

数字 - 模拟混合传输装置的设计

叶俊龙

浙江理工大学信息学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年3月28日; 录用日期: 2022年4月14日; 发布日期: 2022年4月21日

摘要

设计并制作了一套数字 - 模拟混合传输装置, 能够实现数字信号与模拟信号单独传输和同时传输。该装置由发送机和接收机组成。发送部分采用乘法器实现模拟信号和数字信号的混合后由天线发送, 接收部分采用超外差结构, 通过选频网络后进行信号的分离, 分离后的模拟信号直接经过检波和滤波输出, 数字调制信号经过整流后解码显示。为提高带宽利用率和降低功耗, 该装置采用AD9959进行FSK调制。经系统测试表明, 该系统可实现模拟信号与数字信号的调制与解调, 模拟信号频率范围50 Hz~10 KHz, 系统在2 m内可稳定传输, 频带宽度不大于25 KHz。该装置的设计为数模混合信号同传应用系统提供参考。

关键词

FSK, 超外差结构, 单端转差分, 混合同传

Design of Hybrid Transmission Device of Digital and Analog Signal

Junlong Ye

School of Information and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou Zhejiang

Received: Mar. 28th, 2022; accepted: Apr. 14th, 2022; published: Apr. 21st, 2022

Abstract

A hybrid transmission device of digital and analog signal was designed and implemented, which was composed of a transmitter and a receiver, and could realize separate and simultaneous transmission of digital signal and analog signal. The mixed signal based on the multiplier was sent by the antenna and received by a superheterodyne structure. The frequency selection network was used to separate the digital and analog signal. The analog signal was recovered through a detector and a filter. And the digital signal was displayed after rectifying and decoding. AD9959 for FSK modulation was used to improve bandwidth utilization and reduce power consumption. The

system test shows that the system can realize modulation and demodulation of analog signal and digital signal, the frequency range of analog signal is 50 Hz~10 KHz, the system can transmit stably within 2 m, and the frequency bandwidth is not more than 25 KHz. The design of the device provides a reference for the digital-analog mixed-signal simultaneous interpretation application system.

Keywords

FSK, Superheterodyne Structure, Single-Ended to Differential Conversion, Mixed Interpretation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

调制与解调电路设计的优越性对通信系统抗干扰能力及信道利用率尤为重要。对于多路模拟信号的传输,通过控制不同载波频率,结合带通滤波器和低通滤波器的应用,以实现基于频分复用技术的多路信号同传系统。模拟信号通过乘法器[1]或采用数字化等方式[2][3]进行调制,其本质都是将频谱搬移[4]来适应不同信道[5]的传输,并采用相关解调[6]方法从已调信号中恢复出携带信息。为提高传输系统的抗干扰能力,常将模拟信号数字化后进行数字调制与解调[7][8]。模拟-数字信号同传系统具有强抗干扰性,在广播电视、视频会议等中应用广泛。

设计并制作一套数字-模拟混合传输装置,完成模拟信号、数字信号的单路或混合方式的调制与解调,以实现模拟信号和数字信号的同时传输。其中模拟信号频率范围为 50 Hz~10 KHz,系统在 2 m 内可稳定传输,频带宽度不大于 25 KHz,系统功耗尽可能小。以期为数模混合信号同传或特定应用的调制与解调电路设计提供技术参考。

2. 数模混合传输装置的总体设计

数字-模拟混合传输装置主要包括发送机和接收机。发送机电路设计中,采用乘法器实现模拟信号和数字信号的混合,经功率放大后由天线发送。接收端采用超外差结构,将接收到的信号经小信号放大,通过由本振源、混频器和滤波器构成的选频网络后输入到单端转差分模块,以实现模拟和数字信号的分离。分离后的模拟信号直接经过包络检波和滤波模块输出,数字调制信号先经过零中频混频后,再通过滤波以及包络检波模块,最后进入电压比较器,从而恢复原始数字信号波形,并输入到 MCU 解码显示。数字-模拟混合传输装置总体框图如图 1 所示。

针对数模同传及系统带宽要求,需要选择合适的调制技术。振幅键控(Amplitude Shift Keying, ASK)调制技术传输时受干扰较大,且滤波器难以分离出调制后的模拟信号和数字信号。从方案设计可行性角度分析,相移键控(Phase Shift Keying, PSK)调制方式的解调设备繁多,相干载波的提取存在相位非固定变化等问题,最终选用频移键控(Frequency Shift Keying, FSK)调制[9]。FSK 调制信号通过 MCU + DDS 编程输出。设 FSK 信号载频频率分别为 f_1 和 f_2 , 数字基带信号频率为 f_B , 则数字信号带宽为

$$B = |f_2 - f_1| + 2f_B$$

设模拟信号基带频率为 f_3 , 则模拟信号带宽为 $2f_3$ 。因此,为实现 25 KHz 带宽内实现 50 Hz~10 KHz

模拟信号和数字信号的同传，设置 FSK 跳频 $|f_2 - f_1| = 4 \text{ KHz}$ ，数字基带信号频率 $f_b = 300 \text{ Hz}$ 。当模拟信号最大为 10 KHz 时，混合信号带宽最大为 24.6 KHz。

