

# 2024 年江苏省大学生电子设计竞赛 (TI 杯)

题目：无线传输信号模拟系统

题目编号：         C        

参赛队编号： NJ222  
参赛队学校： 南京工业大学  
参赛队学生： 史经辞 陈治晗 刘国涛

二〇二四年七月

# 无线传输信号模拟系统（C 题）

## 摘要

本系统是基于 DDS 信号发生模块的无线传输信号模拟产生装置，用于模拟产生无线传输信号的系统，包括模拟产生直达传输信号和多径传输信号，并合路得到模拟的无线传输信号。该系统是由程控放大增益电路、射频直流偏置电路、乘法器电路、加法电路组成。其中程控放大增益电路用来步进调节载波的幅值，直流偏置模块用来调节 AM 波的调制度，然后使用 AD835 乘法电路进行调制，DDS 信号发生模块可以调节信号的时延和相位最后使用加法器将直达传输信号和多径传输信号合路产生无线传输信号。测试时，可以通过使用串口屏来调节频率、幅值、调制度等参数，本系统能够较好地模拟产生三种信号。

关键词：振幅调制 高频信号 模拟放大

## 一、系统方案

### 1.1 无线传输信号模拟系统

题目关于设计一个无线传输信号模拟系统的说明。系统的任务是模拟产生无线传输信号，包括直达传输信号和多径传输信号，并将其合并以得到模拟的无线传输信号。直达信号的初始相位和幅值可调，多径信号相对于直达信号的时延、初相和幅值衰减也可调。

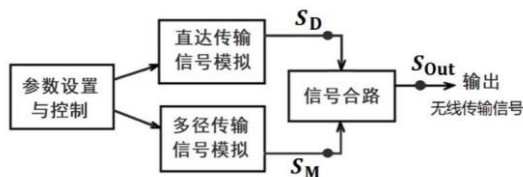


图 1 无线传输信号模拟系统

### 1.2 解决方案流程图

我们使用 AD9959 信号发生模块产生 CW 载波，幅值可调为 0~500mVpp，频率为 30~40MHz，使用 AD603 程控放大器可以调节有效值范围为 100mV ~ 1V，信号发生模块可以产生 MW 调制信号，幅值为 0~500mVpp，频率为 2MHz 的正弦波。

系统通过使用程控放大器对 AM 波进行幅度的增益，调节射极直流偏置电路，调节调制信号的直流偏置来改变调制度，并且使用 AD835 乘法器，将载波和调制信号进行调制，分别产生直达传输信号和多径传输信号，最后通过加法器将两路信号进行合成。

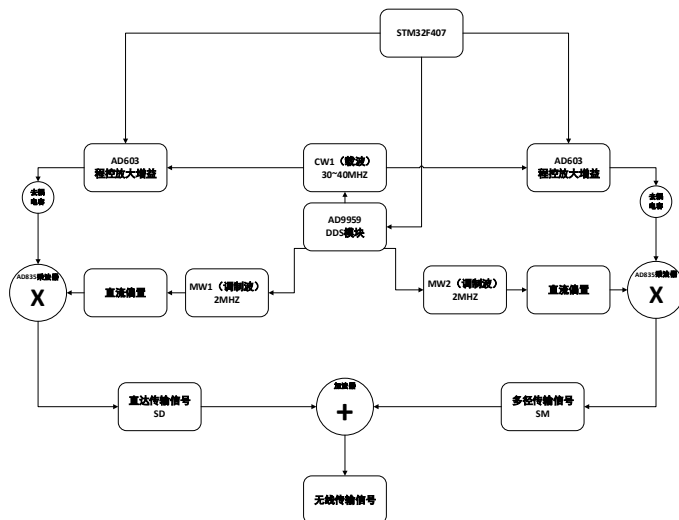


图 2 解决方案流程框图

## 二、理论分析与计算

### 2.1 产生直达信号 $S_D(t)$

使用 AD9959 产生调制波，调制波幅值为  $A_m$ ，频率为  $f_m$

$$S(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad (1)$$

使用直流偏置电路在调制波上加上直流量  $A_0$

$$S(t) = A_0 + A_m \cos(2\pi f_m t) \quad (2)$$

使用 9959 产生载波，幅值为  $A_c$ ，频率为  $f_c$

$$C(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \quad (3)$$

最后使用 AD835 乘法器进行调制，得到直达信号  $S_D(t)$

$$S_D(t) = A_c [A_0 + A_m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (4)$$

