

# 基于 Simulink 的模拟通信系统仿真设计

黄泽熙 陈子晗 王茂林 王一帆 李锘

(电子科技大学 英才实验学院 611731)

**摘要：**模拟通信系统是现代通信理论的基石，对其工作原理的分析是理解现代通信原理的一个有效途径。本文利用 Simulink 工具箱搭建了一个基于成都调幅广播通信系统的多信道模拟通信系统模型，讨论了多信道、不同调制方式以及不同信道情况对系统性能的影响，可用于随机信号分析、信号与系统和通信原理等课程的教学案例。

**关键词：** 模拟通信系统 Simulink 教学案例

# Analog Communication System Design Based on Simulink Toolbox

Zexi Huang Zihan Chen Maolin Wang Yifan Wang Nuo Li

( Yingcai Honors College University of Electronic Science and Technology of China  
611731 )

**Abstract:** Analog communication system is the cornerstone of modern communication theory, and analyzing its rationale is an effective approach to gain insight of modern communication principles. Here, we construct a multi-channel analog communication system based on Amplitude-Modulation (AM) broadcast system in Chengdu with Simulink toolbox and discuss the influence of modulation methods and channel conditions on the multiple-channel system performance. This may serve as an educational example in courses such as Random Signal Analysis, Signal and System and Communication Principles.

**Key words:** Analog Communication System Simulink Educational Example

# 1. 引言

模拟通信系统作为经典的现代模拟通信系统案例，在随机信号分析、信号与系统、通信原理等课程中均属于重要的教学内容.以调幅广播通信系统为例，大部分教材仅对原理进行讨论[1, 2]，对具体的仿真仅限于部分模块[3, 4]或者整个系统[5].

本文利用 MATLAB 的 Simulink 工具箱，实现了对多种形式的模拟通信系统的搭建与仿真工作，分析了真实信号在通过各模块前后的时域与频域性质. 在调制解调方面，对幅度调制 AM 和频率调制 FM 两种不同的调制方法进行了具体的实现；在信道方面，讨论了不同信噪比的高斯白噪声以及瑞利衰落对系统性能的影响. 同时，为了使设计结果与现实情况接轨，设计中采用了 4 条信道复用的模式，采用的频段与成都人民广播电台的频段保持一致，而样本则从真实的广播信号 BBC World Service 里提取. 通过对输入与输出音频文件的播放，学生可以直观地感受真实信号在各种形式的模拟通信系统下的传输效果，体会噪声和其他信道因素对信号的影响.

本文的组织结构如下：第 1 节简单介绍本文内容；第 2 节详细介绍系统各个模块的具体实现以及原理分析；第 3 节分析真实信号通过系统的具体结果；最后在第 4 节中做出总结.

# 2. 方案与原理

## 2.1. 仿真环境及输入输出设置

本次设计的整体仿真环境为 MATLAB 9.0.0.341360 (R2016a)，对应 Simulink 工具箱的版本为 8.7 (R2016a). 输入数据由工作空间读入，之后输出至工作空间，不限制输出数据的大小，仿真步长设定为固定步长，仿真时间为信号时域长度，利用 ode3 算法进行仿真.

我国调幅广播波段的频带范围为  $550kHz \sim 1605kHz$ . 根据 Nyquist 采样定理，系统仿真时的采样率  $f_s$  应满足

$$f_s > 2f_{\max} = 3210kHz \quad (1)$$

为避免交叠，取

$$f_s = 5000kHz \quad (2)$$

作为采样频率，那么对应的仿真步长为

$$t_s = \frac{1}{f_s} = 2 \times 10^{-7} s \quad (3)$$

对于音频输入输出方法，主要采用 MATLAB 的音频接口函数 audioread 和 audiowrite，本设计中的音频文件为.wav 格式的音频文件，其默认采样率为

$$f_{s0} = 44100 \text{ Hz.} \quad (4)$$

具体的实现方法见附录.

为了使学生能够清楚地认识信号经过各个模块的时域和频域特性的变化, 利用 `plot` 函数和 `fft` 函数实现信号的时域和频域输出, 方法见附录.

在实现多信道时, 各个信道的输入信号需要合成成一个输入信号矩阵输入系统, 方法见附录. 在各个模块间将本模块的输出信号转换为下一模块的输入信号的方法见附录.

## 2.2. 模拟通信系统整体架构

本设计中, 模拟通信系统的整体框架结构如图 1 所示. 该模拟通信系统分别对应实际模拟广播电台的三个部分, 即由调制模块和复用模块对应发射端广播电台部分, 由信道对应实际信号在大气传播部分, 用解复用模块和解调模块对应接收端收音机部分. 在调制和解调模块, 分别设计了调幅和调频两种调制解调模式; 在复用和解复用模块, 使用了模拟通信系统中常用的频分复用的形式, 并测试了简单的不带编码的时分复用形式; 在信道模块, 设计了加性高斯白噪声信道和瑞利衰落信道两种形式. Simulink 搭建的系统模型如图 2.

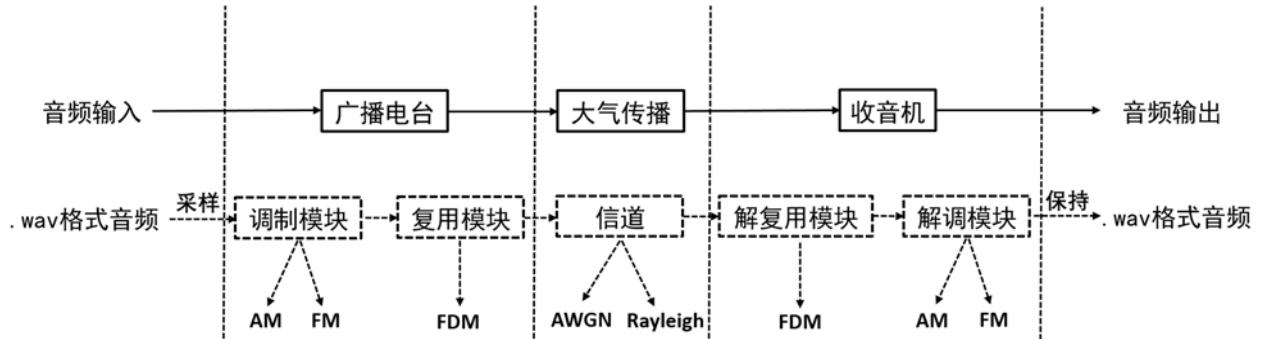


图 1 模拟通信系统的框架结构图

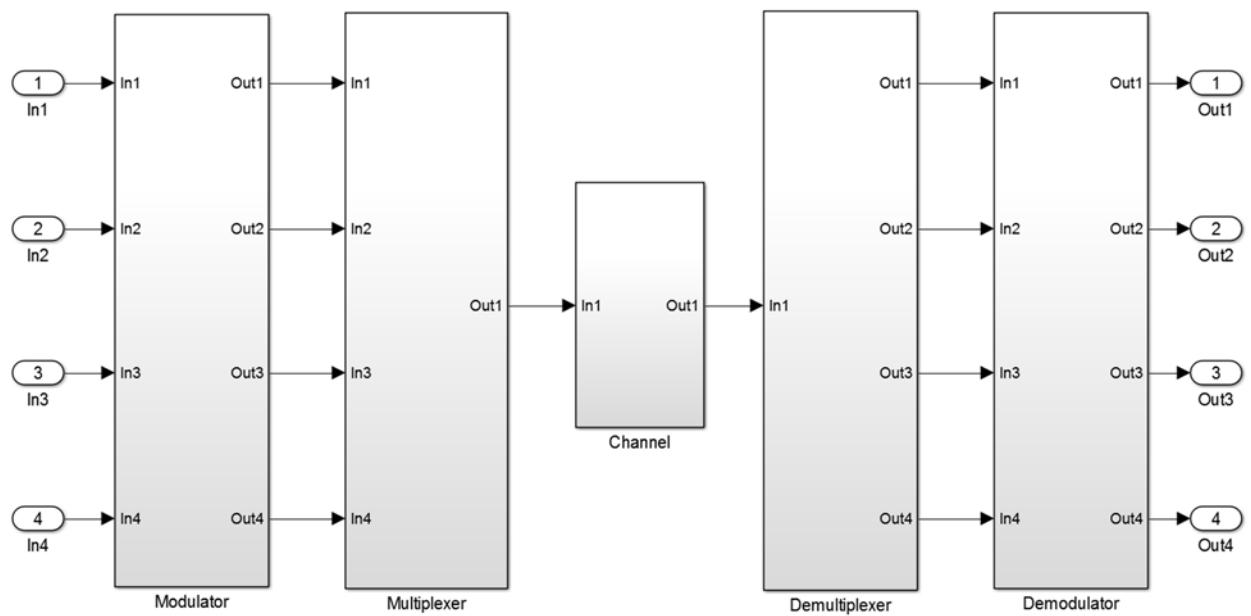


图 2 Simulink 系统整体模型图

## 2.3. 调制模块

### 2.3.1. 幅度调制

考虑输入信号  $f(t)$ , 载波频率  $\omega_c$ , 则幅度调制后信号的时域表达式为

$$S_{AM}(t) = (A_0 + f(t)) \cos(\omega_c t + \varphi) \quad (5)$$

其中  $A_0$  为直流分量, 为保证包络检波时不失真, 应保证

$$A_0 + f(t) \geq 0 \quad (6)$$

幅度调制的模块的模型为 AM\_Modulator\_Unit.slx, 模块图为图 3 所示.

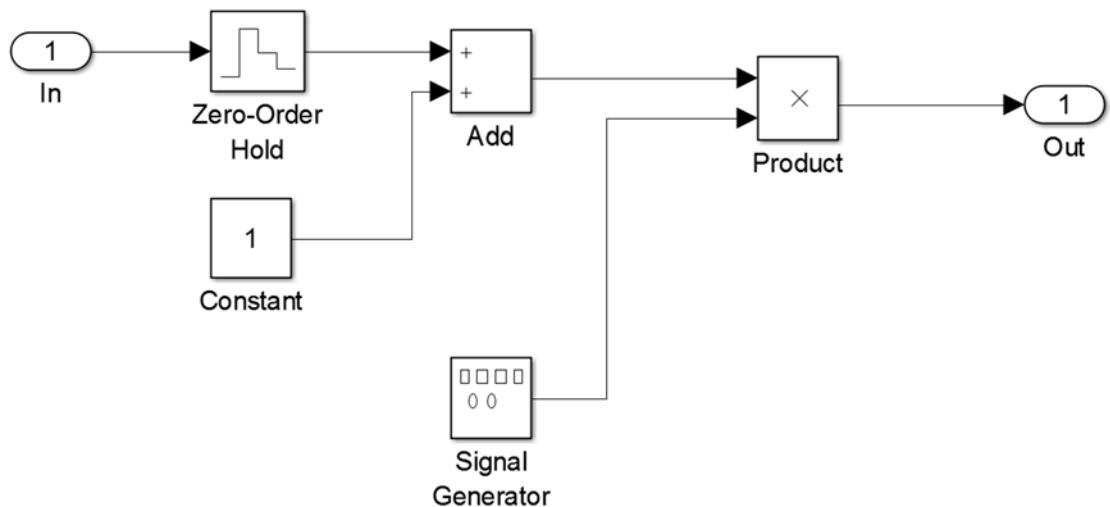


图 3 调幅模块模型图

### 2.3.2. 频率调制

窄带调频信号可看成由正交分量和同向分量的合成, 即

$$S_{NBFM}(t) \approx A \cos \omega_c t - A K_{FM} \int f(t) dt \sin \omega_c t \quad (7)$$

其中  $A$  为载波幅度,  $\omega_c$  为载波频率,  $K_{FM}$  为调频指数. 因此, 可采用如图 4 所示的方式来实现窄带调频.

