅波解调模块的输出断开,调频波解调模块的输出导通,接下来判断是否为调频波。

2) 载波频率测量的工作原理

本文创新性地使用本振信号大步长扫频和锁相环载波跟踪提取相结合的方案,配合现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的数字频率计功能,可以快速测定 AM 或 FM 信号的载波频率,无需使用鉴频电路。

单片机控制本振信号源输出扫频信号输入混频器 1,与待测信号混频(下变频)后经过带通滤波器(上下截止频

率分别为 12.5 和 12 MHz)得到中频信号,再经放大后输入锁相环电路(phase locked loop, PLL)。本振信号的扫频范围设置为 $12\text{ MHz}+7\text{ MHz}\sim 12\text{ MHz}+30\text{ MHz}$ (对应测量范围内的最低和最高载波频率),扫频步长设置为 0.5 MHz。锁相环电路实测在 12 MHz 附近的频率锁定范围大于 0.5 MHz,可保证扫频过程中带通滤波器输出的中频 AM 或 FM 信号的载波频率落入锁相环电路的频率锁定区间内。当锁相环电路锁定时,压控振荡器(voltage-controlled oscillator, VCO)将会输出和中频信号的载波频率严格同频的方波信号,单片机通过采样方波信号并计算其峰峰值可以判断锁相环是否已经锁住(未锁住时,方波信号峰峰值会显著减小到锁住时的 2/3 左右)。当单片机判断锁相环电路已锁定时,控制系统中的 FPGA 模块测量出 VCO 输出的方波信号频率 F 。记录锁定时本振信号的扫频频率 f ,即可计算出对应的待测无线电信号的载波频率 $f_0 = f - F$ 。

本文的载波频率测量只需使用 0.5 MHz 较大的扫频步长,即可通过锁相环电路提取同步载波信号并送入 FPGA,高精度的测量出无线电信号的载波频率,测量精度明显优于文献[1,3]方案的测试结果,与文献[6]中实现的测量精度基本相当。快速扫频可大大缩短测量时间,当实测 FM 波的载波频率为 30 MHz 时,系统完成一次载波频率测量所需时间小于 40 s。扫频步长的设置与待测信号载波频率的分布方式无关,最大扫频步长不超出锁相环电路的频率锁定范围即可,载波频率可位于测量范围内的任意频率点,测量精度由 FPGA 决定,因此可测量的载波频率具有较多有效数字位。选用性能更好的锁相环电路,扩展锁相环的频率锁定范围和提高频率锁定速度,可进一步增大扫频步长,提高载波频率测量速度。

传统的调制信号载波频率测量方案,本振信号扫频,根据鉴频电路输出幅度最大时来测量载波频率,测量精度受到鉴频电路线性度和灵敏度、扫频步长等因素限制,当待测信号的载波频率分布未知时,需要反复调整扫频步长,测量时间较长,同时测量精度也远低于本文提出的方案。

3) 调频波类型判断的工作原理

测定载波频率 f_0 后,单片机控制本振信号源输出频率为 $f_0+90\text{ MHz}$ 的信号作为混频器 2 的本振信号,混频器 2 的输出经截止频率为 90 MHz 的 LC 无源低通滤波器,将待测信号的载波频率搬到固定的 90 MHz,送入鉴频器进行解调,最后经过低通滤波器和电压放大后得到解调信号。单片机采样解调信号并判断波形,若为正弦信号,则可判定为调频波;若为直流信号,则判定为未调制的单频载波。

2.2 混频器电路设计

混频器作为接收机射频前端的核心电路,要求噪声系数小,同时尽量减少输出的组合频率分量干扰。混频器 1 和 2 均使用 AD831 芯片进行设计,电路原理如图 3 所示。

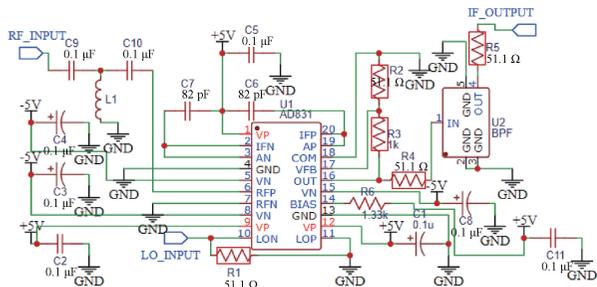


图3 混频器电路原理

Fig. 3 Schematic diagram of mixer circuit

AD831 是一款集成的混频器芯片,内部包括混频器、限幅放大器、低噪声输出放大器和偏置电路等,本振和输入信号频率最高可达 500 MHz。AD831 构成混频器电路时具有良好的线性度,输出阻抗实现 50 Ω 匹配,电路本身没有插入损耗^[9],通过合理的控制本振信号和输入信号的功率,混频后输出的组合频率分量、本振与输入信号的泄漏都较小,基本没有杂散分量,电路具有较好的性能。