## 2.2 产生多径传输信号 $S_M(t)$

在产生直达信号流程的基础上，通过在乘法器调制前，对载波  $C(t)$  的幅度和相位进行处理。处理后的载波公式为：

$$C(t) = \lambda A_c \cos[2\pi f_c (t + \tau)] \quad (5)$$

其中  $\lambda$  为放大倍数， $\tau$  为时延范围。

最后产生的多径信号为：

$$S_M(t) = \lambda A_c [A_0 + A_m \cos(2\pi f_m t)] \cos[2\pi f_c (t + \tau)] \quad (6)$$

其中  $S_M$  和  $S_D$  之间的相位差可以通过 DDS 内部进行调整：

$$S_M(t) = \lambda A_c [A_0 + A_m \cos(2\pi f_m t)] \cos[2\pi f_c (t + \tau) + \varphi] \quad (7)$$

## 2.3 合路输出无线传输信号 $S_{OUT}$

使用加法器将  $S_M$  和  $S_D$  合成出  $S_{OUT}$

$$S_{OUT}(t) = \lambda A_c [A_0 + A_m \cos(2\pi f_m t)] \cos[2\pi f_c (t + \tau) + \varphi] + A_c [A_0 + A_m \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t)$$

# 三、电路与程序设计

## 3.1 电路设计

### 3.1.1 AD9959 信号发生模块

AD9959 由四个直接数字频率合成器（DDS）内核构成，可用于校正信号之间由滤波、放大等模拟处理或 PCB 布局失配而引起的不平衡问题。所有通道共享一个公共系统时钟，因此它们具有固有的同步性，属于同一个信号源，并且支持多个设备的同步。

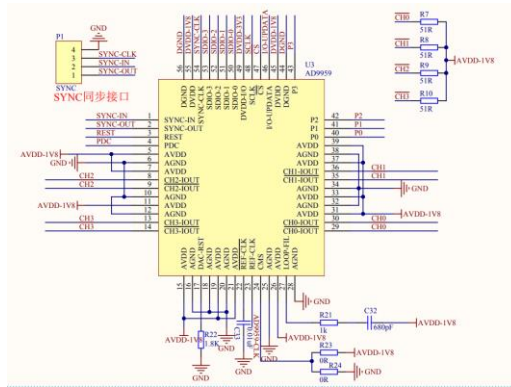


图 3 AD9959 信号发生模块原理图

### 3.1.2 AD603 程控放大器

AD603 带内纹波较大，而两级级联时最大增益可达 60dB，因此，模块中在两级 AD603 中间加了低通滤波器使通带内平坦；为拓宽其增益的设置范围，本模块的最后一级设计了放大电路，改变电阻值就可以改变其放大倍数，最后一级默认放大增益为 6dB；