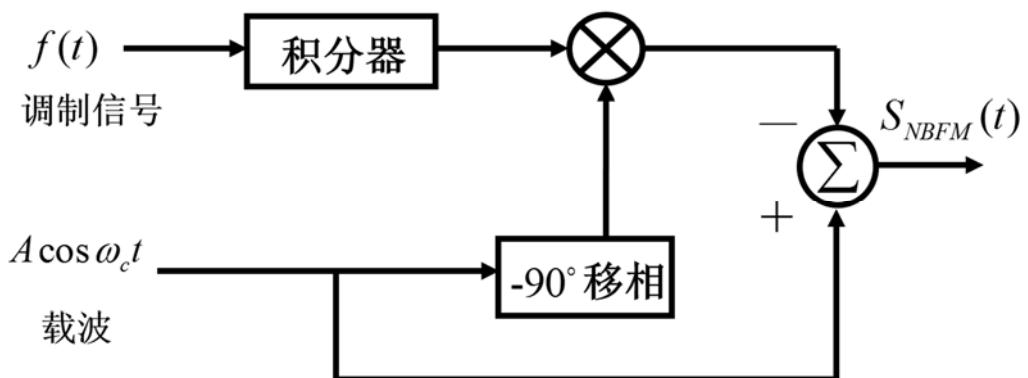


图 4 窄带调频信号的产生

频率调制模块的模型为 FM\_Modulator\_Unit.slx, 模块图为图 5 所示.

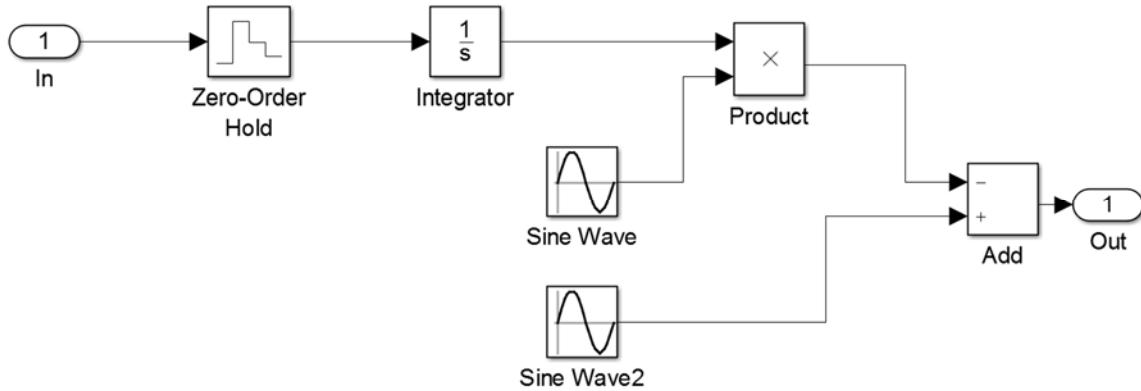


图 5 调频模块模型图

## 2.4. 复用模块

### 2.4.1. 频分复用

本设计采用频分多路复用. 它是指载波带宽被划分为多种不同频带的子信道, 每个子信道可以并行传送一路信号的一种多路复用技术, 对应信号的时域通过和  $\cos(\omega_n t)$  相乘即频域上的位移. 然后把这些信号组合到一个频带的不同位置. 这样就可以进行单信号传送多信号的过程. 如果一个信道只传送一路信号是非常浪费的, 为了能够充分利用信道的带宽, 就可以采用频分复用的方法. 在频分复用系统中, 信道的可用频带被分成若干个互不交叠的频段, 每路信号用其中一个频段传输, 原理图如图 6 所示.

考虑对于四个不同的信号复用时, 有

$$y(t) = x_1(t) \cos(\omega_1 t) + x_2(t) \cos(\omega_2 t) + x_3(t) \cos(\omega_3 t) + x_4(t) \cos(\omega_4 t) \quad (8)$$

而我们注意到对于载波, 它的频谱为:

$$C(j\omega) = \pi[\delta(\omega - \omega_n) + \delta(\omega + \omega_n)] \quad (9)$$

因此对于复用信号会有:

$$\begin{aligned} Y(j\omega) = & X_1(j\omega) * \pi[\delta(\omega - \omega_1) + \delta(\omega + \omega_1)] + X_2(j\omega) * \pi[\delta(\omega - \omega_2) + \delta(\omega + \omega_2)] \\ & + X_3(j\omega) * \pi[\delta(\omega - \omega_3) + \delta(\omega + \omega_3)] + X_4(j\omega) * \pi[\delta(\omega - \omega_4) + \delta(\omega + \omega_4)] \end{aligned} \quad (10)$$

由频域的性质可知以下公式

$$X_n(j\omega) * \pi[\delta(\omega - \omega_n) + \delta(\omega + \omega_n)] \quad (11)$$

可将  $x_n(t)$  在频域上平移  $\omega_n$ . 这样就可以将不同信号通过移到不同的频率段上合成同一个可以实现四个信号分解的信号. 要注意两个载波频率之间的差值必须要大于对应的两个信号的频带宽度的均值, 否则会形成信号的相互干扰.

实现频分复用的模块为 FD\_Multiplexer.slx, 模块图为如图 7 所示, 对应的子模块的模型为 FD\_Multiplexer\_Unit.slx, 模块图为如图 8 所示.

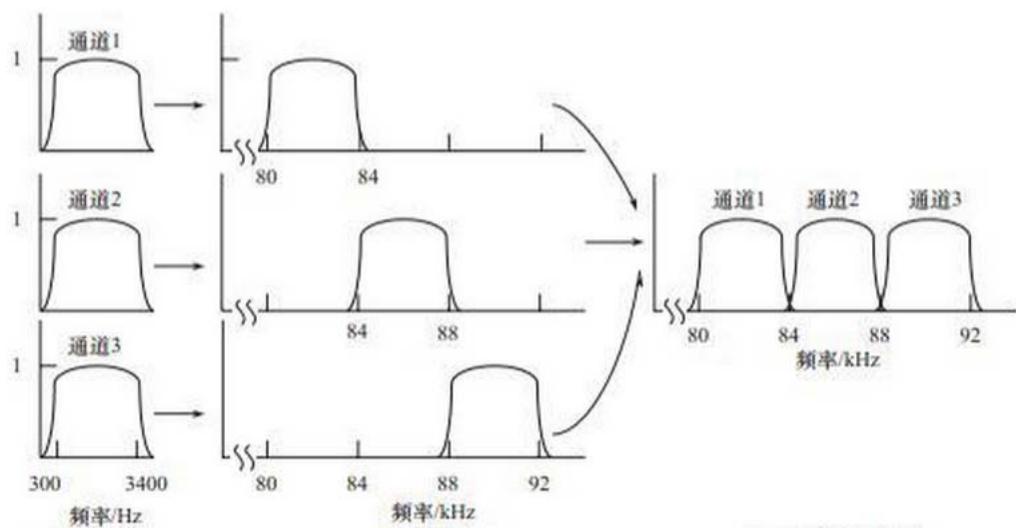


图 6 频分复用原理图

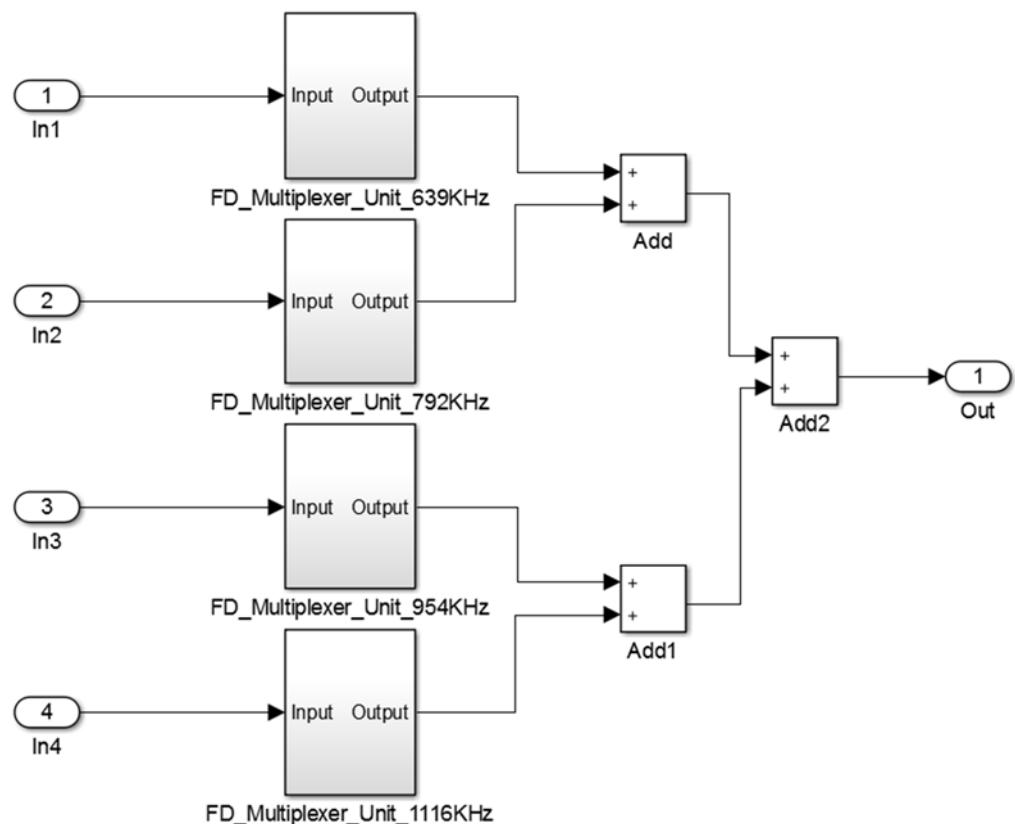


图 7 频分复用模块模型图

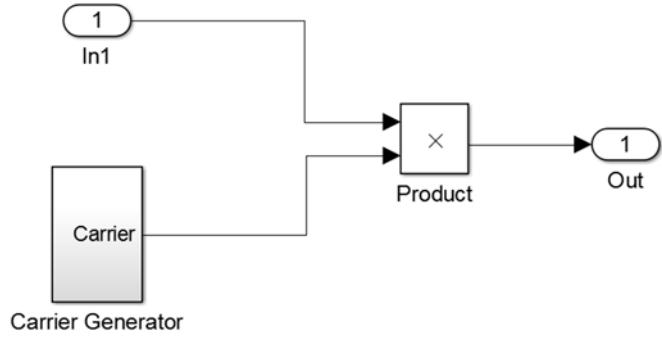


图 8 频分复用子模块模型图

#### 2.4.2. 时分复用

时分多路复用是按传输信号的时间进行分割的，它使不同的信号在不同的时间内传送，将整个传输时间为许多时间间隔。每个时间片被一路信号占用。每一路信号被安排在一个持续的时间段。TDM 就是通过在时间上交叉发送每一路信号的一部分来实现一条电路传送多路信号的，其原理图如图 9 所示。电路上的每一短暂时刻只有一路信号存在。因数字信号是有限个离散值，所以 TDM 技术广泛应用于包括计算机网络在内的数字通信系统。