2.3 本振信号源电路设计

系统对本振信号源的要求如下:1)能够实现频率步进可调的连续扫频,扫频范围至少包含 19~120 MHz;2)本振信号频率稳定度高,相位噪声小;3)本振信号功率满足混频器对本振输入功率的要求,波形失真小。为满足以上要求,使用直接数字频率合成(direct digital synthesis, DDS)芯片 AD9959 设计制作本振信号源电路^[10-11]。单片机对 DDS 芯片编程控制,可实现 4 通道独立输出、相位连续可调、幅度可编程设置、频率变化范围在 1 Hz~100 MHz 的正弦波信号。系统中设置本振信号的电压峰值为 250 mV。在每通道的输出后面设计了截止频率为 200 MHz 的无源 LC 低通滤波器,可有效抑制本振信号的镜像干扰和谐波失真。输出频率为 40 MHz 的本振信号时域波形与频谱如图 4、5 所示,波形几乎没有失真,从频



图4 40 MHz 本振信号的时域波形

Fig. 4 Time domain waveform of 40 MHz local oscillator signal

谱图上可以看到本振信号的相位噪声较小,在 10 kHz 频偏处的相位噪声低于 -90 dBc,性能指标完全满足系统的测量精度要求。

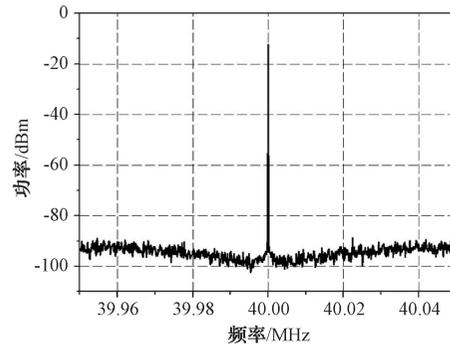


图5 本振信号频谱

Fig. 5 Spectrum of local oscillator signal

2.4 锁相环模块电路设计

中频放大器的增益设置大于 20 倍并可调,对混频器 1 输出的中频 AM 或 FM 波进行限幅放大,同时抑制寄生调幅,使载波幅度满足锁相环电路输入参考信号的电平要求。

锁相环电路使用 CD74HC4046 集成锁相环芯片。芯片具有高抗噪性以及出色的 VCO 频率线性度,功耗低,内部集成了鉴相器、VCO 等单元,可外接环路滤波器。锁相环配置成载波频率跟踪提取电路的原理如图 6 所示,混频后的中频信号从芯片的 14 引脚输入。其中电容 C6 与电阻 R1 共同决定 VCO 的中心频率约为 12 MHz,电阻 R2 决定频率锁定范围,电阻 R5、R6 和电容 C3 是外接的环路低通滤波器。在本振信号的扫频过程中,当锁相环锁定时,输入的中频调频/调幅或未调制的单频载波信号的载波频率和 VCO 输出的方波信号频率完全相同,如图 7 所示。粉色波形为输入下变频后的中频未调制的单频载波信号,黄色波形为 VCO 输出的方波信号,选择任一通道作

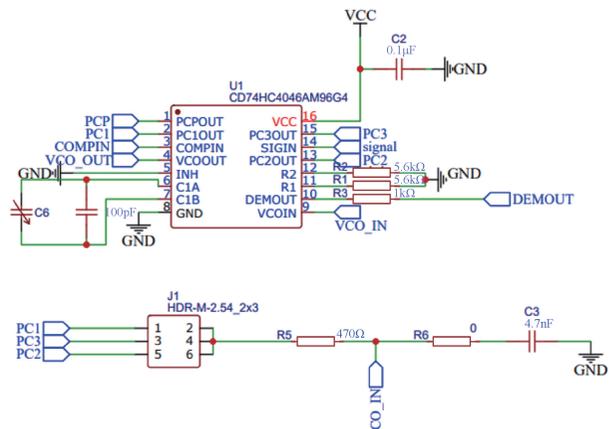


图6 锁相环电路原理

Fig. 6 Schematic diagram of PLL circuit



图7 锁相环锁定时的波形
Fig. 7 Waveform during PLL locking

为触发源,两通道波形均可稳定显示,表明两者频率严格相等,均为12 MHz。

2.5 调幅参数测量模块电路设计

如果系统判断待测信号为普通调幅波,则通过包络检波电路解调并输出模拟的调制信号波形。单片机对解调波形进行采样,根据解调波形幅度计算出调幅指数 m_a ,通过FFT计算得到调制信号的频率、频谱,并将解调波形、调幅波的调幅指数 m_a 等参数显示在液晶屏上。由于AGC电路的控制作用,输入包络检波电路的载波电压峰峰值基本不变,检波电路的电压传输系数一定,因此采样计算解调信号的电压峰峰值,拟合计算函数可测量出调幅指数 m_a 。