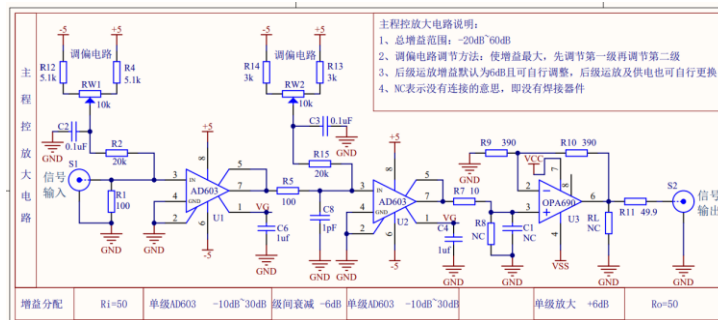


图 4 AD603 程控放大器原理图

### 3.1.3 乘法器 AD835 电路

使用乘法器 AD835 电路实现以下功能：

$$S_D(t) = C(t) * S(t)$$

$$S_M(t) = C(t) * S(t)$$

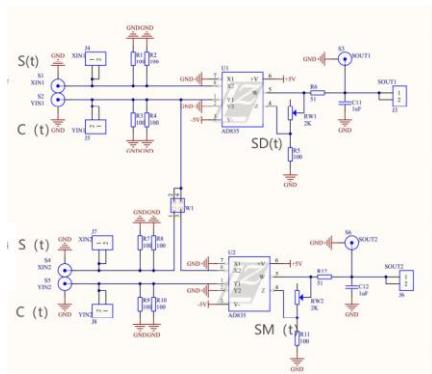


图 5 乘法器原理图

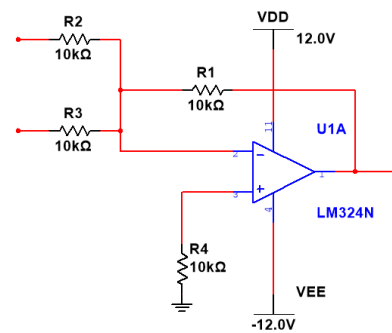


图 6 加法器原理图

### 3.1.4 加法器

增益为 1，运算规则： $C = A + B$

### 3.2 程序设计

本设计使用 STM32F407 单片机来完成，该单片机主要是控制 AD9959 信号发生模块来改变载波 CW 和调制波 MW 的频率、振幅、相位等参数，以及调节 DAC 改变调制波的直流偏量，从而改变直达传输信号和多径传输信号参数。

