

AM 信号的产生、接收与性质分析仿真

【实验目的】

1. 掌握 AM 信号的产生原理及时域波形特征；
2. 分析 AM 信号的频域特性，理解频谱搬移过程；
3. 研究 AM 信号的包络检波解调方法；
4. 测量并分析 AM 系统在加性高斯白噪声（AWGN）信道下的信噪比性能；
5. 计算并验证 AM 信号的解调增益，评估系统传输性能。

【实验原理】

1. AM 信号的产生原理

振幅调制（Amplitude Modulation, AM）是一种将基带信号的幅度信息加载到高频载波上的调制方式。标准 AM 信号的数学表达式为：

$$s_{AM}(t) = [A_c + m(t)] \cos(2\pi f_c t)$$

其中， A_c 为载波幅度， $m(t) = A_m \cos(2\pi f_m t)$ 为基带调制信号， f_c 为载波频率， f_m 为基带信号频率。为保证信号不发生过调制，需要满足调制度 μ 的条件：

$$\mu = \frac{A_m}{A_c} \leq 1$$

调制度反映了基带信号对载波幅度的影响程度。当 $\mu > 1$ 时，会出现过调制现象，导致包络检波时产生失真。

2. AM 信号的频域特性

通过对 AM 信号进行傅里叶变换，可得到其频域表达式。设基带信号 $m(t)$ 的频谱为 $M(f)$ ，则 AM 信号的频谱为：

$$S_{AM}(f) = \frac{A_c}{2} [\delta(f - f_c) + \delta(f + f_c)] + \frac{1}{2} [M(f - f_c) + M(f + f_c)]$$

这表明 AM 信号的频谱由三部分组成：载频分量和上、下两个边带。对于单音调制信号，频谱包含载频 f_c 以及上边带 $f_c + f_m$ 和下边带 $f_c - f_m$ 三个离散分量。AM 信号的带宽为基带信号带宽的两倍：

$$B_{AM} = 2f_m$$

3. AM 信号的包络检波

包络检波是 AM 信号最常用的解调方法，其原理是利用二极管的非线性特性和 RC 滤波电路提取信号包络。包络检波器的输出为：

$$v_o(t) = A_c + m(t) = A_c[1 + \mu \cos(2\pi f_m t)]$$

经过隔直流电容后，可得到恢复的基带信号 $m(t)$ 。为保证检波效果，RC 时间常数需满足：

$$\frac{1}{f_c} \ll RC \ll \frac{1}{f_m}$$

4. AM 信号的信噪比

在 AWGN 信道中，接收端输入信噪比为：

$$SNR_{in} = \frac{P_s}{P_n} = \frac{A_c^2(1 + \mu^2/2)}{2N_0B}$$

其中， P_s 为信号功率， P_n 为噪声功率， N_0 为噪声功率谱密度， B 为信号带宽。

包络检波后的输出信噪比为：

$$SNR_{out} = \frac{\mu^2 A_c^2}{2N_0B}$$

5. AM 信号的解调增益

解调增益定义为输出信噪比与输入信噪比的比值：

$$G = \frac{SNR_{out}}{SNR_{in}} = \frac{\mu^2}{1 + \mu^2/2}$$

当调制度 $\mu = 1$ 时，解调增益达到最大值 $G_{max} = 2/3 = -1.76$ dB。这表明 AM 系统存在固有的功率损失，这是因为载波分量不携带信息但占用了部分发射功率。

【Matlab 仿真】

主要参数说明：

1. **fc:** 载波频率，设为 10 kHz
2. **fm:** 基带信号频率，设为 1 kHz
3. **fs:** 采样频率，设为 1 MHz
4. **Ac:** 载波幅度，设为 1 V
5. **Am:** 基带信号幅度，设为 0.5 V、0.8 V、1.2 V（对应不同调制度）

6. mu: 调制度, 分别为 0.5、0.8、1.2
7. SNR_db: 输入信噪比, 设为 20 dB 和 10 dB
8. T: 仿真时长, 设为 5 ms