对于模拟通信系统而言，如果需要采用 TDM 方式，则需采用发送与接收缓存机制，即发送方应把自己的信号按照所规定的时隙发送，而接收方则按对应的时隙接收，但由于模拟信号传输不存在带宽的概念，信号不能在时域上压缩，因此对于有  $N$  个信道的系统而言，持续时间为  $T$  的信号需要消耗  $NT$  的时间才能传输完成，因此传输效率很低，不适用模拟通信系统，这里不再做讨论。

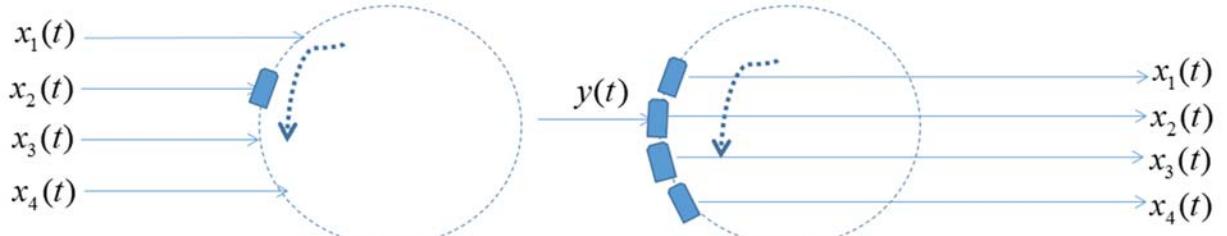


图 9 时分复用原理图

#### 2.5. 信道模块

整体信道的模块为 Channel.slx，模型图为图 10 所示。其中，瑞利衰落的子模块为 Rayleigh\_Channel.slx，模型图为图 11 所示。

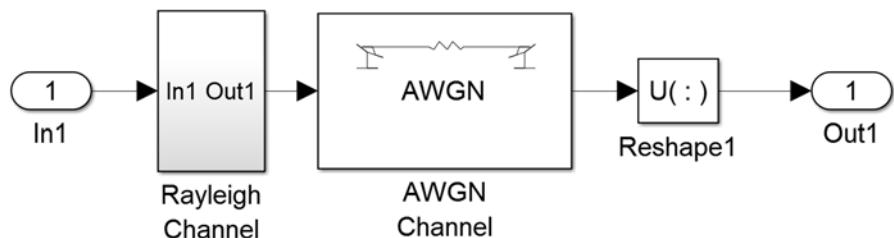


图 10 信道模块模型图

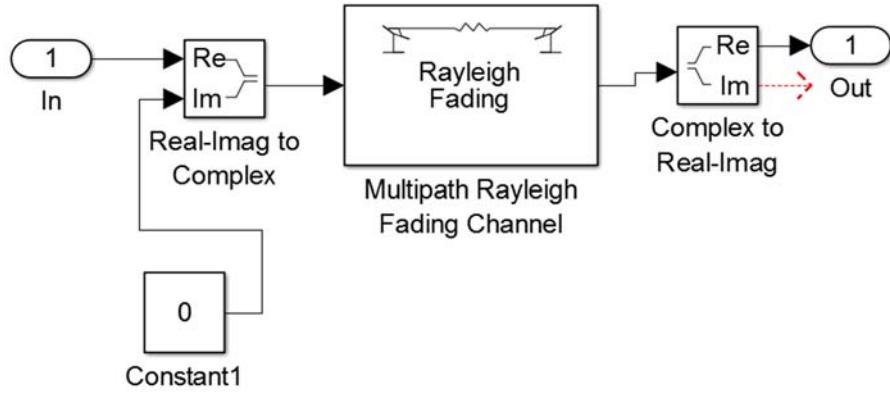


图 11 瑞利信道子模块模型图

### 2.5.1. 加性高斯白噪声

信号发射之后无论是经过有线传输还是无线传输，在被解调设备接收之前都会受到各种类型的干扰。为了模拟更接近于实际生活的信道模型，我们引入了噪声和衰落模型，来观察相关因素的影响。采用加性高斯白噪声（AWGN）与瑞利衰落多径信道模拟这种模型。

AWGN 通道模型唯一的信号减损是来自于宽带的线性加成或是稳定谱密度（以每赫兹瓦特的带宽表示）与高斯分布振幅的白噪声。白噪声是指功率谱密度在整个频域内均匀分布的噪声，即其功率谱密度为常数。假设引入的噪声为，且满足以下条件：

$$n(t) \sim N(0, \sigma^2) \quad (12)$$

$$S_N(\omega) = \frac{N_0}{2}, -\infty < \omega < \infty \quad (13)$$

### 2.5.2. 瑞利信道

对瑞利衰落信道而言，是出现在无线通信信道中，由于信号进行多径传播达到接收点处的场强来自不同传播的路径，各条路径延时时间是不同的，而各个方向分量波的叠加，又产生了驻波场强，从而形成信号快衰落的现象。瑞利衰落属于小尺度的衰落效应，它总是叠加于如阴影、衰减等大尺度衰落效应上。到达接收机后，总信号的强度服从瑞利分布。表达如下：

$$f(z) = \frac{z}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma^2}\right), z \geq 0 \quad (14)$$

当存在有直射路径时，由于该路径信号的强度往往比其他路径大得多，这时通过多径信道的信号的幅度不再是 Rayleigh 分布，而变成 Rician 分布，其相应概率密度函数为：

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} e^{-\frac{(r^2+A^2)}{\sigma^2}} J_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right); \quad A \geq 0, r \geq 0 \quad (15)$$

其中  $A$  是直射波的最高幅值，为修正的第一类 Bessel 函数。若不存在直射路径，则 Rician 退化为 Rayleigh 分布。同时我们有结论：地面移动通信信道通常是瑞利信道，在微蜂窝中为莱斯信道。所以本设计中只考虑和分析瑞利衰落模型。由于移动用户与基站的相对运动，每个多径波都会有一个明显的频率移动。由运动引起的接收信号频率的移动称为多普勒频移。其会将信号的带宽展宽，从而出现时延，进而会导致一定程度的信号畸变。

## 2.6. 解复用模块

要恢复为原来的四个信号，需要采用带通滤波器来在复用信号中得到对应的信号。滤波器的对应宽度

应该为原始各个信号的带宽, 中心频率应该是原始载波将信号的频率中心所移到的频率. 我们假设带通滤波器  $H_1(j\omega)$  的正负半轴的中心频率为被调制信号的中心频率在第一个载波  $\cos(\omega_1 t)$  的平移下所移动到的正负半轴的频率. 该带通滤波器的频谱宽度为信号的频谱宽度.

对于复用信号, 有

$$Y(j\omega) = \sum_{n=1}^4 X_n(j\omega) * \pi[\delta(\omega - \omega_n) + \delta(\omega + \omega_n)] \quad (16)$$

可以得到

$$M(j\omega) = Y(j\omega)H(j\omega) = X_1(j\omega) * \pi[\delta(\omega - \omega_1) + \delta(\omega + \omega_1)] \quad (17)$$

仅包含第 1 个信号的频率分量. 再乘以载波后便可滤去高频分量即可得到原始信号.

频分解复用的模型为 FD\_Demultiplexer.slx, 对应的模型图为图 12 所示, 对应的子模块的模型为 FD\_Demultiplexer\_Unit.slx, 模型图为如图 13 所示.

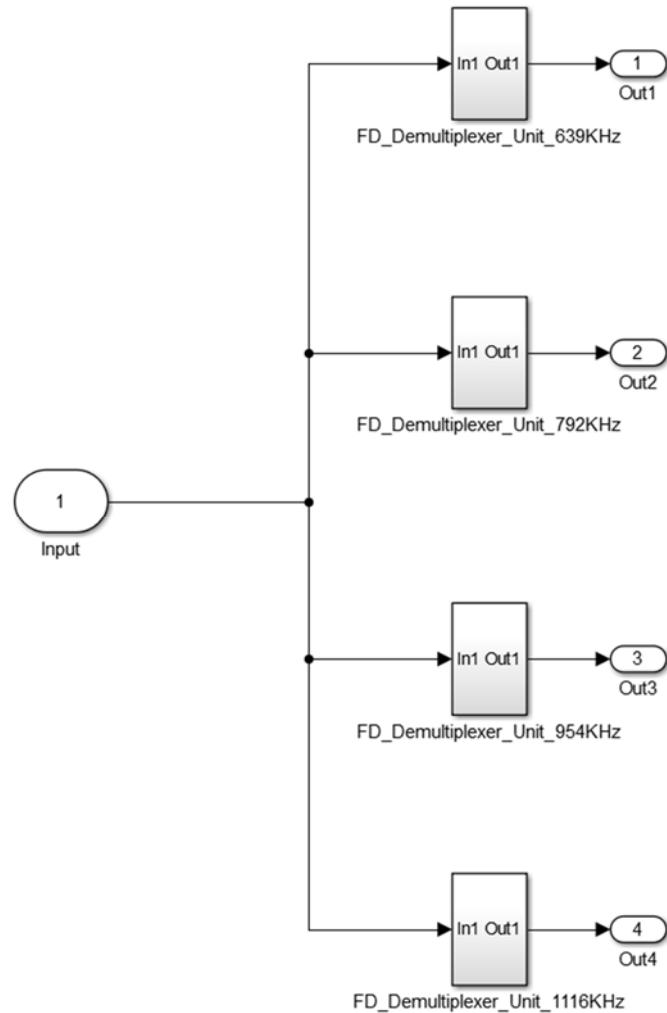


图 12 频分解复用模型图

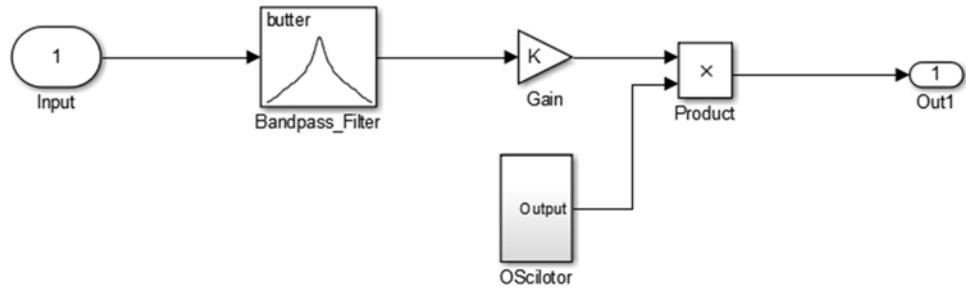


图 13 频分解复用子模块模型图

## 2.7. 解调模块

### 2.7.1. 幅度解调：相干解调

在解调部分，将接收信号与载波相乘，时域表达式为

$$\begin{aligned}
 S_{NBFM}(t) &\approx A \cos \omega_c t - AK_{FM}(t) \int f(t) dt \sin \omega_c t \\
 &= \frac{1}{2}(A_0 + f(t)) + \frac{1}{2}(A_0 + f(t)) \cos(2\omega_c t + 2\varphi)
 \end{aligned} \tag{18}$$

再经过低通滤波器滤除  $2\omega_c$  的高频分量即可恢复出原始信号。相干解调的模型为 AM\_Demodulator\_Unit.slx，对应的模型图为图 14 所示。