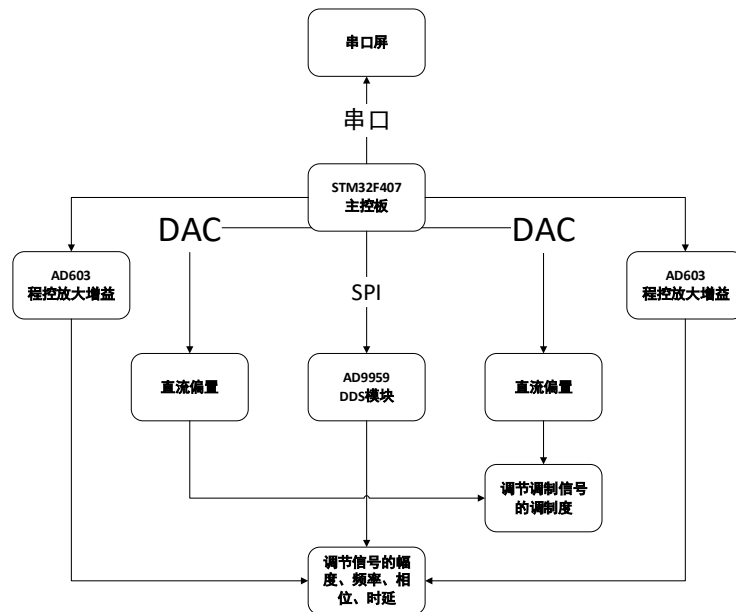


图 7 程序设计流程图

## 四、测试方案与测试结果

### 4.1 信号仿真

使用 MATLAB 软件进行信号的仿真，得到以下结果：

从上到下分别为直达信号、直达信号延时处理、相位处理、衰减处理、与多边信号合成的信号。

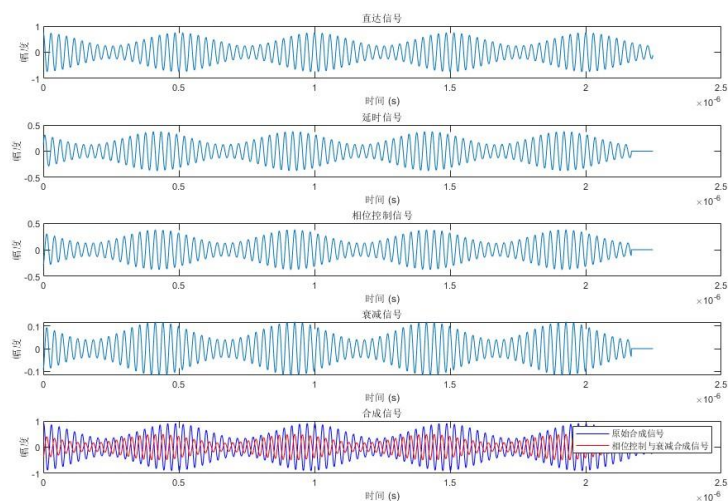


图 8 MATLAB 仿真波形图

## 4.2 测试方案

### 4.2.1 测试要求（1）

1) 产生连续波（CW）信号或调幅（AM）信号。对于 AM 信号，其调制信号为 2MHz 频率的正弦信号。

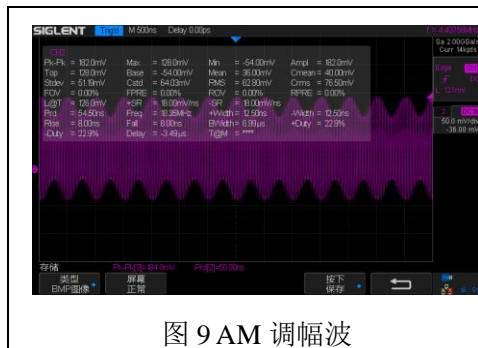


图 9 AM 调幅波

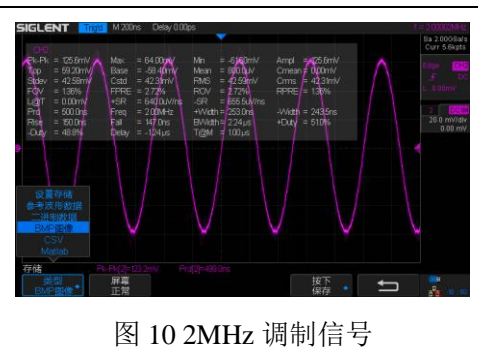


图 10 2MHz 调制信号

2) 直达传输信号 SD，载波幅度有效值可设置，有效值范围为 100mV ~ 1V，以 100mV 的步进。

表 2 载波幅值测量数据（使用 40MHz 的载波进行测量）

理论值（mVrms）	100	200	300	400	500
实际值（mVrms）	100.41	202.32	301.23	399.52	498.23
误差（mVrms）	0.41	2.32	1.23	0.48	1.77
理论值（mVrms）	600	700	800	900	1000
实际值（mVrms）	604.2	702.35	806.12	903.1	1004.1
误差（mVrms）	4.2	2.35	6.12	3.1	4.1

3) 对于 AM 信号，其 AM 调制度可设置，调制度范围为 30%~90%，以 10%的步进可调。

$$\text{对于调制度 } M_a = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\max} + U_{\min}}$$

表 3 AM 调制度

理论值	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
$U_{\max}$ (mv)	176	226	196	264	288	302	252
$U_{\min}$ (mv)	94	95	70	64	46	27	12
$M_a$	30.4%	40.8%	47.3%	60.98%	72.5%	83.6%	90.9%
误差	0.4%	0.8%	2.7%	0.98%	0.5%	3.6%	0.9%