1)包络检波电路设计

系统使用ADL5511芯片设计包络检波电路,解调波形用示波器实测如图8所示,波形清晰稳定,几乎无失真。

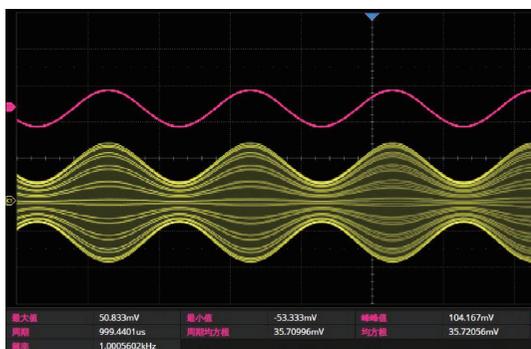


图8 包络检波电路的解调波形
Fig. 8 Demodulation waveform of envelope detection circuit

2)AGC电路与继电器电路设计

系统中AGC电路使用AD8367芯片设计,当输入待测AM波的载波电压峰峰值在10~100 mV范围内时,输出幅度均可以稳定在大约300 mV,满足包络检波电路的输入电平要求。使用5脚封装,5 V直流供电的通灵JQC-3FF-S-Z电磁继电器模块,实现调幅和调频波解调通道输

出的切换。

2.6 调频参数测量模块电路设计

输入待测信号如果判断为调频波,鉴频器的解调输出信号经过低通滤波和放大后送入单片机采样和FFT,测量计算得到调制信号频率、最大频偏 Δf_m 、调频指数 m_f 等主要调制参数,调制类型和测量参数均显示在液晶屏上。

1)鉴频电路设计

鉴频电路的设计使用一款低成本的立体声调频解调芯片JLAC20,该芯片采用了FM锁相环调制解调技术,可接收的输入调频波载波频率范围为87~108 MHz。系统通过单片机编程设定接收FM信号的载波频率固定在90 MHz频道。经测试,鉴频器电路性能指标优良,长时间工作后中心频率基本无漂移,鉴频曲线的线性度好,输出的解调波形稳定无抖动、信噪比高,几乎无失真,使测量系统可以精确计算出待测调频波的主要调制参数。

实验测量鉴频电路的鉴频特性曲线如图9所示,可见,鉴频曲线的线性区间范围约为89.82~90.16 MHz,进一步通过线性拟合计算出鉴频器的中心频率约为89.99 MHz,恰好对应调频波的载波中心频率90 MHz(10 kHz的频率误差可能是实验测量和线性拟合引入,不影响测量精度),实测的鉴频曲线线性度很好,和拟合的理想线性鉴频曲线相比较,最大相对偏差值约为2.3%。鉴频曲线斜率对应鉴频电路的鉴频灵敏度 k_f ,约为5.5 mV/kHz。单片机采样和测量鉴频器解调输出波形的电压幅值 V_m 和频率 f_m ,根据式(1)可计算出待测调频波的最大频偏 Δf_m 和对应的调频指数 m_f 。

$$\begin{cases} \Delta f_m = \frac{V_m}{k_f} \\ m_f = \frac{\Delta f_m}{f_m} \end{cases} \quad (1)$$

当最大频偏 Δf_m 为7 kHz时,鉴频电路输出的解调波形如图10所示,为标准正弦波,信噪比高,稳定几乎无失真。

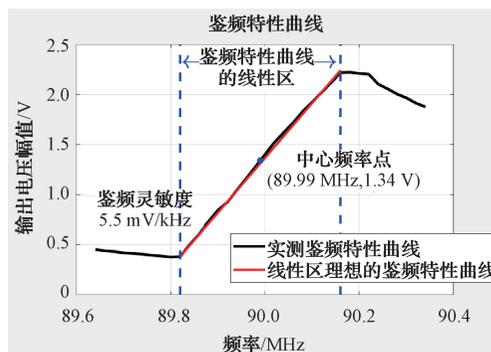


图9 鉴频电路的鉴频特性曲线
Fig. 9 The frequency discrimination characteristic curve of the frequency discriminator circuit