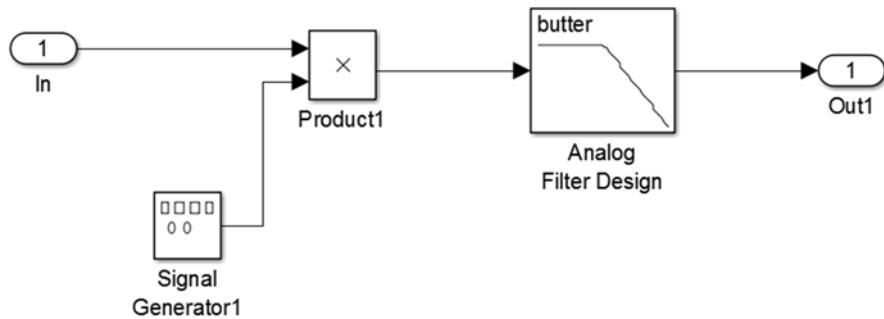


图 14 幅度调制相干解调模块模型图

### 2.7.2. 幅度解调：包络解调

包络检波原理图如图 15 所示。信号经二极管整流后经过电容  $C$ ，信号到达峰值之前电容充电，信号从峰值逐渐衰弱时电容放电，电容两端的电压即近似等于原始信号。

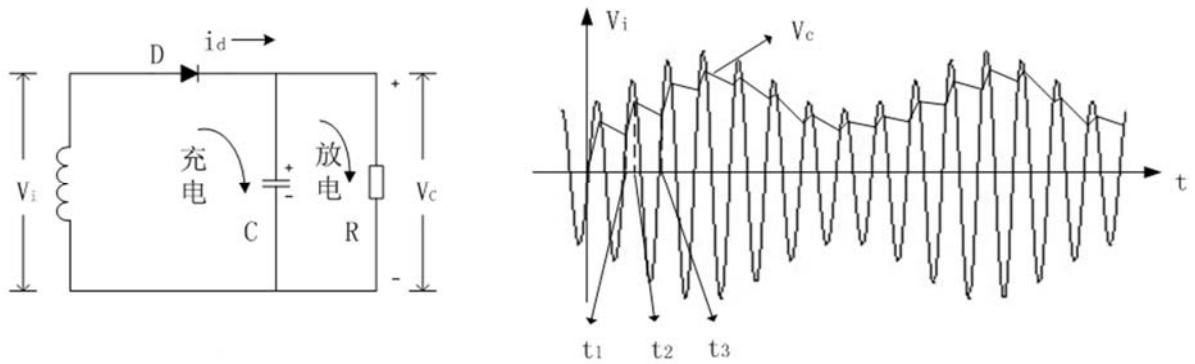


图 15 包络检波原理图

包络解调的模型如图 16 所示, 对应的模型文件为 AM\_Demodulator\_Saturation\_Unit.slx. 其中 Saturation 模块即为包络检波模块.

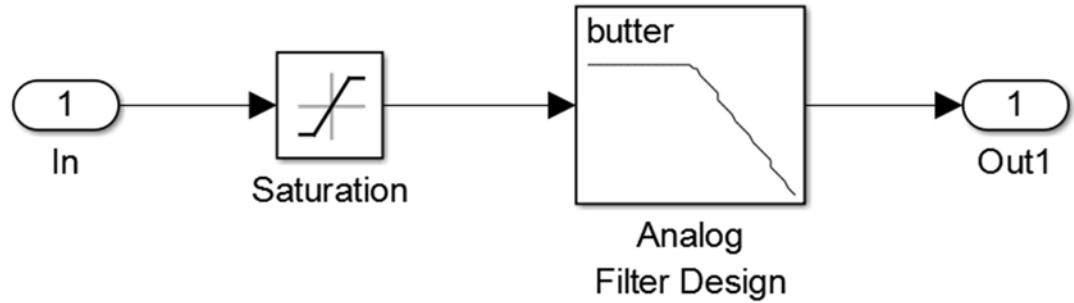


图 16 幅度调制包络解调模块模型图

### 2.7.3. 频率解调

窄带信号频率调制相干解调的原理图如图 18 所示.

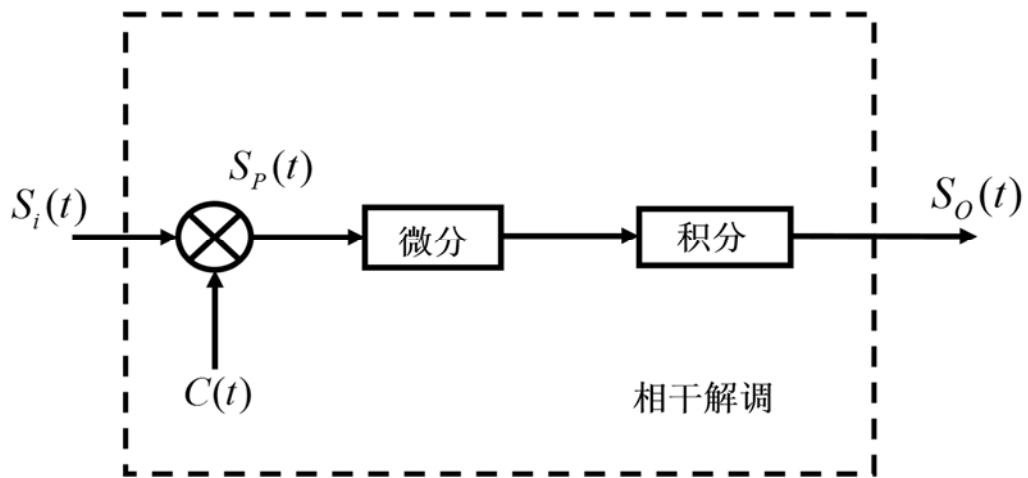


图 18 窄带信号频率调制相干解调的原理图

设窄带信号为

$$S_i(t) = A \cos \omega_c t - AK_{FM} \int f(t) dt \sin \omega_c t \quad (19)$$

并设相干载波

$$C(t) = -\sin \omega_c t \quad (20)$$

则相乘器的输出为

$$S_p(t) = -\frac{A}{2} \sin 2\omega_c t + AK_{FM} \int f(t) dt (1 - \cos 2\omega_c t) \quad (21)$$

经微分器和低通滤波器后得

$$S_o(t) = \frac{AK_{FM}}{2} f(t) \quad (22)$$

频率调制解调模块模型为 FM\_Demodulator\_Unit.slx, 模块图如图 19 所示.

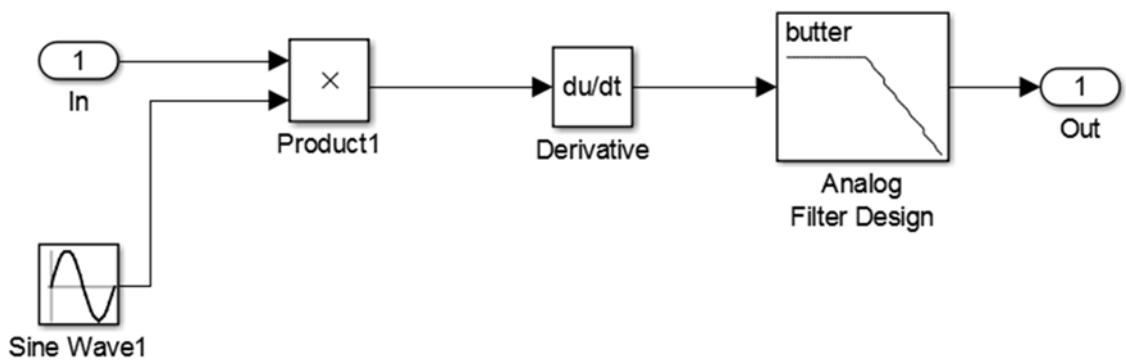


图 19 频率解调模块模型

### 3. 结果与讨论

本次设计采用的音频信号均来自 BBC World Service，为广播信号的典型案例，四个信号的时域与频域如图 20 所示。仿真中各个模块中元件的参数设置如表 1 所示。频分复用中，四个信道的中心频段设置以及背景如表 2 所示。

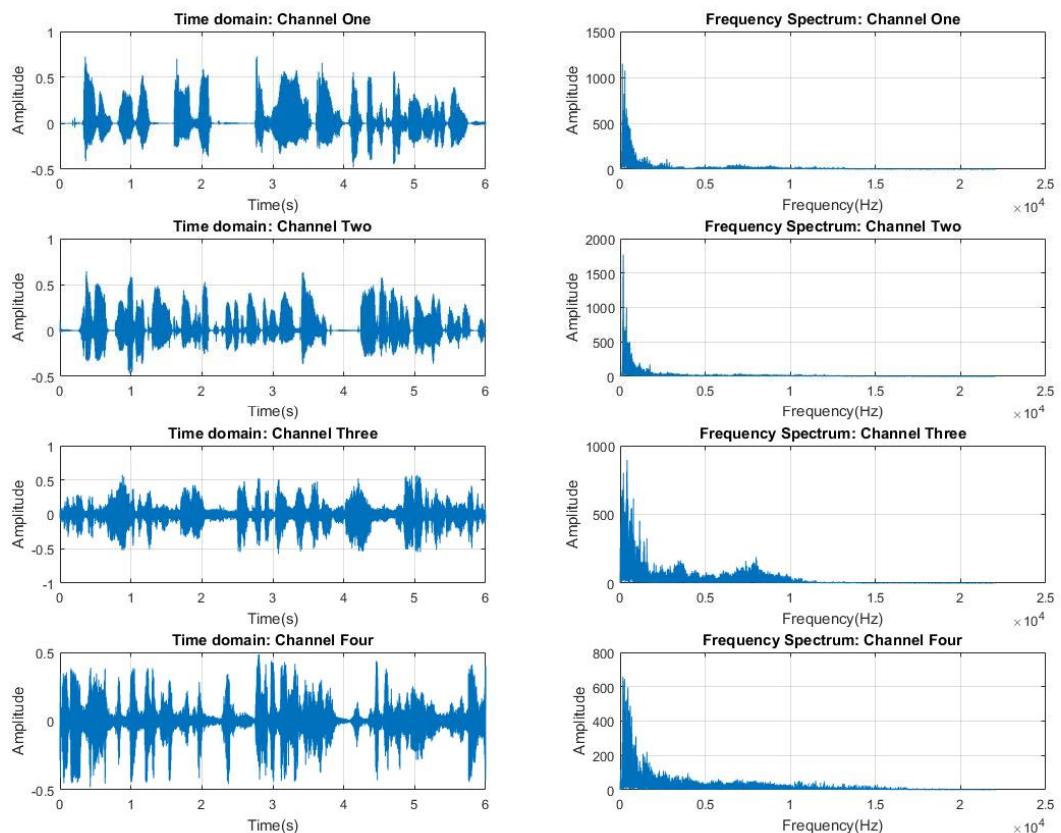


图 20 输入音频信号的时域与频域图像

模块	模块	对应参数
幅度调制	常数发生器 载波发生器	常数值为 1 正弦波, 频率为 $500\text{kHz}$ , 初相为 0
频率调制	载波发生器	正弦波, 频率为 $500\text{kHz}$ , 初相分别为 $\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{2}$
频分复用	载波发生器	正弦波, 频率为信道频率(见表 2)与 $500\text{kHz}$ 之差, 初相为 0
信道	AWGN 信道 Rayleigh 信道	除讨论信噪比时, 信噪比均为 $10\text{dB}$ 最大多普勒频移为 $1\text{Hz}$ , 离散时延 $0\text{s}$ , 平均增益 $-3\text{dB}$
频分解复用	载波发生器 带通滤波器 增益	正弦波, 频率与复用时载波频率一致, 初相为 0 巴特沃斯型, 8 阶, 通带宽度为 $100\text{kHz}$ 由实际音频信号强度确定
幅度相干解调	载波发生器 低通滤波器	正弦波, 频率为 $500\text{kHz}$ 巴特沃斯型, 8 阶, 通带频率 $45\text{kHz}$
幅度包络解调	低通滤波器	巴特沃斯型, 8 阶, 通带频率 $45\text{kHz}$
频率解调	低通滤波器	巴特沃斯型, 8 阶, 通带频率 $45\text{kHz}$

表 1 子系统中模块及其对应参数设置

信道编号	载波频率/ $\text{kHz}$	对应频道
1	639	中央人民广播电台中国之声
2	792	成都人民广播电台新闻广播
3	954	四川民族广播
4	1116	四川人民广播电台新闻

表 2 各信道的载波频率及对应频道

在仿真测试过程中, 由于系统整体存在多种搭配方式, 这里选择进行仿真讨论的系统如图 21 所示, 即以幅度调制、频分复用、 $10\text{dB}$  AWGN 和 Rayleigh 信道、频分解复用、幅度同步解调为主线系统, 同时分析单 AWGN 信道时信噪比的影响, 频率调制和幅度调制的影响, 同步解调和非同步解调的影响.