仿真代码:

```

1 %% AM信号产生、接收与性能分析仿真
2 clear; clc; close all;
3
4 %% 参数设置
5 fc = 10e3; % 载波频率 10kHz
6 fm = 1e3; % 基带信号频率 1kHz
7 fs = 1e6; % 采样频率 1MHz
8 Ac = 1; % 载波幅度
9 T = 5e-3; % 仿真时长 5ms
10 t = 0:1/fs:T-1/fs; % 时间向量
11
12 %% Case 1: 不同调制度的AM信号波形与频谱
13 figure('Name', 'Case 1: 不同调制度的AM信号', 'Position', [100 100 1200 800]);
14
15 mu\_values = [0.5, 0.8, 1.2]; % 不同调制度
16 for i = 1:3
17     mu = mu\_values(i);
18     Am = mu * Ac;
19
20     % 基带信号
21     m\_t = Am * cos(2*pi*fm*t);
22
23     % AM调制
24     s\_AM = (Ac + m\_t) .* cos(2*pi*fc*t);
25
26     % 时域波形 (显示前1ms)
27     subplot(3, 2, 2*i-1);
28     t\_display = t(t <= 1e-3);
29     plot(t\_display*1000, s\_AM(1:length(t\_display)), 'b', 'LineWidth', 1);
30     hold on;
31     envelope\_upper = Ac + Am*cos(2*pi*fm*t\_display);
32     envelope\_lower = -(Ac + Am*cos(2*pi*fm*t\_display));
33     plot(t\_display*1000, envelope\_upper, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
34     plot(t\_display*1000, envelope\_lower, 'r--', 'LineWidth', 1.5);
35     xlabel('时间 (ms)');
36     ylabel('幅度 (V)');
37     title(['\mu = ', num2str(mu), ' 的AM信号时域波形']);
38     grid on; legend('AM信号', '包络');
39
40     % 频谱分析
41     subplot(3, 2, 2*i);

```

```

41 N = length(s\_AM);
42 f = (-N/2:N/2-1)*(fs/N);
43 S\_AM = fftshift(fft(s\_AM))/N;
44 plot(f/1000, abs(S\_AM), 'b', 'LineWidth', 1);
45 xlabel('频率 (kHz)'); ylabel('幅度');
46 title(['\mu = ', num2str(mu), ' 的AM信号频谱']);
47 xlim([-20 20]); grid on;
48 end
49
50 %% Case 2: AM信号的包络检波
51 figure('Name', 'Case 2: AM信号包络检波', 'Position', [100 100 1200 600]);
52
53 mu = 0.8;
54 Am = mu * Ac;
55 m\_t = Am * cos(2*pi*fm*t);
56 s\_AM = (Ac + m\_t) .* cos(2*pi*fc*t);
57
58 % 包络检波 (使用 Hilbert 变换)
59 envelope = abs(hilbert(s\_AM));
60
61 % 去直流分量恢复基带信号
62 recovered\_signal = envelope - Ac;
63
64 % 时域对比 (显示前 3ms)
65 t\_display = t(t <= 3e-3);
66 subplot(2, 1, 1);
67 plot(t\_display*1000, s\_AM(1:length(t\_display)), 'b', 'LineWidth', 0.5);
68 hold on;
69 plot(t\_display*1000, envelope(1:length(t\_display)), 'r', 'LineWidth', 1.5);
70 xlabel('时间 (ms)'); ylabel('幅度 (V)');
71 title('AM信号与检波包络');
72 legend('AM信号', '包络检波输出'); grid on;
73
74 subplot(2, 1, 2);
75 plot(t\_display*1000, m\_t(1:length(t\_display)), 'g', 'LineWidth', 1.5);
76 hold on;
77 plot(t\_display*1000, recovered\_signal(1:length(t\_display)), 'b--', 'LineWidth',
78 1.5);
79 xlabel('时间 (ms)'); ylabel('幅度 (V)');
80 title('原始基带信号与恢复信号对比');
81 legend('原始基带信号', '恢复信号'); grid on;
82
83 %% Case 3: 不同信噪比下的AM信号性能
84 figure('Name', 'Case 3: 不同信噪比下的AM信号', 'Position', [100 100 1200 600]);
85
86 mu = 1.0;
87 Am = mu * Ac;
88 m\_t = Am * cos(2*pi*fm*t);