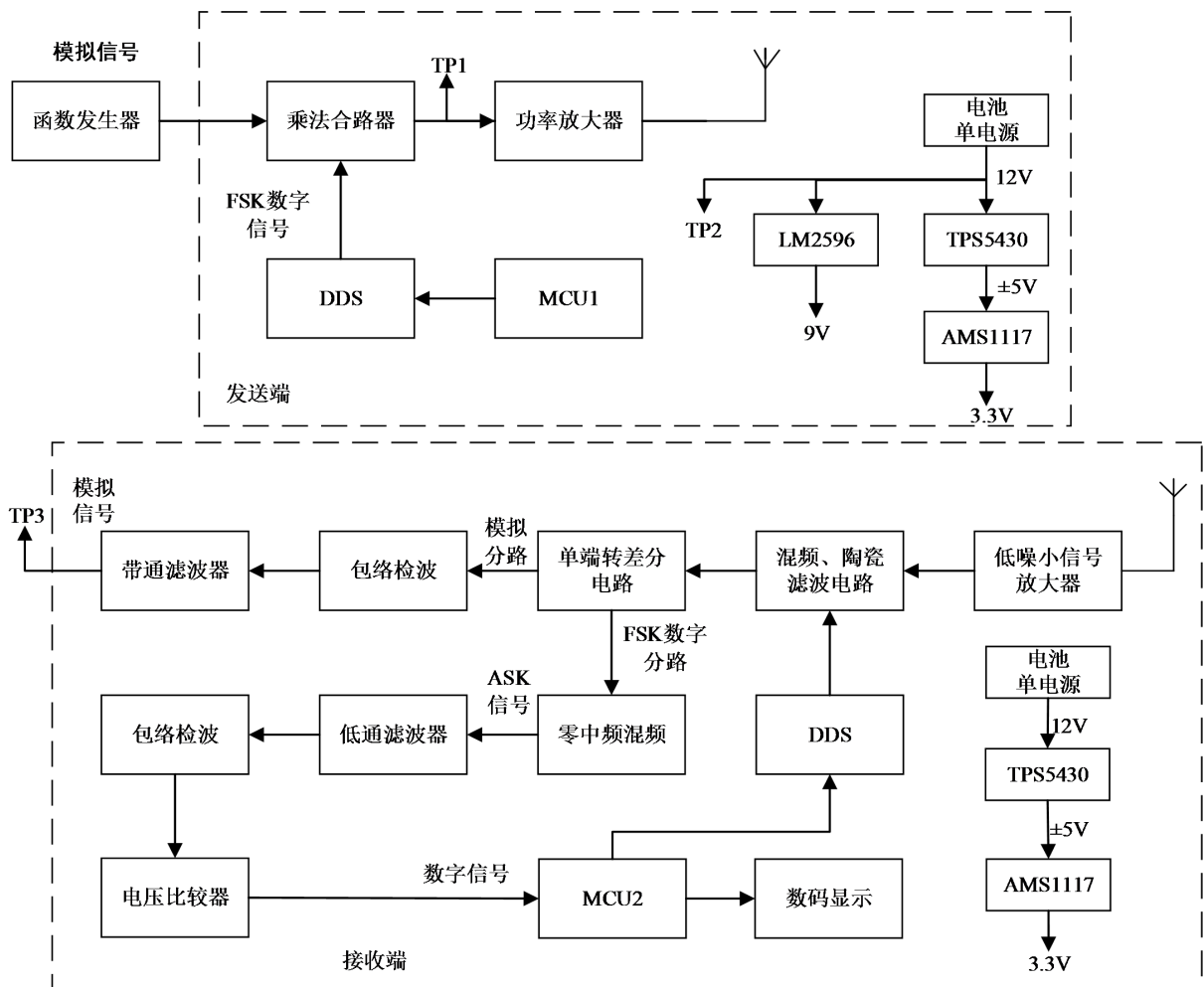


Figure 1. Design block diagram of digital-analog hybrid transmission device

图 1. 数字 - 模拟混合传输装置设计框图

3. 数模混合传输装置的硬件设计

该数字 - 模拟混合传输装置硬件电路主要包括 AD835 乘法器模块、AD831 混频器模块、AD8138 单端转差分模块、ADL5801 零中频混频器模块、AD9959 直接数字频率合成器 DDS 模块等。采用 ST 公司的 STM32F103ZET6 主控芯片控制 AD9959 信号源产生 FSK 数字调制信号和本振信号。本装置采用 12V 锂电池供电，通过设计基于 TPS5430、AMS1117-3.3 以及 LM2596 的电源转换电路，以满足各功能模块及主控 MCU 的供电需求。

3.1. 基于 AD835 的乘法电路设计

采用 AD835 实现乘法电路设计[10]，以实现基带信号与载波信号的相乘。AD835 是一款电压输出型四象限模拟乘法器，带宽高达 250 MHz，适用于宽带调制和解调应用。AD835 芯片内部包含 X 和 Y 差分输入放大器、求和器和输出缓冲放大器等。引脚 5 输出电压 W 的计算公式(1)如下：

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{U} + Z \quad (1)$$

其中, 变量 U 、 X_1 、 X_2 、 Y_1 、 Y_2 和 Z 分别为缩放比例系数、非反相输入 X 被乘数、反相输入 X 被乘数、非反相输入 Y 被乘数、反相输入 Y 被乘数、求和输入, 单位均为伏特 V 。为实现乘法功能, 设定 W 和 Z 两个引脚之间电阻 R_4 与 R_3 取值相同, 使比例系数 U 为 1, 将 X_2 、 Y_2 和 Z 脚接地, 即 $X_2 = Y_2 = Z = 0$, 根据公式(1)可知, 输出 $W = X_1 Y_1$ 。借助设计的 AD835 乘法器以实现模拟信号和 FSK 数字调制信号的合路处理。基于 AD835 乘法合路电路原理图如图 2 所示。