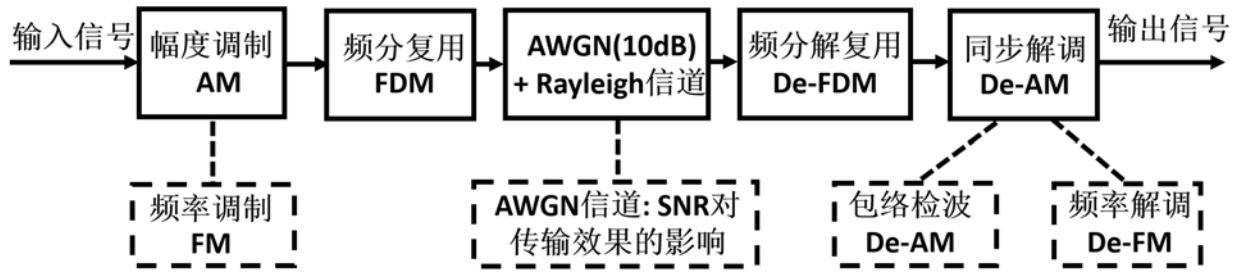


图 21 仿真流程图

### 3.1. 主线系统看流程

#### 3.1.1. 幅度调制

语音信号经 AM 调制前后的时频域波形图如图 22 所示, 可以看到原始信号的频率范围约为  $0 \sim 25\text{kHz}$ , 经调制后信号几乎都被搬到  $500\text{kHz}$ . 调制后时域图的包络一定程度上反映了原始信号的特征.

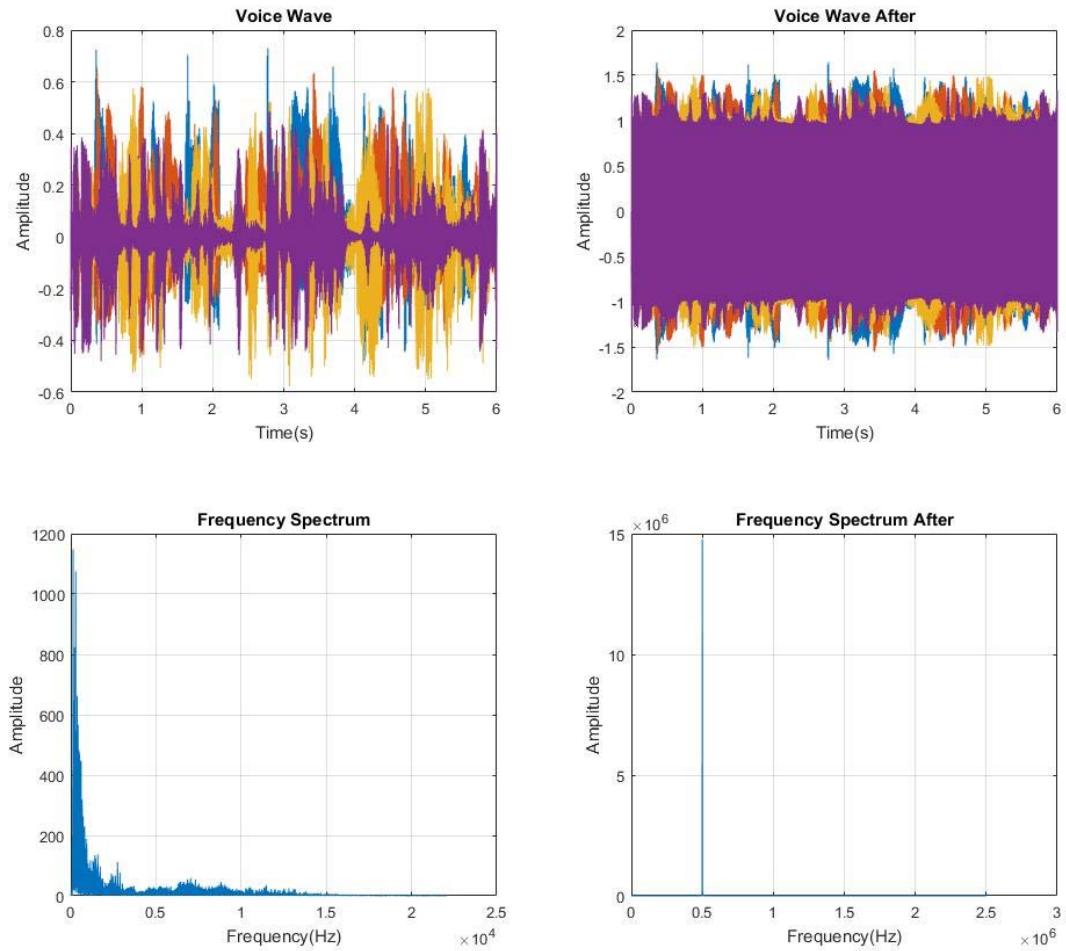


图 22 通过幅度调制后的时域频域对比图

### 3.1.2. 频分复用

在经过频分复用模块后，相对于幅度调制后的信号已经有了很明显直观的变化。由于是频域的变换，时域上并没有很直接的效果，但从频域的效果来看，符合我们的设计原理和公式推导。在载波将原四路信号都搬移到  $500kHz$  后，信号再分别乘以四个不同的正弦信号，以  $500kHz$  为中频向左右两边搬移，效果如图 23 所示。

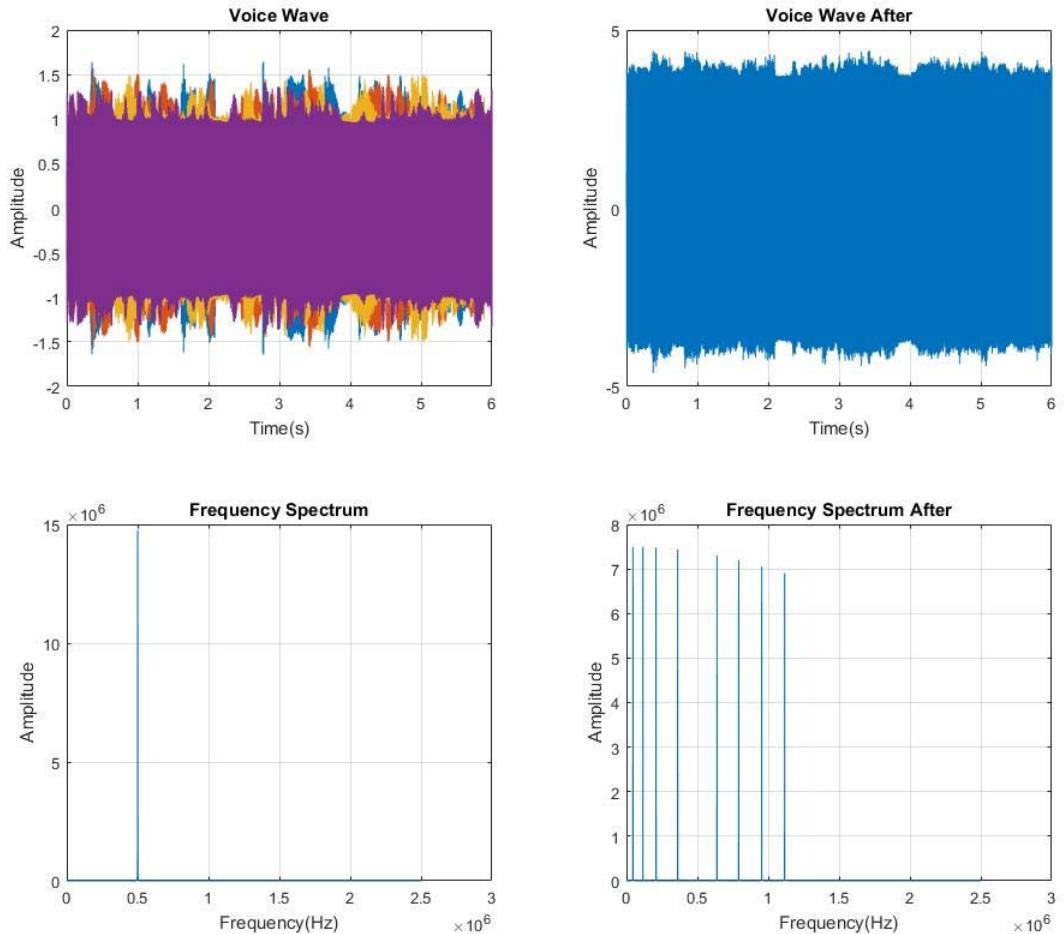


图 23 通过频分复用模块后的时域频域对比图

### 3.1.3. 信道

在经过复用模块之后，信号进入了具有瑞利衰落特性和加性高斯白噪声的信道，其时频域前后对比图如图 24 所示。首先对通过信道的时域和频域的各分量幅值进行分析，可以看出，通过信道后各频域分量和时域分量都得到了不同程度的衰减。除此之外我们还能发现时域的衰减较大，呈现一个低频正弦包络的形状，同时对频域各分量而言，不同的分量得到的衰减程度不同，相对而言低频的分量得到的衰减更大，高频的分量得到衰减幅度相对较小。出现上述两点现象有以下几点原因。

瑞利衰落模型是一个多径模型，多径干扰的一个直接结果就是使得频率响应呈现“频率选择性衰落”，使得不同频率的衰落特性不同。而频域与时域是对偶的，对于时域而言，因为我们设置了  $1\text{Hz}$  的多普勒频移，多普勒频移使得频域上发生了扩散，在时域上引起了衰落，不同的时间上呈现包络起伏，这种现象被称为时间选择性衰落。

总结来说，信道的时间选择性是由多普勒频移引起的，频率选择性是由时延扩展引起的。多普勒频移越大，信道变化越快，这里引入相干时间的概念，是指信道保持不变的时间，与多普勒频移有以下关系 [6]：

$$T_{\text{coherent}} \propto \frac{1}{f_{\text{Doppler}}} \quad (23)$$

和我们得到的结果相一致.