图 10 鉴频电路的解调波形

Fig. 10 The demodulated waveform of the frequency discriminator circuit

3 系统软件设计

本文系统的控制核心与参数测量计算模块均使用 STM32F4 系列单片机^[12-15]。使用 Xilinx Artix-7 系列 FPGA 芯片测量载波频率并与单片机进行通信。

系统软件部分实现的功能如下:1)单片机控制继电器切换输入待测信号的解调通路,并通过模数转换器采样和计算解调信号的波形、峰峰值来实现对待测信号调制类型的识别和输出解调波形;2)单片机控制本振信号源输出的扫频信号频率范围和步长,并与 FPGA 进行通信,测定无线信号的载波频率;3)单片机采样解调波形,进行 FFT 计算分析频谱分量、测量计算出调制信号频率、电压峰峰值、调幅或调频指数等主要调制参数,并在液晶屏上显示所有测量参数。

4 系统的实测结果和分析

4.1 调制类型识别与调制参数测量

一键启动测量系统后,单片机控制本振信号源开始扫频,继电器自动切换解调电路输出,完成调制类型的自动识别。同时启动 FPGA 完成频率测量,显示待测信号的载波频率,并将解调信号波形、频率、调制指数等主要参数信息显示在液晶屏幕上。

系统中预留了包检波模块和鉴频模块的输出端口,可接入示波器观察解调波形是否和测量显示一致,并判断波形的失真情况。

4.2 实验测试结果和分析

1)输入调幅波的测试结果

输入 AM 波,载波电压峰峰值为 10 mV,载波频率分别取接近测量范围最低和最高频率的 7.142 和 29.647 MHz,调制信号频率分别取测量范围的最低和最高频率 1 与 10 kHz,对应的调幅指数 m_a 分别取测量范围的下限 0.2 与上限 1。系统的解调波形用示波器观察如图 11 和 12 所

示,可见解调波形稳定、信噪比高且基本无失真。屏幕显示的调制类型判断结果均为调幅波,自动测量的参数显示结果分别如图 13 和 14 所示(图 13 中调幅指数 0.2 较小,解调信号的频谱高度也相应较小)。从屏幕显示的测量数据中可以看到,调幅波的载波频率测量值分别为 7.142 0 和 29.647 MHz,解调信号频率分别为 1.000 0 和 10.000 0 kHz,载波和调制信号频率测量几乎没有误差;调幅指数的测量值分别为 0.201 2 和 0.988 2,相对误差仅



图 11 $m_a = 0.2$ 的调幅波解调波形

Fig. 11 Demodulated waveform of AM wave with modulation index of 0.2

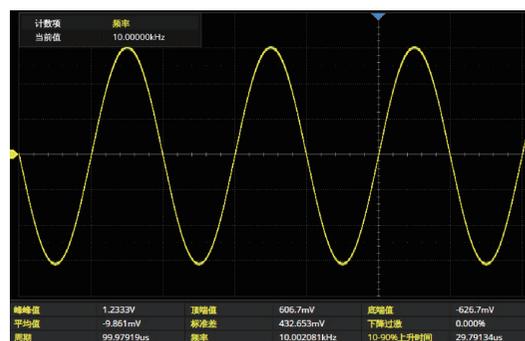


图 12 $m_a = 1$ 的解调波形

Fig. 12 Demodulated waveform of AM wave with modulation index of 1



图 13 $m_a = 0.2$ 时,调幅波的主要测量参数

Fig. 13 The major measurement parameters of AM wave with modulation index of 0.2



图 14 $m_a=1$ 时, 调幅波的主要测量参数

Fig. 14 The major measurement parameters of AM wave with modulation index of 1

约为 0.6% 和 1.18%; 测量的解调信号电压峰峰值分别为 0.456 0 和 1.232 0 V, 示波器的实测值对应为 456.7 和 1.233 3 V, 相对误差约为 0.15% 和 0.11%。

为进一步验证调幅波调制参数的测量精度, 调制信号频率取 1 kHz 不变, 调幅指数取值不同时的测量结果如表 1 所示。测量的调幅指数 m_a 相对误差最大值为 2.00%。以上测量结果表明, 系统对调幅波类型判断正确, 调幅波主要调制参数的测量精度较高, 测量相对误差均在 5% 以内。

表 1 调制信号频率为 1 kHz 时, 调幅指数 m_a 的测量结果

Table 1 Measurement results of the amplitude modulation index m_a at a modulation signal frequency of 1 kHz

m_a 实际值	m_a 测量值	m_a 相对误差/%
0.20	0.204 0	2.00
0.40	0.393 4	1.65
0.60	0.607 5	1.25
0.80	0.805 2	0.65
1.00	0.990 4	0.96