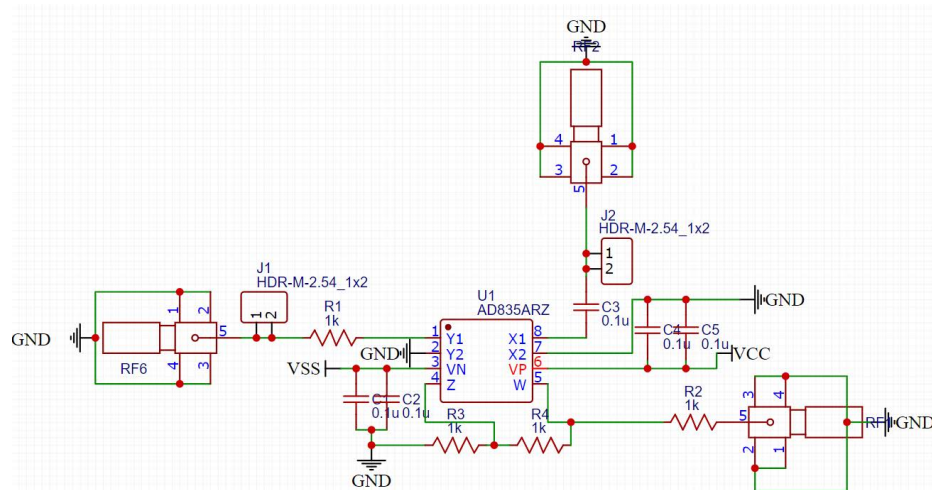


Figure 2. Based on AD835 multiplication circuit schematic diagram
图 2. 基于 AD835 乘法合路电路原理图

3.2. 基于 AD9959 的 DDS 电路设计

利用 DDS 电路产出调制与解调电路所需要的载波信号, 为满足系统带宽和低功耗等要求, 采用美国 AD 公司的 AD9959 高性能 DDS 芯片[11], 该芯片具有 4 通道、10 位 D/A 转换器、时钟为 500 MHz 的高集成度频率合成器, 可方便快速地产生线性调频、单频脉冲及步进频率信号。外围电路设计时, 为控制芯片内部 DAC 输出电流范围在 8~10 mA, 在 AD9959 芯片 DAC_RSET 管脚外接 2 k 电阻接地。芯片每个通道均有两个输出端 IOOUT 和 IOOUT# 为源极开路的电流输出, 为使输出为电压信号, 在每个输出端均需接 50 Ω 上拉电阻完成电流到电压的转换。由于芯片内部为直接数字合成波形, 输出有包括时钟频率在内的杂散频率干扰, 因此还需在输出端设置低通滤波器来有效滤除干扰。基于 AD9959 的直接数字频率合成器原理图如图 3 所示。

3.3. 选频接收电路的设计

利在无线信道中传输的信号, 会受到很大的衰减, 即便在信号发送端会进行放大, 但在接收端受到的信号由于衰减的影响, 接收到的信号很弱, 并且接收端会存在干扰信号, 因此我们希望将我们需要的有用信号放大, 而过滤掉干扰信号。利用 ERA-8SM+ 实现小信号放大, 它是一款提供高动态范围的宽带放大器, 具有信号增益高、增益平坦度好、输出功率和动态范围大、三阶互调小、噪声系数较小的特点。为使放大电路获得合适工作点, 根据 VCC 大小来设置 R_{15} 偏置电阻以提供适当电流。

解调采用的超外差结构是在通信收发机中最为广泛使用的一种结构[12], 其外差过程在接收机中是从天线接收的信号与本地振荡器产生的信号一起输入到一非线性器件得到中频信号, 或在发射机中将中频

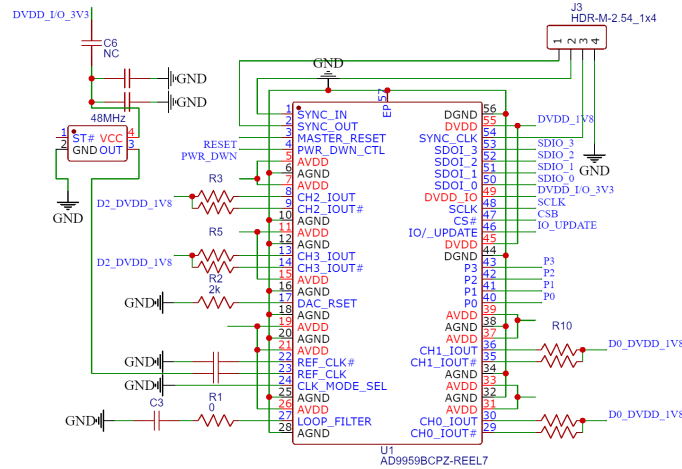


Figure 3. Schematic diagram of DDS circuit design based on AD9959
图 3. 基于 AD9959 的 DDS 电路设计原理图

变为射频信号。这个执行外差过程的非线性器件称为混频器或者变频器。在超外差收发机中，频率的搬移过程可能不止发生一次，因此它或将拥有多个中频频率和多个中频模块。基于超外差结构的接收解调电路原理：从天线接收的信号经小信号放大后与 DDS 产生的本振信号进入混频器，由积化和差公式