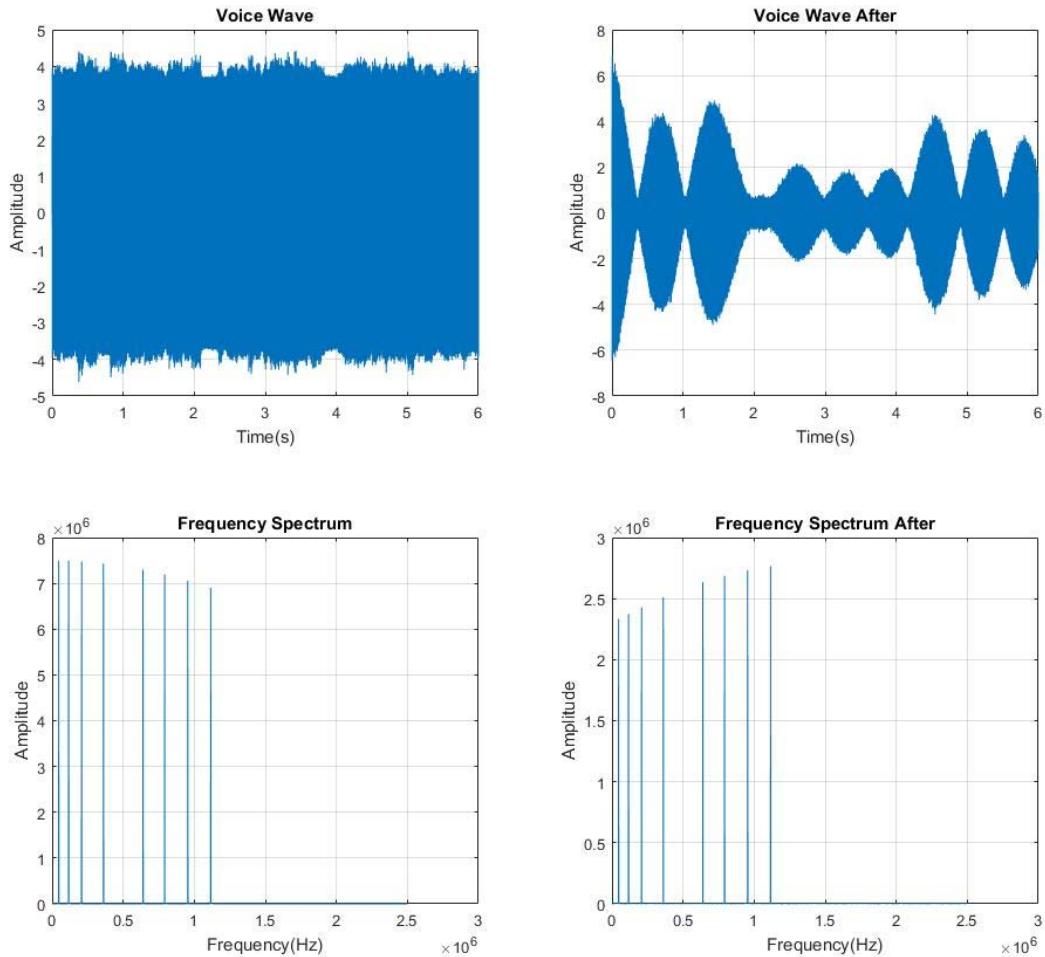


图 24 信号通过瑞利衰落和信噪比 15dB 的 AWGN 时域和频域对比图

### 3.1.4. 频分解复用

由图 25 可以看出, 经过解复用后, 频谱中心点分别为  $500kHz$ ,  $778kHz$ , 分别是  $639kHz$  频段进行解复用后的频率. 注意到本身因为解复用应该存在四条右移的谱线, 但因为其他谱线相对于  $778kHz$  谱线幅值较小, 因此在图中“沉”在底部.

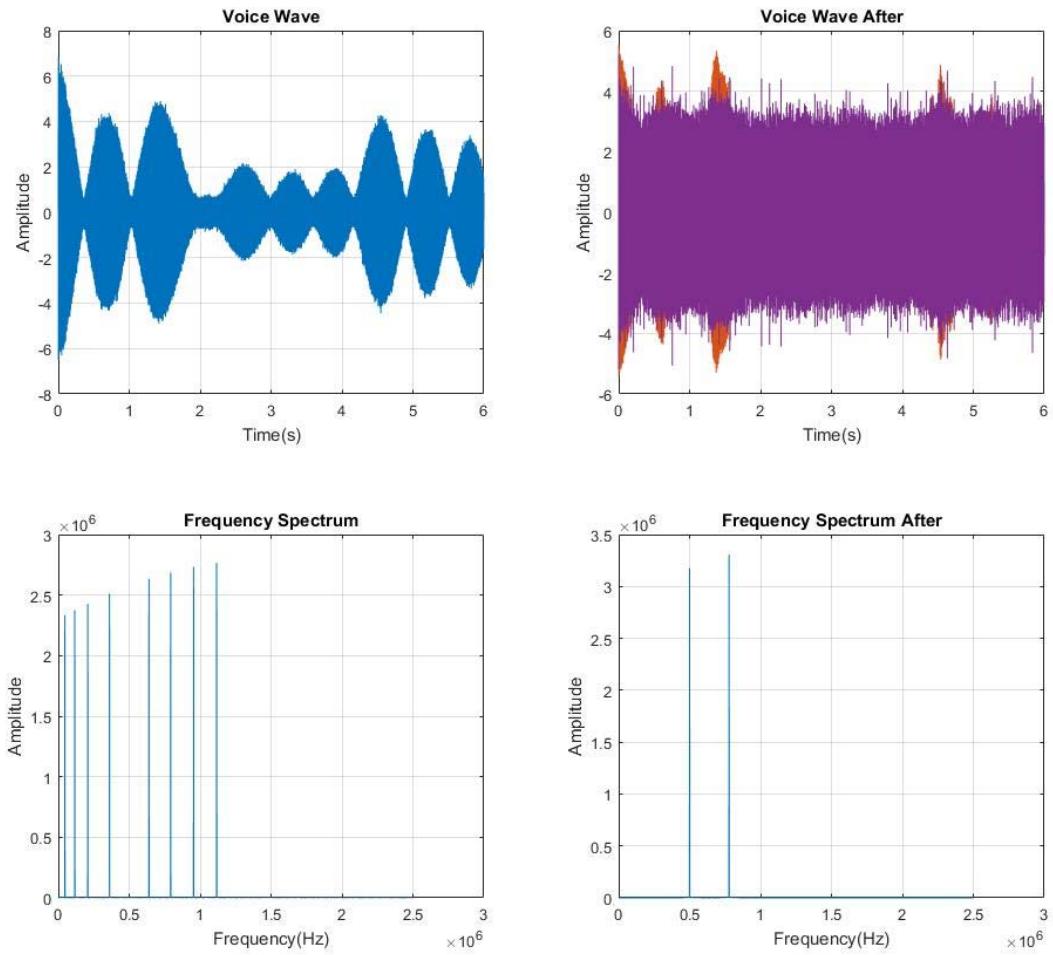


图 25 信号通过频分解复用模块的时域和频域对比图

### 3.1.5. 相干解调

相干解调前后的时频图如图 26 所示, 由于经过瑞利信道, 原始的音频信号会有一个正弦的包络, 但这对音频信号的效果影响不大. 经过实际测试, 相干解调后的声音与原始声音听起来并无明显差别, 经过瑞利衰落信道后对信号的质量没有太大影响. 相干解调后, 信号也被搬移至低频部分.

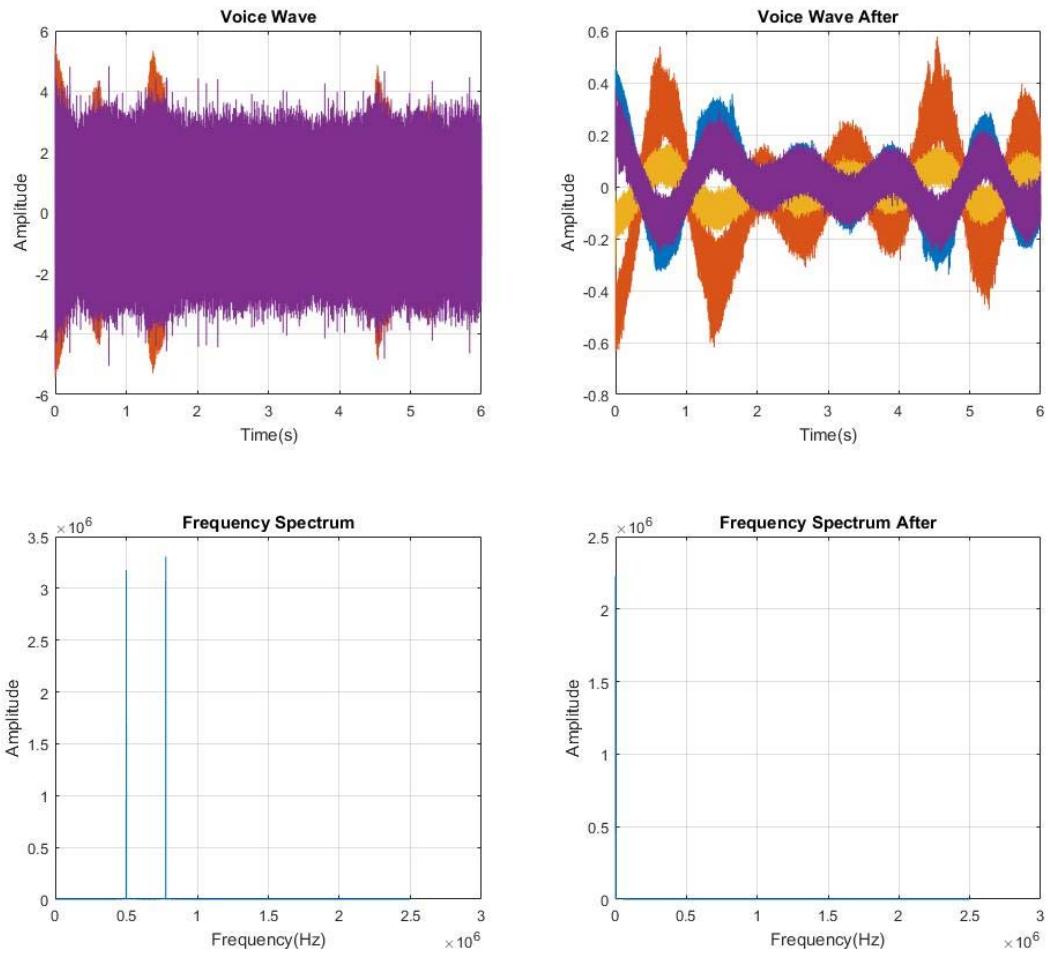


图 26 通过相干解调后的时域频域对比图

### 3.1.6. 系统整体

主线系统整体的模型文件为 `Analog_Communication_System_AM.slx`，通过完整系统的时域频域对比图如图 27 所示。注意到信号经过系统后时域波形有较大变化，即有一个明显的正弦包络，但实际的音频输出结果显示音频信号本身基本没有受到该低频正弦包络的影响，在低信噪比下仍然可以正常播放。