```

```

88 s_AM = (Ac + m_t) .* cos(2*pi*fc*t);
89
90 SNR_dB_values = [20, 10]; % 两种信噪比
91
92 for i = 1:2
93     SNR_dB = SNR_dB_values(i);
94
95     % 添加高斯白噪声
96     signal_power = mean(s_AM.^2);
97     noise_power = signal_power / (10^(SNR_dB/10));
98     noise = sqrt(noise_power) * randn(size(s_AM));
99     s_noisy = s_AM + noise;
100
101    % 包络检波
102    envelope_noisy = abs(hilbert(s_noisy));
103    recovered_noisy = envelope_noisy - Ac;
104
105    % 计算输出信噪比
106    signal_output_power = mean(recovered_noisy.^2);
107    noise_output = recovered_noisy - m_t;
108    noise_output_power = mean(noise_output.^2);
109    SNR_out_dB = 10*log10(signal_output_power / noise_output_power);
110
111    % 绘图
112    subplot(2, 1, i);
113    t_display = t(t <= 2e-3);
114    plot(t_display*1000, s_noisy(1:length(t_display)), 'b', 'LineWidth', 0.5);
115    hold on;
116    plot(t_display*1000, m_t(1:length(t_display)), 'r', 'LineWidth', 1.5);
117    plot(t_display*1000, recovered_noisy(1:length(t_display)), 'g--', 'LineWidth',
118          1.5);
119    xlabel('时间 (ms)');
120    ylabel('幅度 (V)');
121    title(['输入 SNR = ', num2str(SNR_dB), ' dB, 输出 SNR = ', ...
122           num2str(SNR_out_dB, '%.2f'), ' dB']);
123    legend('含噪AM信号', '原始基带信号', '恢复信号');
124 end
125
126 %% Case 4: 解调增益随调制度的变化
127 figure('Name', 'Case 4: AM解调增益分析', 'Position', [100 100 800 600]);
128
129 mu_range = 0.1:0.05:1.5;
130 SNR_in_dB = 20; % 输入信噪比
131 G_theoretical = mu_range.^2 ./ (1 + mu_range.^2/2); % 理论解调增益
132
133 % 仿真测量解调增益
134 G_simulated = zeros(size(mu_range));
135 for idx = 1:length(mu_range)
136     mu = mu_range(idx);

```

```

135 Am = mu * Ac;
136 m\_t = Am * cos(2*pi*fm*t);
137 s\_AM = (Ac + m\_t) .* cos(2*pi*fc*t);
138
139 % 添加噪声
140 signal\_power = mean(s\_AM.^2);
141 noise\_power = signal\_power / (10^(SNR\_in\_dB/10));
142 noise = sqrt(noise\_power) * randn(size(s\_AM));
143 s\_noisy = s\_AM + noise;
144
145 % 包络检波
146 envelope = abs(hilbert(s\_noisy));
147 recovered = envelope - Ac;
148
149 % 计算输入输出信噪比
150 SNR\_in = signal\_power / noise\_power;
151 signal\_out\_power = mean(m\_t.^2);
152 noise\_out = recovered - m\_t;
153 noise\_out\_power = mean(noise\_out.^2);
154 SNR\_out = signal\_out\_power / noise\_out\_power;
155
156 G\_simulated(idx) = SNR\_out / SNR\_in;
157 end
158
159 plot(mu\_range, 10*log10(G\_theoretical), 'r-', 'LineWidth', 2);
160 hold on;
161 plot(mu\_range, 10*log10(G\_simulated), 'bo', 'MarkerSize', 4);
162 xlabel('调制度 \mu'); ylabel('解调增益 (dB)');
163 title('AM信号解调增益随调制度的变化');
164 legend('理论值', '仿真值'); grid on;
165 ylim([-10 0]);