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)]$$

可知此时信号产生两个分量，由于混频器输出端接入的陶瓷滤波器仅通过 10.7 MHz 的差频信号，因此可设置不同的本振信号实现选频功能。

为实现本振信号和经放大的接收信号混频，选用 AD831 混频器。这是一款低失真、宽动态范围、单芯片的混频器，采用双差分模拟乘法器混频电路，具有+24 dBm 三阶交叉点，且三阶互调失真小，线性动态范围大。为完成下混频功能，在设计中注意到芯片内置了 50 Ω 电阻，因此需要在 IFN、IFP 和 Vpp 端跨接 560 pF 电容构成低通滤波器得到低频分量。由于本振频率在 100 MHz 上下时，其电平要求不同，为保证 AD831 安全工作，载波的选择应尽量在同一区间。由 ERA-8SM+和 AD831 构成的接收解调电路如图 4 所示。

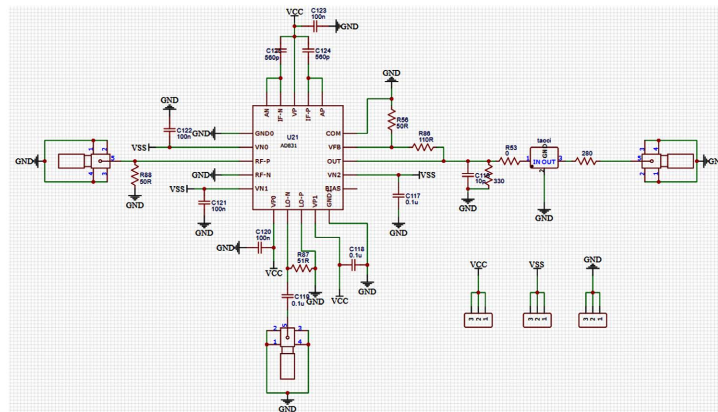


Figure 4. Schematic diagram of receiving demodulation circuit based on ERA-8SM+ and AD831
图 4. 基于 ERA-8SM+和 AD831 的接收解调电路原理图

3.4. 单端转差分电路的设计

为了得到数字和模拟两路信号，需要将接收信号进行分路解调。因此，设计单端转差分电路将接收到的单路信号差分输出。为尽可能减小差分与共模电压误差以及谐波失真，采用 AD8138 进行单端转差分电路的设计。AD8138 是现有谐波失真最低的差分放大器， -3 dB 带宽为 320 MHz。其独特的内部反馈特性，通过提供输出增益和相位匹配平衡来抑制偶数阶谐波。内部反馈电路则可以使外部增益设置电阻不匹配的任何相关增益误差最小。同时，AD8138 使用负反馈和高开环增益来强制设定差分与共模输出电压，使差分与共模电压误差降到最低。为避免因增益过大而导致信号失真，将差分输出信号增益设置为 1，参考手册阻值设置反馈和增益电阻 R_7 和 R_4 、 R_6 和 R_3 均为 499Ω 。基于 AD8138 的单端转差分电路原理图如图 5 所示。

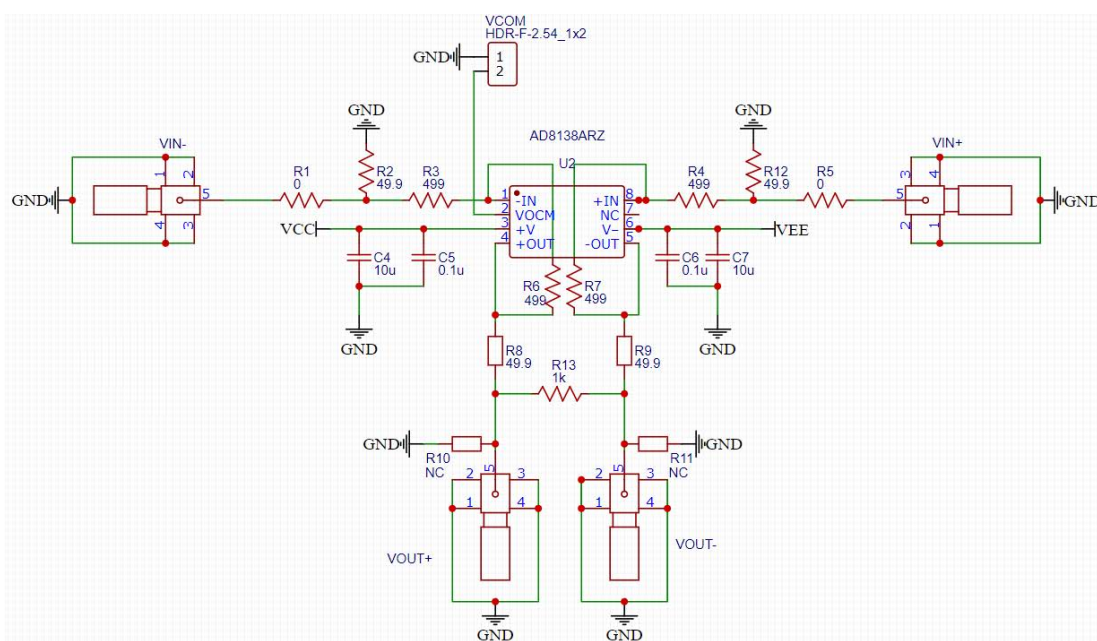


Figure 5. Schematic diagram of single-ended to differential circuit based on AD8138