下图为调制度 30%、50%、90% 的 AM 波形图

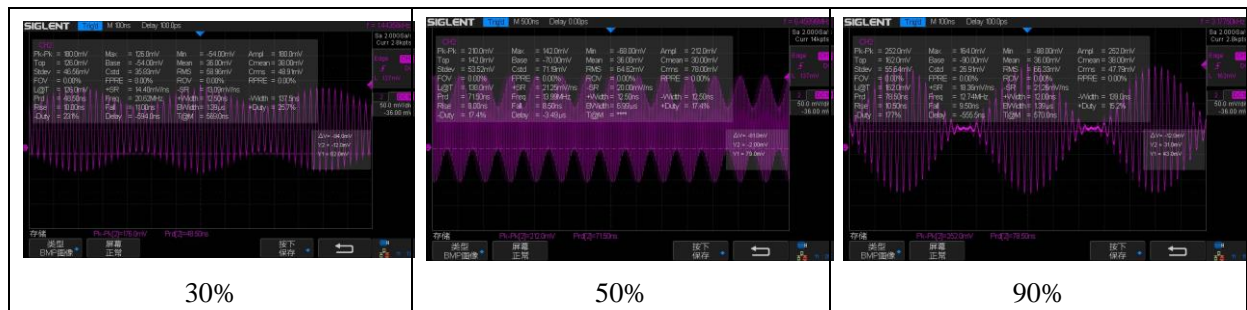


图 11 三种不同调制度的 AM 波形图

4) 模拟产生的多径传输信号 SM，其幅度衰减和时延可设置。相对直达信号，多径信号的时延范围为 50 ~ 200 ns，以 30ns 的步距步进可调。

（黄色波形为直达信号 SD，紫色波形为多径传输信号 SM）

下图为 30ns 的时延调节，紫色光标之间为 30ns 的时延差。

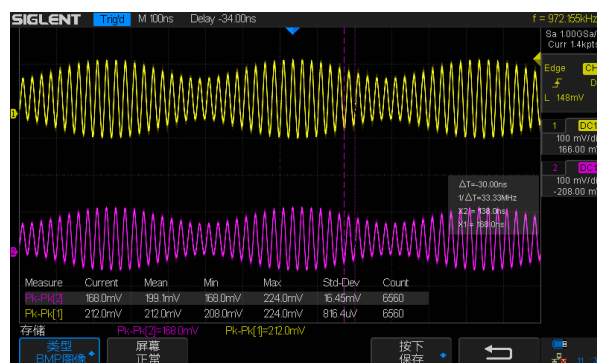


图 12 30ns 时延调节

5) 幅度的衰减范围为 0 ~ 20 dB，以 2 dB 的步进可调。

测量部分数据

表 4 衰减度测量数据

理论衰减度	2dB	8dB	10dB	16dB	20dB
-------	-----	-----	------	------	------



$V_{ppSD}$ (mv)	212	212	212	212	212
$V_{ppSM}$ (mv)	172	88	72	36.8	23.6
实际衰减度	1.816 dB	7.63 dB	9.38 dB	15.2 dB	19.36 dB
误差	0.184 dB	0.37 dB	0.62 dB	0.8 dB	0.64 dB

#### 4.2.2 测试要求 (2)

模拟产生载波频率覆盖 30 ~ 40MHz 波段的无线传输信号，载波频率  $f_c$  以 1MHz 为步进可设置。

1) 模拟产生直达传输信号 SD，在 30MHz ~ 40MHz 范围内设置载波频率，测量直达传输信号 SD，载波幅度有效值可设置，有效值范围为 100mV ~ 1V，以 100mV 的步进。分别测量 30MHz、35MHz、40MHz 的部分数据：

( I )30MHz 部分数据：

载波幅值测量数据（使用 40MHz 的载波进行测量）

理论值 (mVrms)	100	400	800	1000
实际值 (mVrms)	98.99	392.4	799.0	1011.1
误差 (mVrms)	1.01	8.6	1	11.1

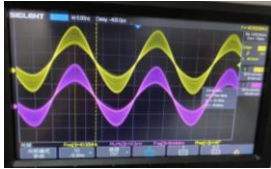
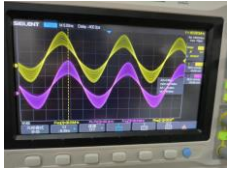
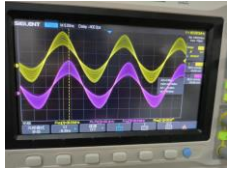