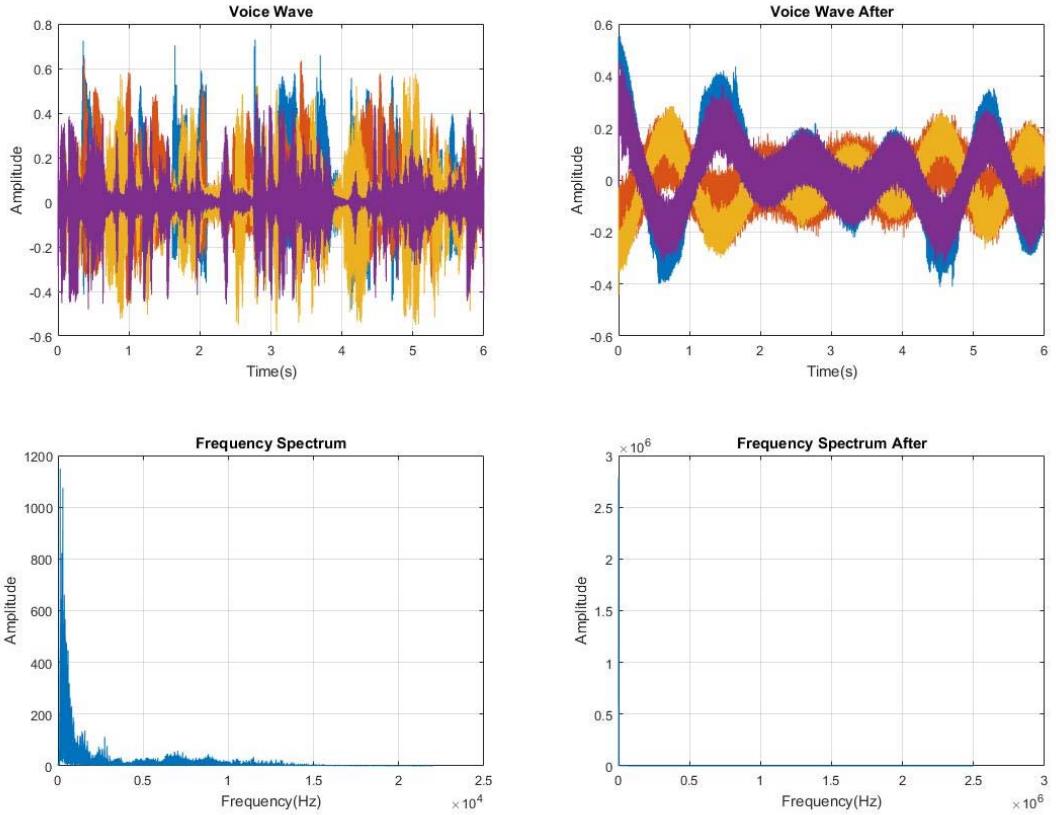


图 27 通过完整主线系统后的时域频域对比图

### 3.2. 包络解调模块

若采用包络解调模块代替主线系统中的相干解调模块，则信号通过该模块得到的时域频域对比图如图 28 所示。可以看到除了调频频段为  $1116\text{kHz}$ （紫色）的信号外，其他的信号时域图均为原始信号加上正弦包络，但这个有瑞利衰落信道所引入的正弦包络几乎不会影响音频信号的质量，在实际播放音频信号时几乎听不出解调后的声音与原始声音的差别。但紫色的信号经包络检波后完全没有恢复。频域上信号都被搬移至低频部分。从频域上看，解调的过程都是将  $500\text{kHz}$  的有用信号恢复至原始的低频部分，四个音频信号没有本质差别，但唯独紫色的信号没有恢复出来，原因我们尚不清楚。这是一个留待日后深入讨论的问题。

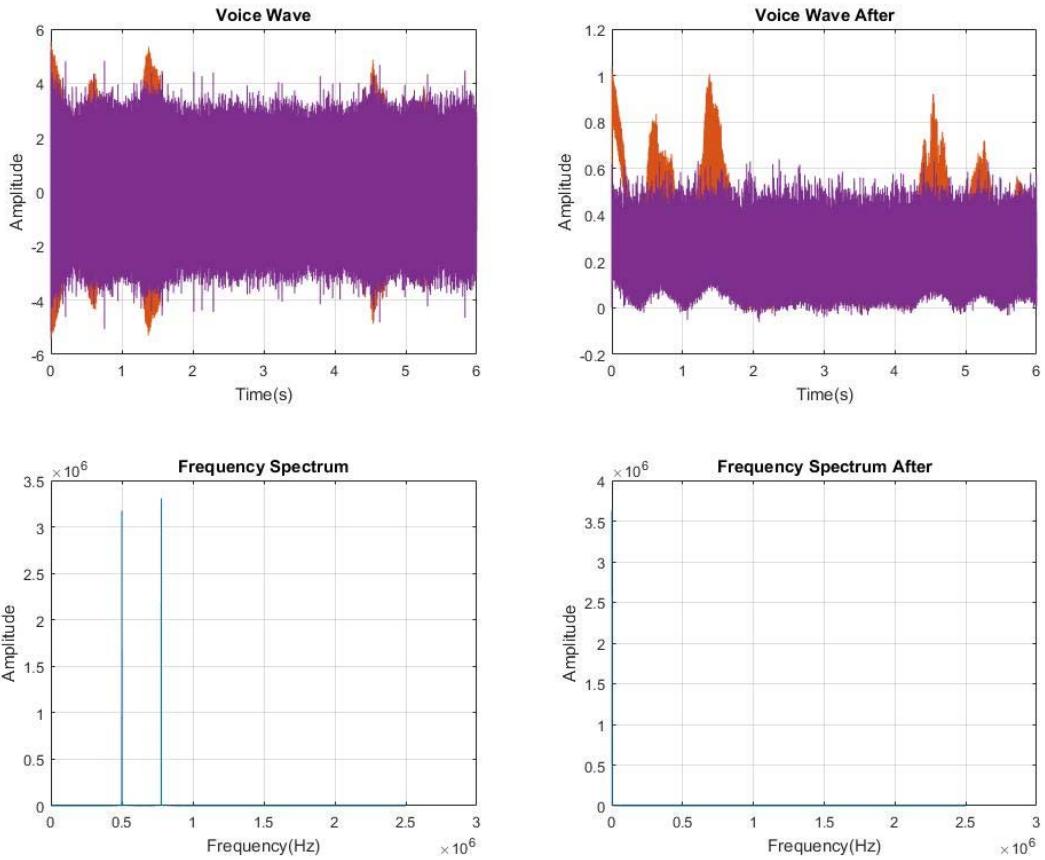


图 28 通过包络检波模块的信号时频域对比图

### 3.3. 信道

#### 3.3.1. AWGN 信噪比分析

在对 AWGN 信道进行单独仿真分析(对应模型: Analog\_Communication\_System\_AM\_AWGN\_Only.slx)时, 系统整体在无噪声、信噪比为  $20dB$ 、 $15dB$ 、 $10dB$  的情况下的时域输出图如图 29 所示. 可以直观的看出信道的信噪比对本设计的通信系统的传输性能的影响. 在  $SNR = \infty$  即无信道噪声的情况下, 解调信号较好的保留原信号的特征, 并经过了一定的均值搬移和幅度衰减, 但几乎没有噪声的叠加影响; 在  $SNR = \infty$  的情况下, 相对于无噪声信道的解调后信号有一定幅度的噪声分量的叠加, 第一路信号(蓝色)由于衰减相对较小, 噪声对其特征影响并不大, 而对于第四路信号(紫色)而言, 在噪声干扰下失去了部分时域信号的特征, 在生成的音频信号中, 可以分辨出这种影响. 在  $SNR = 15dB$  的情况下, 这是我们标准的测试参数, 可以看出, 得到的信号都有相当一定程度的噪声影响, 衰减越大, 噪声影响中丢失的特征就越多, 从生成的音频信号中也能验证; 在  $SNR = 10dB$  的情况下, 可以观察到, 四路信号都有相当程度的噪声叠加, 音频信号的传输性能有相当程度的恶化. 通过上述比对分析, 我们验证了  $SNR$  对通信系统信息传输性能的影响, 并得到了直观的结果分析.

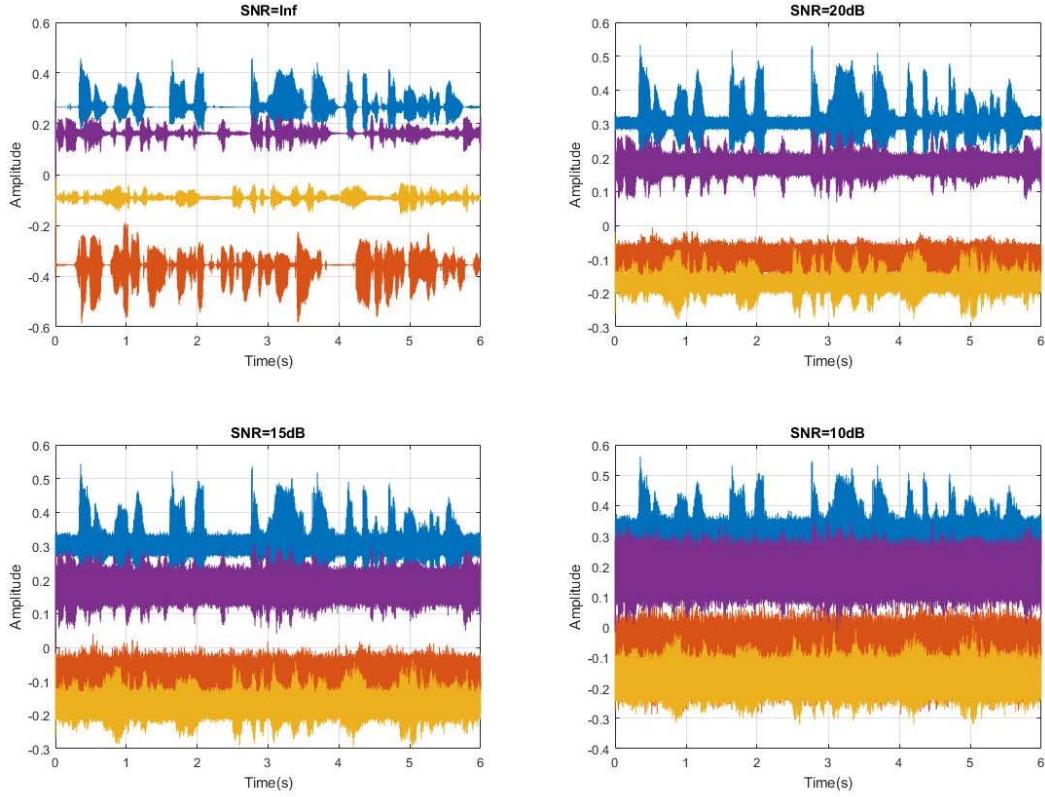


图 29 信号通过不同 SNR 的 AWGN 信道后系统整体输出的时域对比图

### 3.3.2. 数字信号的考量

由于音频模拟信号的优劣难以刻画, 这里进一步考察了如果采用数字信号, AWGN 信噪比和误码率的关系, 据此设计了一个 2FSK 调制解调系统对信道的性能 (误码率) 进行预分析, 并利用 BERTOOL 进行理论分析对比. 其结构图如图 30 所示.