图 5. 基于 AD8138 的单端转差分电路原理图

3.5. 数字信号解调电路的设计

将分离后(FSK)信号解调后进行编码，恢复原始数字信号并在 MCU 上显示。数字信号解调电路包括零中频混频电路、滤波、包络检波和电压比较器等。利用 ADL5801 零中频混频器将 FSK 信号与 FSK 低载波频率信号混频得到 ASK 信号，再进行低通滤波、包络检波来解调 ASK 信号，最后输入电压比较器整形，得到编码的数字信号。ADL5801 是一款高 IP3、10 MHz 至 6 GHz 有源混频器，该芯片利用一个高线性度双平衡有源混频器内核以及集成的本振缓冲放大器来提供高动态范围频率转换。为在达到混频效果时控制输出端的阻抗变换，设计时在 LO 和 RF 配置 1:1 传输型巴伦变压器发送单端信号，IF 端口配置为耦合型巴伦隔离输入输出。基于 ADL5801 的零中频混频电路原理图如图 6 所示。

4. 数模混合传输装置的软件设计

4.1. 发送端程序设计

根据硬件电路设计，发送端 MCU 中串口 4 和串口 5 分别连接于 AD9959 和串口屏，用于编码数字

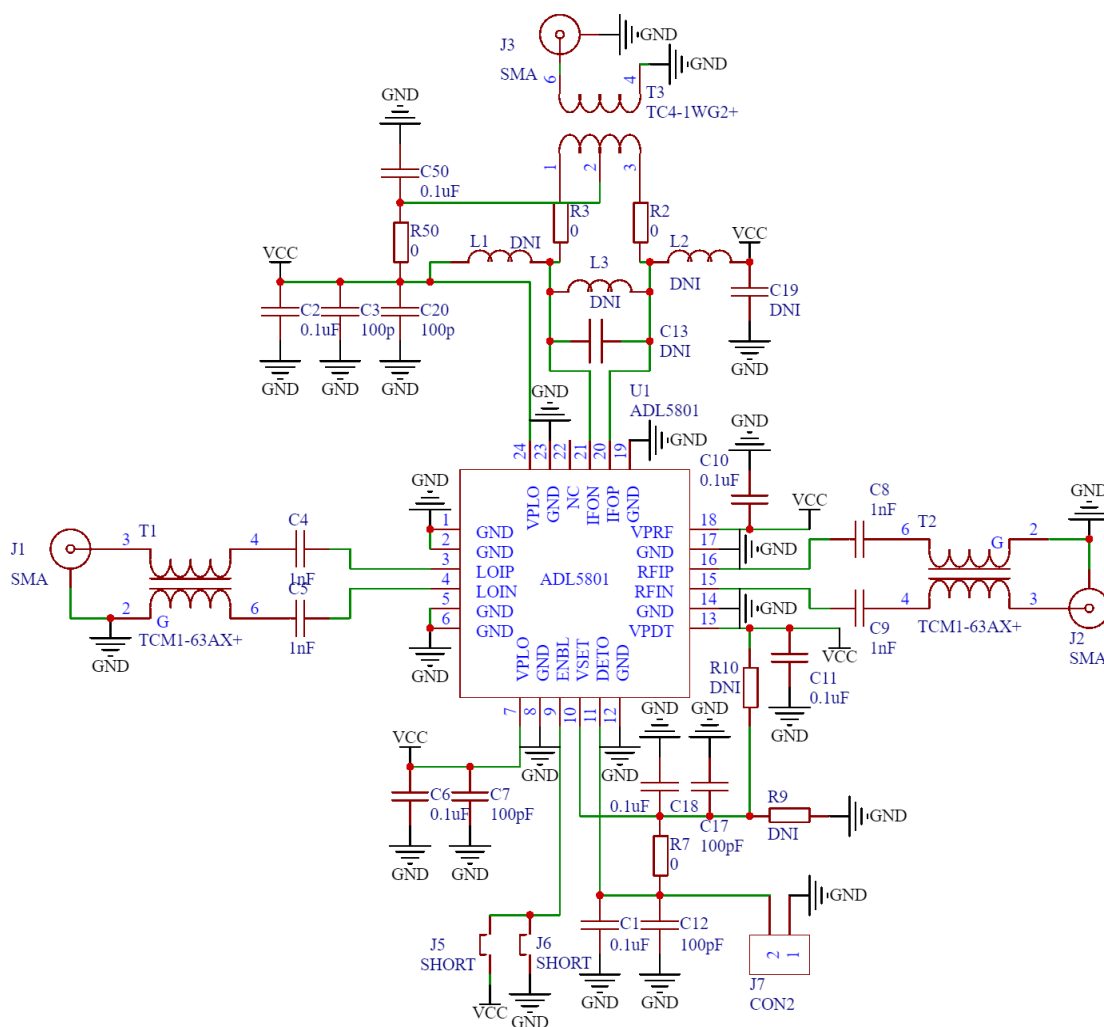


Figure 6. Schematic diagram of zero-IF mixer based on ADL5801
图 6. 基于 ADL5801 的零中频混频器原理图