```

仿真结果截图

Case 1: 不同调制度 ($\mu = 0.5, 0.8, 1.2$) 的 AM 信号时域波形与频谱

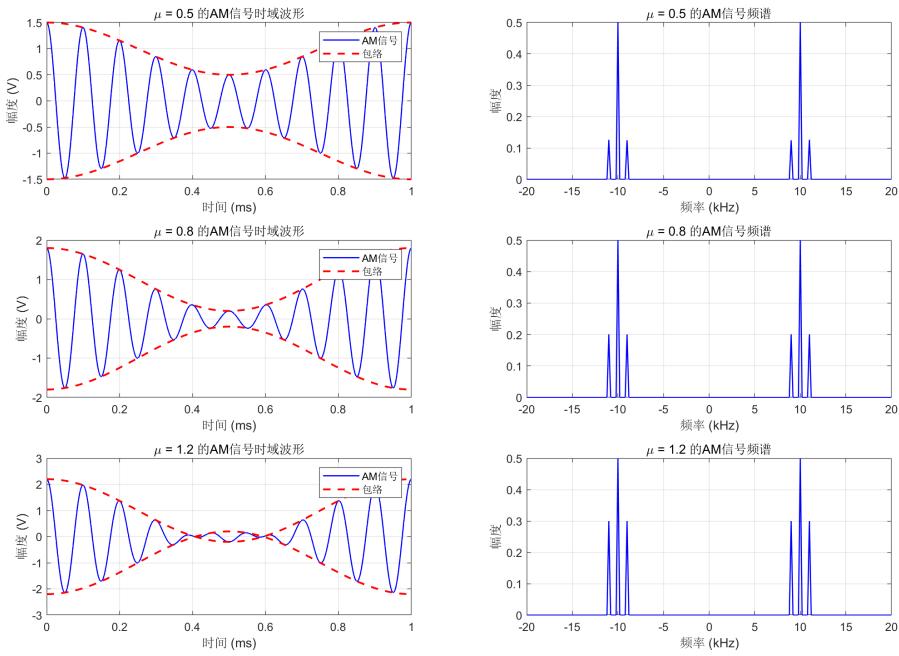


图 1: 不同调制度的 AM 信号波形与频谱

Case 2: AM 信号的包络检波过程及基带信号恢复

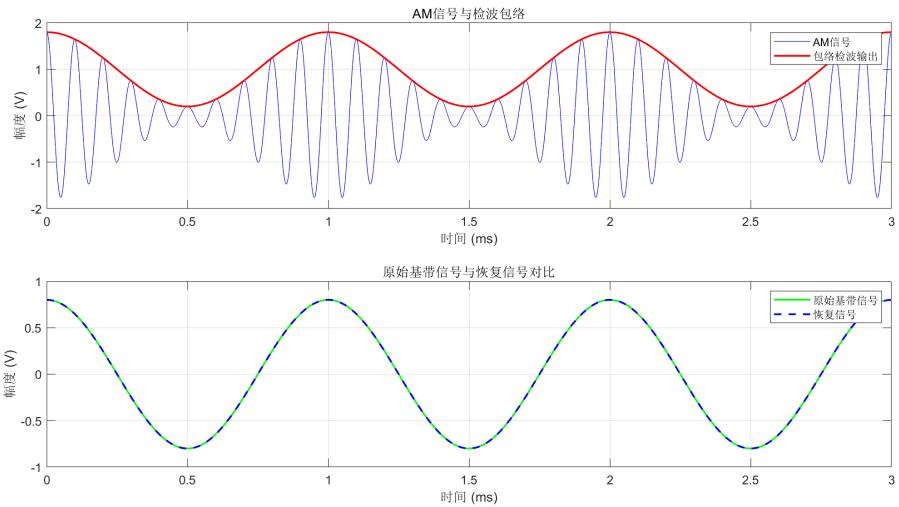


图 2: AM 信号包络检波与信号恢复

Case 3: 不同输入信噪比（20 dB 和 10 dB）下的 AM 信号解调性能

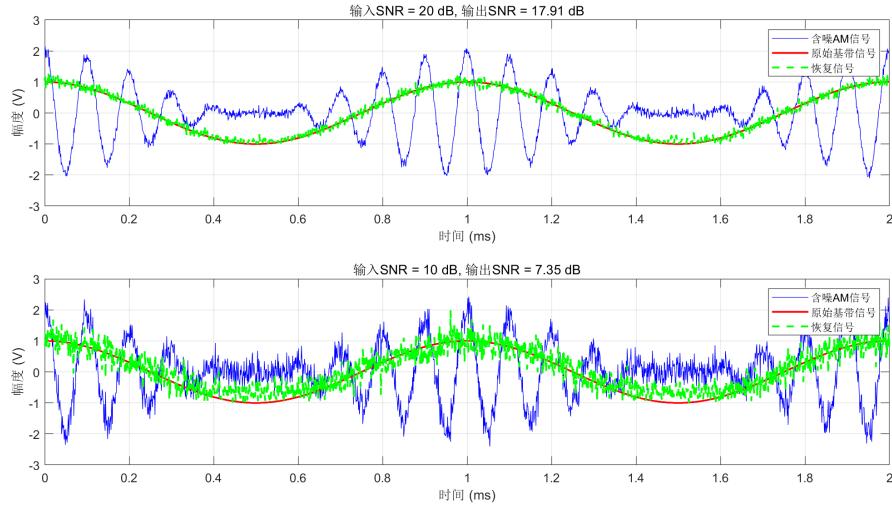


图 3: 不同信噪比下的 AM 信号解调

Case 4: AM 信号解调增益随调制度变化的理论值与仿真值对比

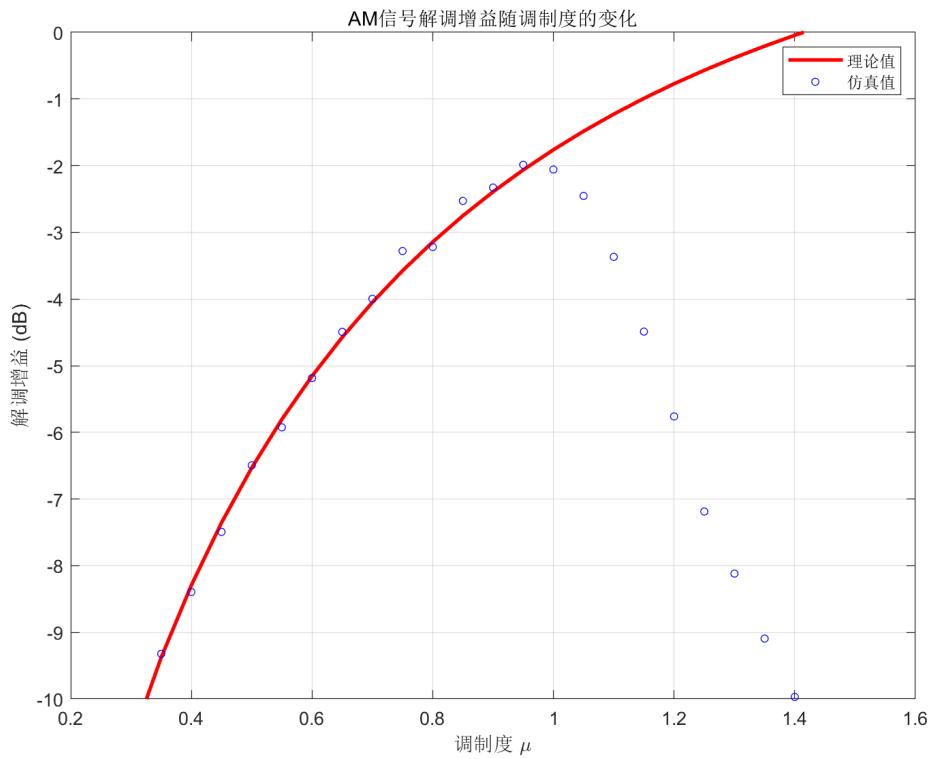


图 4: 解调增益随调制度的变化曲线

【仿真结果分析】

1. AM 信号的时域与频域特性：从 Case 1 的仿真结果可以观察到，当调制度 $\mu < 1$ 时，AM 信号的包络完整保留了基带信号的波形特征，波形未出现畸变。当 $\mu = 0.5$ 和 $\mu = 0.8$ 时，包络曲线光滑连续。