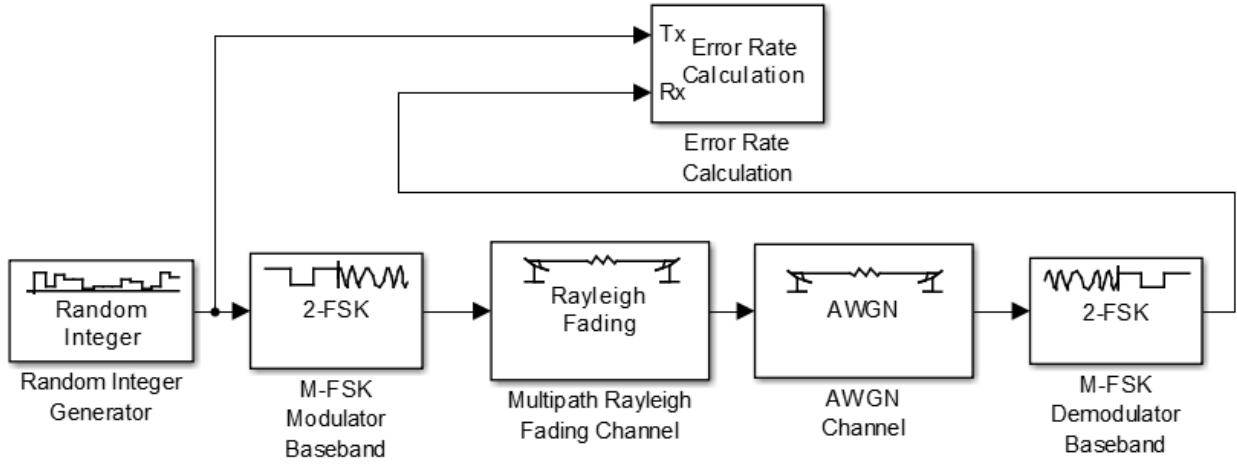


图 30 测试数字信号信噪比与误码率的模块图

绘制信道信噪比与信号传输误码率的对比图像如图 31 所示. 可以看出, 得到的信道在  $10dB$  信噪比下, 能达到 0.1 的误码率, 性能在可接受范围内, 下面来看与 MATLAB 内置 BERTOOL 的结果比对, 如图 32 所示. 可以看出, 两者之间有  $0.3 - 0.4dB$  的性能差异, 在可接受范围内.

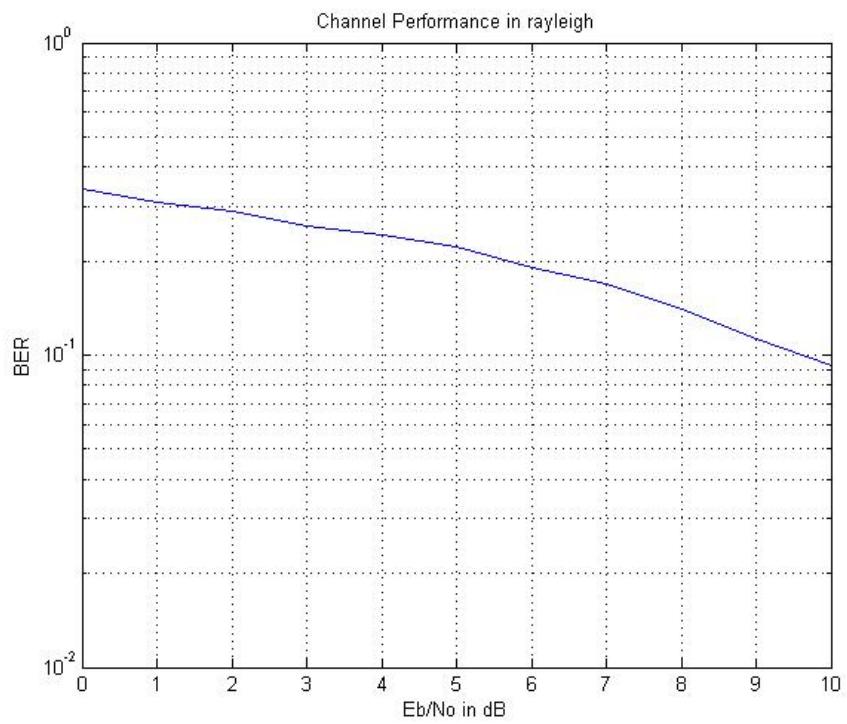


图 31 信噪比与误码率的关系图

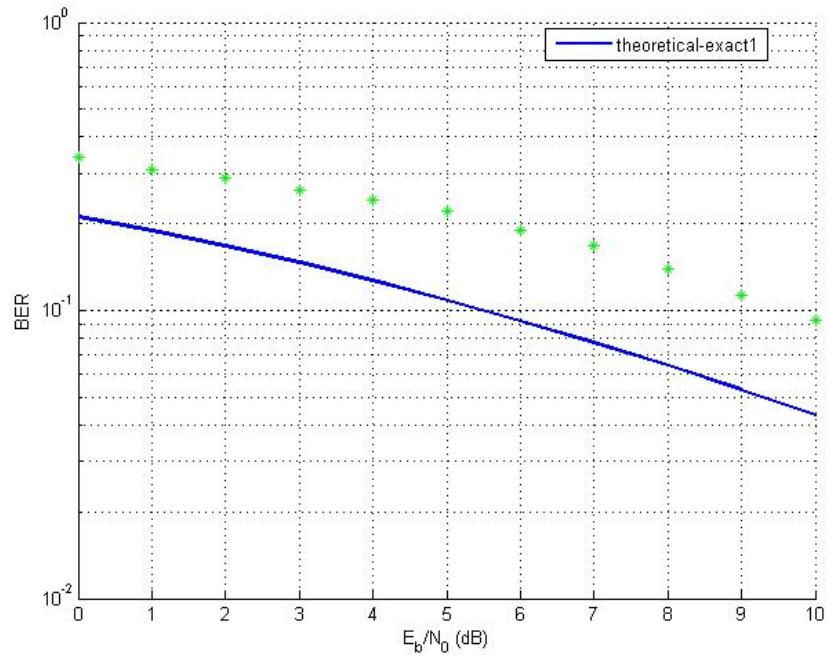


图 32 信道性能与理论值的对比图

### 3.4. 频率调制模块

将幅度调制与解调模块换成对应的频率调制与解调模块，得到的 FM 系统的模型文件为 Analog\_Communication\_System\_FM.slx. 此系统的输入输出图如图 33 所示. 尽管与图 27 相比在时域和频域波形上都很类似，但是细心的读者将会发现其时域的幅度数量级为  $10^6$ ，已经远大于图 27 中的幅度. 并且，由该系统输出的音频为全噪声文件，原始信号已经被彻底淹没. 发生这种现象的原因是因为本设计中，系统的噪声引入仅在信道部分. 而频率调制在解调过程时，会引入一个微分器. 在仿真频率远大于调制频率的情况下，高斯噪声的微分值将远大于信号本身的微分值，因此出现了信号被噪声淹没的现象.

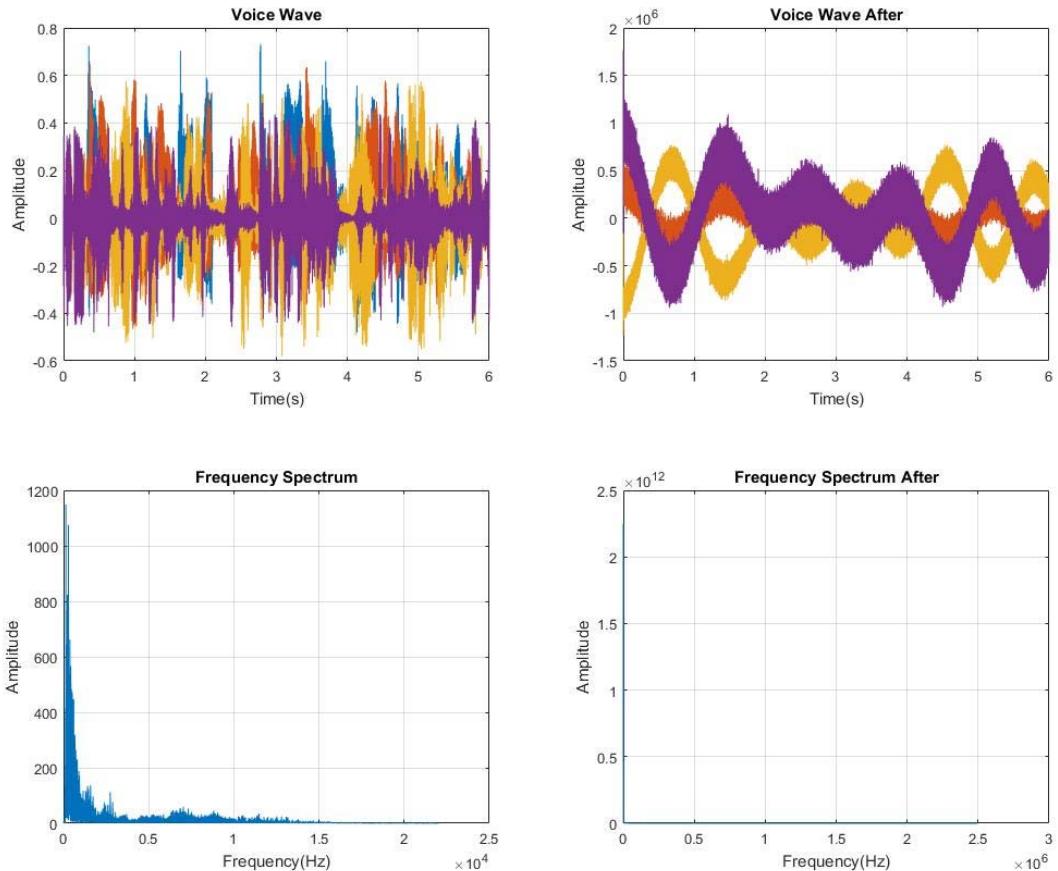


图 33 频率调制系统输入输出时域频域对比图

## 4. 结论

本文基于对模拟通信系统进行了仿真，讨论了信号在各个子系统间的变化情况，阐释了多信道模拟通信系统的工作机理，并对调制方法以及信道状况对输出信号的影响进行了讨论. 本文提供的案例可以作为信号与系统和通信原理等通信专业基础课程的参考材料，帮助学生加强对现代通信系统的工作原理和思想的理解.

## 5. 附录

由于本设计涉及使用 Simulink 仿真以及真实音频数据的处理，所涉及的附件较多，读者可以进行参考。

附件的分类如下：

1. 模型文件，位于 **MODEL** 文件夹中，主要是系统各个部分的 **Simulink** 模型。
2. 代码文件，位于 **SOURCE** 文件夹中，主要是实现之前提到的输入输出音频，作图等功能。
3. 输入音频文件，位于 **INPUT** 文件夹中，是本设计采用的音频信号。
4. 输出音频文件，位于 **OUTPUT** 文件夹中，包括了本设计中各个不同系统的输出音频。
5. 演示文稿，为本设计对应的演示内容。

### 参考文献

- [1] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Signals and Systems*: Pearson Education, 1998.
- [2] 闵大镒 and 朱学勇, *信号与系统分析*: 电子科技大学出版社, 2000.
- [3] J. R. Buck, M. M. Daniel, and A. C. Singer, *Computer explorations in signals and systems using MATLAB*: Prentice-Hall, Inc., 1997.
- [4] W. Y. Yang, *Signals and Systems with MATLAB*: Springer Science & Business Media, 2009.
- [5] 邵玉斌, *Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真实例分析*: 清华大学出版社, 2009.
- [6] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*: Cambridge University Press, 2005.