当输入调幅或调频波的载波电压峰峰值为 10 mV 时, 中频放大器输出的中频已调信号的载波幅度达到锁相环电路的输入参考信号的电平要求。当载波电压峰峰值进一步增大后, 中频已调信号进入限幅放大状态, 因此理论上输入调幅或调频信号的载波电压峰峰值范围为 10 mV 及以上。接下来验证系统对调幅波载波频率的测量精度, 调幅波的载波电压峰峰值设置为 10 mV, 调制信号频率取 1 kHz 不变, 载波频率在 7~30 MHz 测量范围内随机取不同值时的测量结果如表 2 所示。调幅波载波频率的测量误差最大值约为 126 Hz, 对应的相对误差仅约为 4.27×10^{-6} , 表明本系统使用的本振信号大步长扫频结合锁相环载波跟踪提取的无线电信号载波频率测量法实测具有较高精度和稳定性。

载波电压峰峰值为 100 mV, 随机选取调幅波的载波频率、调制信号频率、调幅指数进行多次等精度测量, 实测

表 2 调幅波的载波频率取值不同时, 载波频率的测量结果

Table 2 Measurement results of the carrier frequency at different values of the carrier signal frequency for AM wave

载波频率实际值/MHz	载波频率测量值/MHz	绝对误差/Hz	相对误差差/ $(\times 10^{-6})$
7.322 2	7.322 161	39	5.32
10.792 6	10.792 554	46	4.26
11.923 7	11.923 665	35	2.94
12.660 1	12.660 038	62	4.90
13.366 0	13.366 115	115	8.60
16.153 4	16.153 483	83	5.14
22.112 2	22.112 153	47	2.13
23.162 8	23.162 762	38	1.64
26.597 8	26.597 880	80	3.01
29.495 5	29.495 626	126	4.27

的调幅指数相对误差分布直方图如图 15 所示, 其中测量次数均为 30 次, 测量相对误差取绝对值。随机选取载波频率固定为 12.256 3 MHz, 调制频率为 4 kHz, 调幅指数为 0.6 的调幅波, 对载波频率进行 100 次等精度测量, 载波频率测量的相对误差分布直方图如图 16 所示。

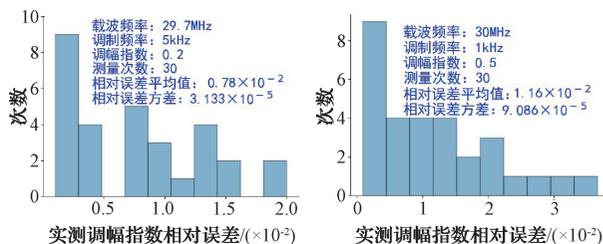


图 15 测量的调幅指数相对误差分布直方图 1、2

Fig. 15 Histogram of relative error distribution for measured modulation index 1, 2

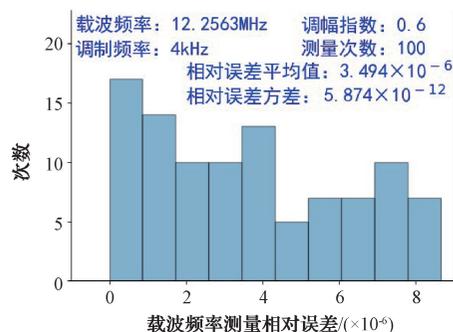


图 16 测量的调幅波载波频率相对误差分布直方图

Fig. 16 Histogram of relative error distribution for measured carrier frequency of AM wave

从直方图可以看出, 在近似等精度测量的条件下, 调幅指数测量的相对误差平均值分别约为 1.16% 和

0.78%，载波频率测量的相对误差平均值约为 3.5×10^{-6} ，表明系统对调幅波的载波频率测量具有极高的精度，对调幅指数的测量精度也较高。测量相对误差接近 0 时出现的次数最多，误差变化均近似符合正态分布的统计规律，说明系统在测量过程中相对稳定，测量结果有较好重复性^[16]。