信号输出和串口屏交互。对 AD9959 各个引脚和串口 4、5 进行初始化设置。串口 5 用于和串口屏的交互，在检测到串口 5 数据输入则进入中断读取传输变量后返回主函数。主函数中设计按键按下实现 FSK 信号是否发送。然后利用串口通信协议将数字信息以该格式进行编码并通过串口 4 的 TX 输出到 AD9959 进行 FSK 调制。其中 FSK 调制是通过 SPI 协议读写 AD9959 寄存器，二阶 FSK 需要首先设置功能和通道功能寄存器，接着分别设置 0 和 1 对应的频率，分别将十进制频率数转换为二进制频率控制字，最后写入频率控制字完成 FSK 信号的调制。

4.2. 接收端程序设计

首先对 AD9959 和数码管 TM1637 等进行初始化设置。在 AD9959 输出一个固定载波并且数码管闪烁一次后进入 while 循环，不断检测输入键值和接收到的数字信号。若检测到键值改变，则通过不同键值输出不同本地载波频率。在串口 4 的 RX 接收到符合串口通信协议格式的数字信号时，进入串口中断进行串口数据的解码并返回主函数，然后判断数值是否超限，若超限，则延时 5 s 后熄灭数码管，若未超限，则通过 IIC 协议将数据写入 TM1637 使数码管显示相应的数值。接收机程序流程图如图 7 所示。

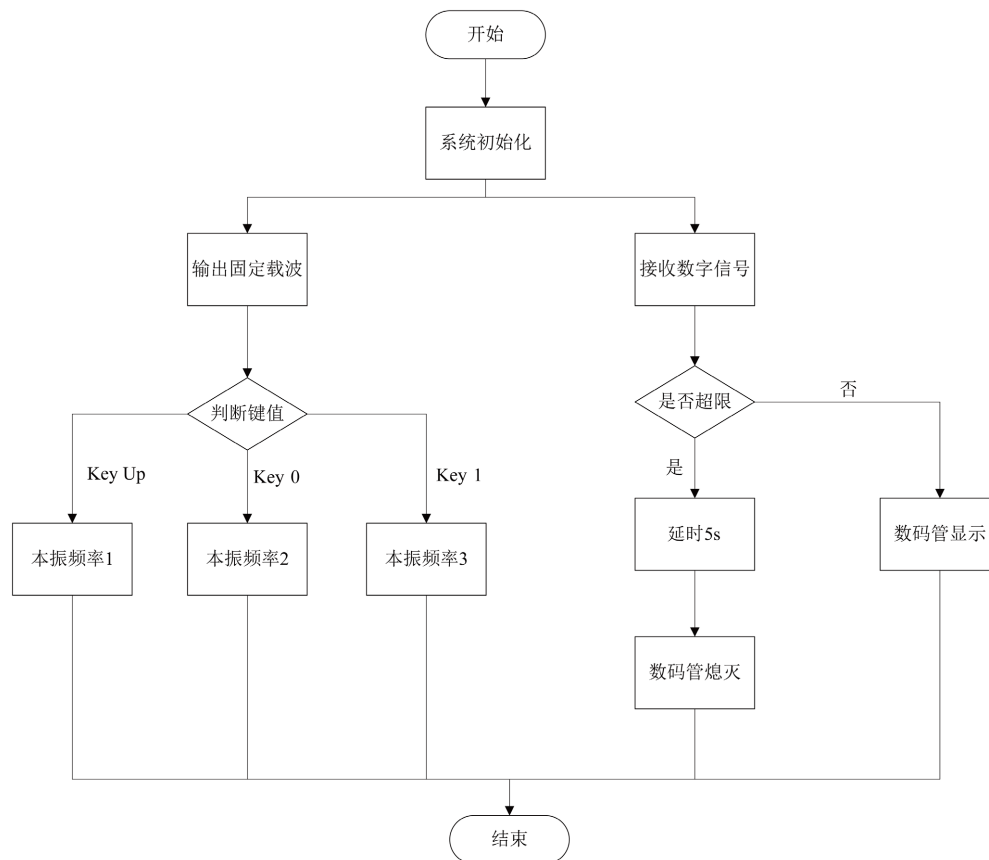


Figure 7. Program flow chart of the receiver
图 7. 接收机程序流程图

5. 数模混合传输装置的测试

5.1. 测试方案

系统测试主要包括单路模拟信号传输测试、单路数字信号传输测试以及数字-模拟混合传输测试。其中用信号源产生 50 Hz~10 KHz 的正弦波作为模拟信号，用串口屏输入 0~9 四位数字，经编码后作为发送端数字信号。通过控制模拟信号或 FSK 信号的接入实现单路信号或合路信号的调制解调。在合路端、电源端和模拟信号解调端预留测试端口 TP1、TP2 和 TP3。利用示波器分别观测合路电路输出端的混合信号时域波形和解调电路输出端的模拟信号，利用观察法直接测试数字信号的解调结果与显示效果，利用频谱仪和万用表分别观测混合信号的带宽及发送机功耗。

5.2. 系统测试评价

针对模拟信号的调制解调，从信号频率范围、输入输出频率误差、波形失真情况进行测试评价。数字信号的调制解调从响应时间、误码率等方面测试。整个系统还要对发送端功耗和合路信号带宽进行测试分析，其中带宽为已调信号的-40 dB 带宽。