( II )35MHz 部分数据：

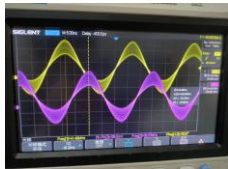
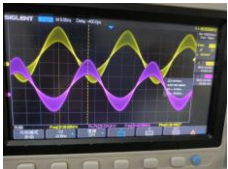
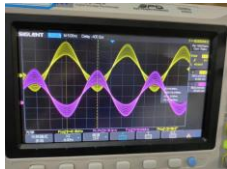
理论值 (mVrms)	100	400	800	1000
实际值 (mVrms)	104.65	395.97	806.1	1018.2
误差 (mVrms)	4.35	4.03	6.1	18.2

(III)40MHz 部分数据：

理论值 (mVrms)	100	400	800	1000
实际值 (mVrms)	100.41	399.52	806.12	1004.1
误差 (mVrms)	0.41	0.48	6.12	4.1

2) 模拟产生多径传输信号 SM，相对直达信号 SD 的初始相位可设置，设置范围为 0 ~ 180° 以 30° 的步进可调。（黄色为 SD、紫色为 SM）

理论值	0°	30°	60°	90°
实际值	0°	33.12°	63.36°	93.6°
实际波形				
误差	0°	3.12°	3.36°	3.6°
理论值	120°	150°	180°	
实际值	120.96°	151.2°	181.44°	

实际波形				
误差	0.96°	1.2°	1.44°	

3) 30 ~ 40MHz 波段的无线传输信号，载波频率  $f_c$  以 1MHz 为步进可设置，其中直达传输信号 SD 和多径传输信号 SM，测量结果都在误差范围内。

### 4.2.3 测试要求 3

使用加法器将 SD 和 SM 相加得到一下合路波形：

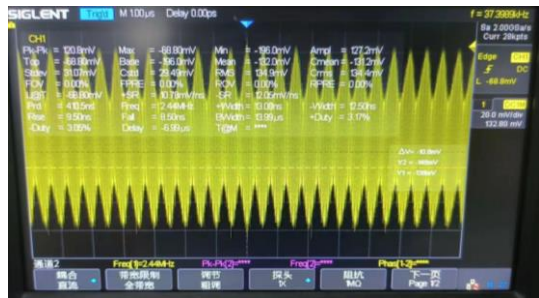


图 13 无线传输信号

## 五、总结

本系统基于 STM32F407，设计开发一个无线传输信号模拟系统，基于 AD9959 信号发生模块和 AD835 乘法器，实现对无线信号的模拟产生。该系统能够生成直达传输信号和多径传输信号，并将两者合并以模拟无线信号的传输效果。系统的主要组成部分包括程控放大增益电路、射频直流偏置电路、乘法器电路和加法器电路，能够有效地模拟无线信号的传输特性，且在实验测试中表现良好。

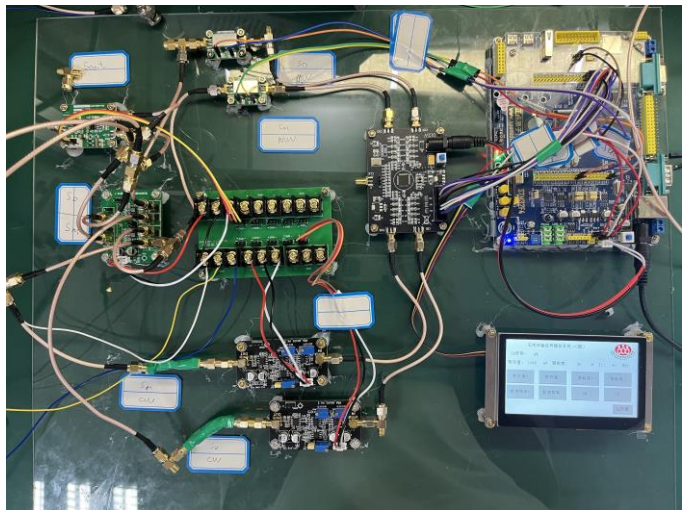


图 14 作品实物图