2) 输入调频波的测试结果

同理，系统实测时，当调频信号的载波电压峰峰值在 10~100 mV 范围内，对载波频率和各主要调制参数的测量精度都较高。

输入载波电压峰峰值为 10 mV 的调频波，载波频率分别随机选取为 18.03 和 20.12 MHz，调制信号频率分别取测量范围内的最低和最高频率 1 与 10 kHz，最大频偏分别取 1 kHz(对应调频指数 $m_f=1$ ，测量范围的最小值)和 60 kHz(对应调频指数 $m_f=6$ ，测量范围的最大值)。图 17 和 18 所示是示波器上观察的调频解调信号，波形稳定清晰、信噪比高，为基本无失真的正弦波。屏幕显示调制类型识别结果均为调频波，自动测量的参数显示结果如图 19 和 20 所示。调频波的载波频率测量值分别为 18.03 和 20.12 MHz，解调信号频率分别为 1.000 0 和 10.000 0 kHz，频率测量误差几乎为 0。测量的最大频偏分别为 1.004 2 和 58.986 1 kHz，对应的调频指数 m_f 约为 1.004 2 和 5.898 6，测量相对误差分别仅约为 0.42% 和 1.69%；测量的解调信号峰峰值分别为 0.140 4 和 0.789 5 V，对应的示波器实测值为 140 和 790 mV，相对误差约为 0.29% 和 0.06%。



图 17 $m_f=1$ 的调频波解调波形

Fig. 17 Demodulated waveform of FM wave with modulation index of 1

调频波的载波电压峰峰值为 10 mV，调制信号频率为 3 kHz，调频指数取值不同时的测量结果如表 3 所示。测量的调频指数 m_f 相对误差最大值约为 2.54%。由以上测量数据可知，调频信号主要调制参数的测量相对误差均在 5% 以内。

载波电压峰峰值为 10 mV，调制信号频率保持 3 kHz 不变，在测量范围内随机选取不同的载波频率，调频波的载波频率测量结果如表 4 所示。调频波载波频率的测量



图 18 $m_f=6$ 的解调波形

Fig. 18 Demodulated waveform of FM wave with modulation index of 6



图 19 $m_f=1$ 时，调频波的主要测量参数

Fig. 19 The major measurement parameters of FM wave with modulation index of 1

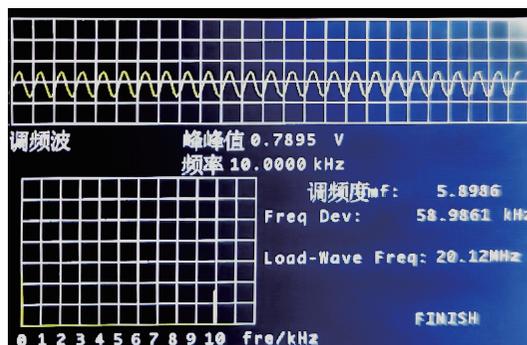


图 20 $m_f=6$ 时，调频波的主要测量参数

Fig. 20 The major measurement parameters of FM wave with modulation index of 6

误差值大部分都在 100 Hz 上下，最大值约为 128 Hz，对应的相对误差仅约为 4.55×10^{-6} ，进一步验证了测量系统采用的载波频率测量方案具有极高的测量精度。

产生载波频率测量误差的主要原因是本振信号和待测无线电信号来自不同的频率源，频率上非相干，两者存在着固有的频率偏差，实测频率偏差在 100 Hz 上下。如果进一步校准本振信号的频率偏差或在扫频过程中锁相

表3 调制信号频率为3 kHz时,调频指数 m_f 的测量结果

Table 3 Measurement results of the frequency modulation index m_f at a modulation signal frequency of 3 kHz

m_f 实际值	m_f 测量值	m_f 相对误差/%
1.00	1.025 4	2.54
2.00	2.043 2	2.16
3.00	3.009 0	0.30
4.00	4.052 3	1.31
5.00	5.012 2	0.24
6.00	5.972 1	0.47

表4 调频波的载波频率取值不同时,载波频率的测量结果

Table 4 Carrier frequency measurement results for different values of the carrier frequency of FM wave

载波频率 实际值/MHz	载波频率 测量值/MHz	绝对误 差/Hz	绝对误 差/($\times 10^{-6}$)
8.005 0	8.005 072	72	8.99
9.896 4	9.896 325	75	7.58
12.386 2	12.386 278	78	6.30
17.771 1	17.771 029	71	4.00
19.354 6	19.354 723	123	6.36
21.510 6	21.511 21	61	2.84
23.886 7	23.886 614	86	3.60
25.791 8	25.791 924	124	4.81
28.130 4	28.130 272	128	4.55
29.649 2	29.649 311	111	3.74

环频率锁定时,直接使用FPGA测量对应的本振信号扫描频率值 f ,还可进一步减小载波频率的测量误差。

同样对调频信号随机选取载波频率、调制频率、最大频偏进行多次等精度测量,实测的调频指数和载波频率的相对误差分布直方图如图21、22所示。图22中随机选取载波频率为20.7035 MHz,调制频率为6 kHz,最大频偏为30 kHz,测量100次。