5.3. 系统测试及结果分析

5.3.1. 单路模拟信号的测试分析

发送端 FSK 信号控制按键未按下，表明仅有模拟信号作为合路电路的输入，数字信号未接入，数码

管处于熄灭状态。利用外接信号源产生 50 Hz~10 KHz 正弦波作为输入信号, 利用频谱仪和示波器分别观察 TP1 测试端口的频谱和 TP3 测试端口的波形。单路模拟信号调制与解调的测试结果如表 1 所示。

Table 1. Test results of a single analog signal

表 1. 单路模拟信号测试结果

输入频率/Hz	输出频率/Hz	频率误差/%	波形失真情况	带宽/Hz
50	50.51	0.10	无	100
100	99.96	0.04	无	200
500	499.48	0.10	无	1000
1000	1000.73	0.07	无	2000
5000	4999.83	0.00	无	10,000
10,000	10,005.00	0.05	无	20,000

5.3.2. 单路数字信号的测试分析

发送端断开外接信号源, 按下 FSK 信号输入控制按键, 表明仅有数字信号作为合路信号的单路输入。利用串口屏随意键入 4 个 0~9 的一组数字, 并按下发送键, 在接收端显示键入的数字。通过多次实验发现, 单路数字信号的显示准确, 数码管平均响应时间在 1 s 之内, 当按下发送停止键后, 在发送端清除已传数字的显示, 接收端显示管延迟 5 s 后自动熄灭。

5.3.3. 数字 - 模拟信号混合传输测试

发送端按下输出 FSK 信号的按键并接入模拟信号。当发送端模拟语音信号输入频率范围为 50 Hz~10 KHz 的正弦波时, 同时键入一组数字, 该组数字经编码后的信号作为发送端数字信号, 通过合路信号进行数字与模拟信号的混合处理, 进而实现合路调制与后期的接收与分离解调。系统测试过程中, 通过串并联万用表测量发送机输入电压与电流, 并用频谱仪观测混合信号带宽。经测试, 当发送端发送数字-模拟混合信号时, 接收端数字显示正确, 模拟信号波形无明显失真。系统运行平均功耗为 6 W, 最大带宽为 24.6 KHz。系统测试图如图 8~10 所示。

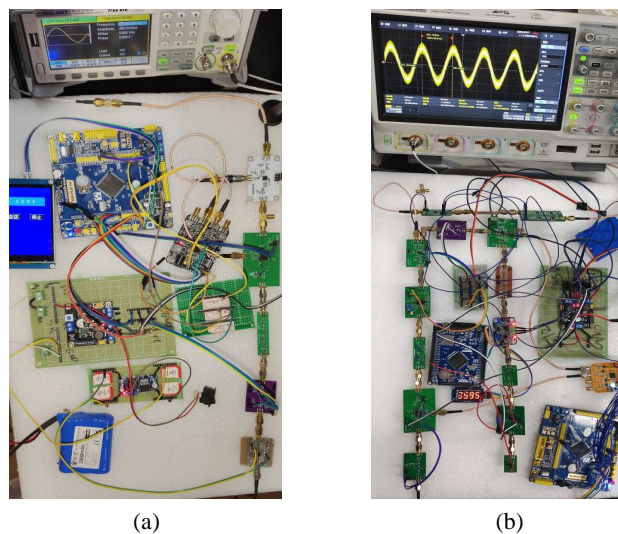


Figure 8. Test result diagram of digital-analog hybrid transmission system. (a) Transmitter part; (b) Receiver part

图 8. 数模混合传输系统测试结果图(50 Hz 模拟正弦波, 数字信号为 3595)。(a) 发送机部分; (b) 接收机部分

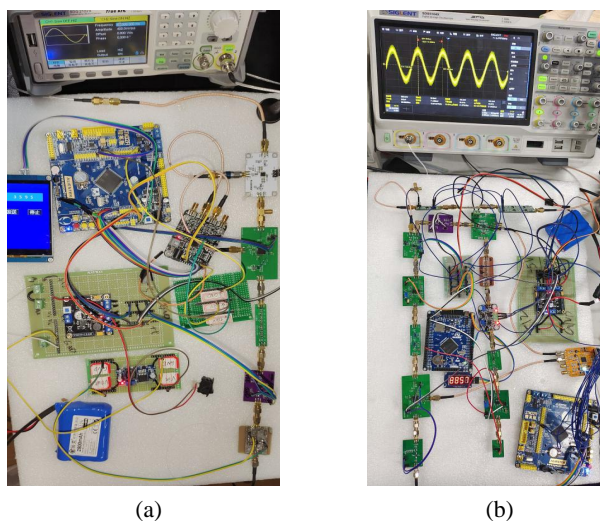


Figure 9. Test result diagram of digital-analog hybrid transmission system.
(a) Transmitter part; (b) Receiver part