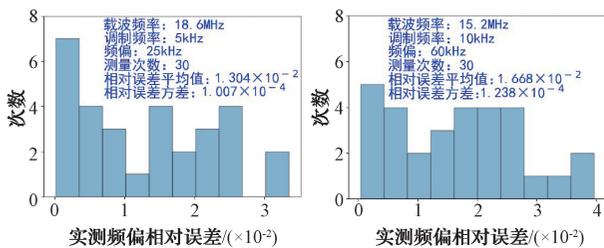


图21 测量的最大频偏相对误差分布直方图1、2

Fig. 21 Histogram of relative error distribution for measured maximum frequency deviation 1, 2

最大频偏测量的相对误差平均值分别约为1.3%和1.67%,载波频率测量的相对误差平均值约为 3.6×10^{-6} 。

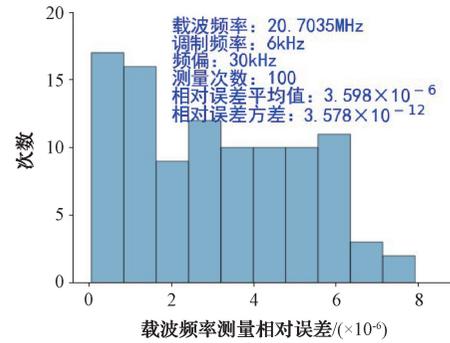


图22 测量的调频波载波频率相对误差分布直方图

Fig. 22 Histogram of relative error distribution for measured carrier frequency of FM waves

表明系统对调频波的载波频率测量具有极高的精度,最大频偏参数也有较高测量精度。测量相对误差变化同样近似符合正态分布规律,再次验证了系统工作稳定,具备较好的测量重复性^[16]。

3)输入未调制的单频载波的测试结果

输入电压峰峰值为10 mV,频率随机选取为25.01 MHz的未调制单频载波信号,信号类型识别结果为未调制的单频载波,同时显示载波频率为25.01 MHz。

本文测量系统的电路模块实物如图23所示。

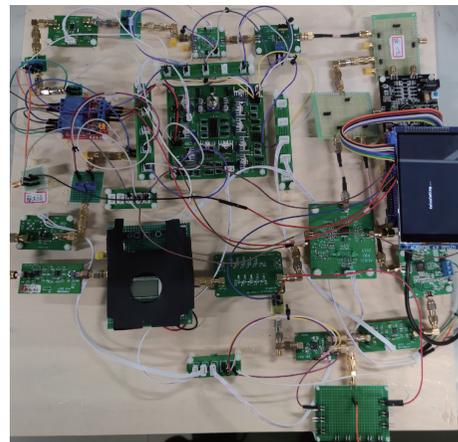


图23 测量系统的电路模块实物

Fig. 23 Physical diagram of the circuit system

5 结论

相比于现有的模拟调制参数测量仪器,本文设计的测量系统采用大步长扫描和锁相环载波跟踪提取相结合的载波频率快速测量法,对调幅/调频信号的载波频率具有极高的测量精度,其他主要调制参数的测量精度也相对较高,同时测量范围更大、速度较快,对处理器的算力要求不高,可一键启动自动完成调制类型识别、解调输出、主要调制参数的测量显示。

系统采用全模块化电路设计,工作稳定,升级各电路

模块,能够实现良好的二次开发功能。例如扩展本振信号源的输出频率,可扩展无线电信号的参数测量范围;选用鉴频线性区更大的鉴频电路可扩展调频信号最大频偏的测量范围和精度;选用频率锁定范围更宽,锁定更快的锁相环电路,可进一步增大扫频步长,提高系统的载波频率测量速度;优化拓展软件算法,可以自动识别ASK、FSK等数字调制信号类型和测量主要调制参数。本文系统可应用于航海船舶、机场通信导航、户外无线电信号定位检测等领域;也可作为通信与高频电路实验的教学演示和测量装置。

参考文献

- [1] 孔维东,胡凯茂,汪蕊花.扫频式频谱分析仪的信号测量方法[J].中国无线电,2022(1):52-55.
KONG W D, HU K M, WANG R H. Signal measurement method of sweep-type spectrum analyzer[J]. China Radio, 2022(1): 52-55.
- [2] 张峰,周钦山.测量接收机中模拟解调参数的自动配置技术研究[J].电声技术,2022,46(6):102-105.
ZHANG F, ZHOU Q SH. Research on automatic configuration technology of analog demodulation parameters in receiver measurement [J]. Audio Technology, 2022, 46(6): 102-105.
- [3] 景逸飞,侯玥.频谱分析仪调幅信号测量分析[J].电子世界,2013(17):117-118.
JING Y F, HOU Y. Analysis of measured amplitude modulation signals with spectrum analyzer [J]. Electronic World, 2013(17): 117-118.
- [4] 陈赫.串行数字视频信号抖动与模拟分量视频信号失真的计量方法研究[D].长春:吉林大学,2018.
CHEN H. Study on the measurement method of jitter in serial digital video signals and distortion of analog component video signals [D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [5] 谢炜春,吴小松.基于LabVIEW的频谱分析仪测量调频频偏的方法[J].中国计量,2013(8):105-107.
XIE W CH, WU X S. Method of measuring frequency deviation of spectrum analyzer based on LabVIEW[J]. China Metrology, 2013(8):105-107.
- [6] 丁鹏,苏勇辉.一种基于频谱分析仪的模拟信号解调与分析方法[C].2019年全国微波毫米波会议论文集(下册).北京:中国电子学会,2019,3:944-946.
DING P, SU Y H. A method of analog signal demodulation and analysis based on spectrum analyzer[C]. Proceedings of the 2019 National Microwave and Millimeter-Wave Conference (Volume 2). Beijing: China Electronic Society, 2019, 3: 944-946.
- [7] 张峰,战云,张超.模拟调制参数高精度测量算法研究[J].电声技术,2022,46(5):100-104.
ZHANG F, ZHAN Y, ZHANG CH. Research on high-precision measurement algorithm for analog modulation parameters[J]. Audio Technology, 2022, 46(5): 100-104.
- [8] 郭裕丰,王文虎,李建奇.基于锁相环载波数字可调的调频收发系统[J].无线电工程,2019,12:1089-1093.
GUO Y F, WANG W H, LI J Q. Frequency modulation transceiver system based on phase-locked loop carrier digitally adjustable[J]. Radio Engineering, 2019, 12: 1089-1093.
- [9] 李皎军.AD633模拟相乘功能设计与实现[J].实验技术与管,2015,32(3):47-49.
LI J J. Design and implementation of AD633 analog multiplier function[J]. Experimentation and Management, 2015, 32(3): 47-49.
- [10] 董殿国,侯文.基于FPGA的DDS信号发生器设计[J].电子制作,2023,31(1):16-18,78.
DONG D G, HOU W. Design of DDS signal generator based on FPGA [J]. Electronic Manufacturing, 2023, 31(1): 16-18,78.
- [11] 许国宏,宋征,徐林峰.基于DDS的模拟调制信号源设计与实现[J].电脑知识与技术,2015,11(29):35-37.
XU G H, SONG ZH, XU L F. Design and implementation of analog modulation signal source based on DDS [J]. Computer Knowledge and Technology, 2015, 11(29): 35-37.
- [12] 于波,韩玉斌.基于STM32的振动信号采集系统设计[J].电子测量技术,2020,43(4):148-152.
YU B, HAN Y B. Design of vibration signal acquisition system based on STM32 [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(4): 148-152.
- [13] 陆聪,张北伟.基于STM32三轴云台控制系统的设计[J].国外电子测量技术,2019,38(9):99-102.
LU C, ZHANG B W. Design of STM32 three-axis gimbal control system [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38(9): 99-102.
- [14] 陈继华,吴晨昂,谌志新.基于STM32的Delta-Sigma调制的鱼探仪发射机信号源设计[J].仪器仪表学报,2016,37(S1):67-73.
CHEN J H, WU CH B, CHEN ZH X. Design of fish finder transmitter signal source based on STM32 Delta-Sigma modulation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument 2016, 37(S1): 67-73.
- [15] 郭勇,何军.STM32单片机多串口通信仿真测试技术研究[J].无线电工程,2015(8):6-9,42.
GUO Y, HE J. Research on STM32 microcontroller multiserial port communication simulation test technology[J]. Radio Engineering, 2015(8): 6-9,42.

- [16] 程银宝,陈晓怀,王汉斌,等. 基于精度理论的测量不确定度评定与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1175-1182.

CHENG Y B, CHEN X H, WANG H B, et al. Evaluation and analysis of measurement uncertainty based on precision theory[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(8): 1175-1182.

作者简介

刘星雨,本科,主要研究方向为电路与系统。

E-mail: 201180123@smail.nju.edu.cn

姜乃卓(通信作者),工程师,主要研究方向为高频通信电路设计、电子设计竞赛指导、微弱信号检测等。

E-mail: jiangz@nju.edu.cn