图 9. 数模混合传输系统测试结果图(10 KHz 模拟正弦波, 数字信号为 8857)。(a) 发送机部分; (b) 接收机部分

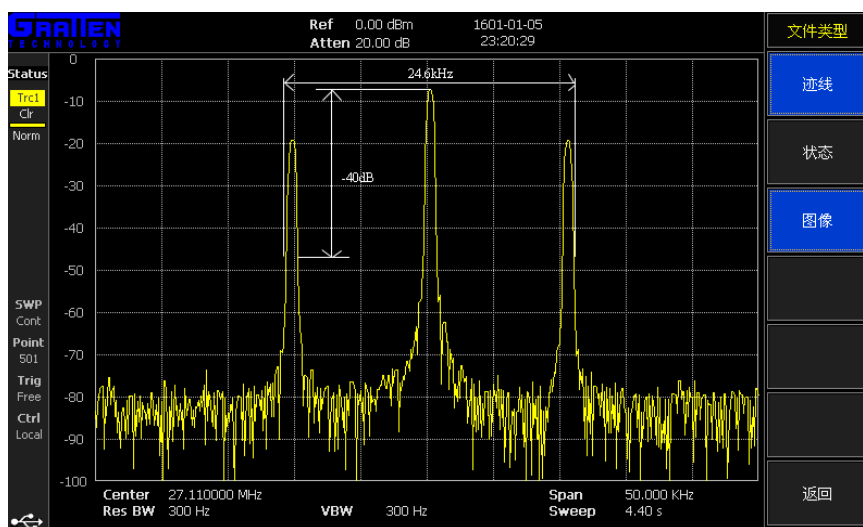


Figure 10. Bandwidth measurement diagram of digital-analog hybrid transmission system
图 10. 数模混合传输系统带宽测量图(10 KHz 模拟正弦波)

6. 总结

设计并制作了一套数字 - 模拟混合传输装置, 能够实现 50 Hz~10 KHz 范围内模拟信号、一组 4 位数字组成的数字信号的独立与合路同传, 系统在 2 m 内可稳定传输, 频带宽度不大于 25 KHz。该装置发送端将模拟信号和 FSK 数字信号合路后通过天线发射, 接收端采用超外差结构接收, 将信号降至中频后分离解调, 模拟信号直接采用包络检波解调, FSK 数字信号经混频转化成 ASK 信号后再进行包络检波解调。经测试, 系统实现了对单路模拟信号 50 Hz~10 KHz、单路数字信号和数字 - 模拟混合信号的调制与解调, 信道带宽小于 25 KHz, 稳定传输距离接近 2 m, 模拟信号解调无明显失真, 数字信号显示正确, 系统响应时间小于 1 s, 当数字信号停止发送后, 接收端显示管在延迟 5 s 后自动熄灭。

本系统采用了 FSK 转换 ASK 解调[13]的方法, 其优点在于充分利用 FSK 信号抗干扰性强的特点,

系统无需提取同步载波,有效减少了解调设备成本,4 KHz 的载波跳频节省了带宽资源,提高信道的传输性能。但该方案仅适合特定要求的无线收发系统[14]的设计,对更高要求的数字-模拟信号同传,还需要在调制与解调方式、FPGA 控制等方面加以改进与优化[15] [16]。

基金项目

浙江省高等教育“十三五”教学改革研究项目(jg20190138);国家级大学生创新训练项目(202110338020);浙江理工大学科创训练项目。

参考文献

- [1] 高华宇,王玲,潘欣裕,许凯,李德,史经允,等.基于模拟乘法器的幅度调制解调系统[J].物联网技术,2021,11(9):18-20+23.
- [2] 张志民,李红梅,詹武平.一种改进的软件无线电 FM 信号解调方法[J].软件工程与应用,2020,9(2):109-115.
<https://doi.org/10.12677/SEA.2020.92013>
- [3] Yip, W.C., Welch, C., Mehl Georg, H. and Wilkinson, T.D. (2020) Analog Modulation by the Flexoelectric Effect in Liquid Crystals. *Applied Optics*, **59**, 2668-2673. <https://doi.org/10.1364/AO.386096>
- [4] 张伟.基于虚拟仪器的模拟信号调制与解调的研究[J].南方农机,2019,50(6):22.
- [5] 宋文生,曾丽珍,黄锋锋,熊平骥.基于模拟调制方式的高速脉冲信号光纤传输[J].光通信技术,2019,43(8):59-62.
- [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).[出版者不详],2019:269-271.
- [7] 李国诚,黄明,丁照雨,徐泽琨,曹愿栋.基于 FPGA 的 AM 数字调制解调设计验证与分析[J].工业技术创新,2019,6(1):36-42.
- [8] 乔雅.2ASK 数字频带数字调制系统仿真设计及实现[J].陕西交通科教研究,2021(2):1-4.
- [9] 刘新红.FSK 调制解调电路仿真实现[J].电子制作,2021(2):35-37.
- [10] 谭洋,刘建鑫,赵仕良.基于 AD835 的正弦波测幅[J].实验室研究与探索,2021,40(9):57-60.
- [11] 王睿庭.基于 AD9959 与 STM32 的 DDS 扫频信号源设计[J].电子测试,2020(10):30-31+59.
- [12] 王灵芝,凌佳乐,蔡萍,王志辉,陈颖频.便携式 80-120 MHz 频谱分析仪设计[J].闽南师范大学学报:自然科学版,2021,34(2):79-85.
- [13] 马克才.2ASK 调制解调的 System view 仿真研究[J].电子世界,2021(14):29-30.
- [14] 李松凯,张立立,鲍玉斌.频率调制的小型无线收发系统的设计与实现[J].电子世界,2021(14):124-126.
- [15] 张晋瑛,任勇峰,单彦虎,刘艳莉,武慧.基于 FPGA 的可调节信号发生器的设计与实现[J].电子设计工程,2019,27(22):137-141.
- [16] Liu, S. and Gan, G. (2021) Novel DDS Based OFDM Transmitter Structure without IFFT and Interpolation Filter. *China Communications*, **18**, 219-229. <https://doi.org/10.23919/JCC.2021.12.014>