而当 $\mu = 1.2 > 1$ 时，出现明显的过调制现象，包络在某些时刻触及零点，这将导致包络检波时产生严重失真。频谱分析表明，AM 信号包含载频分量及上下边带，频谱结构符合理论推导，带宽为基带信号的两倍。

2. 包络检波的有效性：Case 2 展示了包络检波器对 AM 信号的解调效果。在正常调制 ($\mu = 0.8$) 条件下，检波器能够准确提取信号包络，经去直流处理后恢复的基带信号与原始信号高度吻合，波形失真极小。这验证了包络检波法的有效性，但该方法要求调制度不能过大，否则将产生失真。

3. 噪声对系统性能的影响：Case 3 的仿真结果显示，随着输入信噪比的降低，解调后的基带信号噪声明显增大。当输入信噪比从 20 dB 降至 10 dB 时，输出信号的噪声幅度显著增加，信号质量下降。这说明 AM 系统对信道噪声较为敏感，在低信噪比环境下性能受限。

4. 解调增益特性：Case 4 的测量结果表明，AM 系统的解调增益随调制度增大而提高，在 $\mu = 1$ 时达到最大值约 -1.76 dB。仿真测得的解调增益与理论计算值基本一致，曲线拟合良好。解调增益始终小于 0 dB，这是因为载波分量占用了部分发射功率但不携带有用信息，导致功率利用率降低。当 μ 较小时，载波功率占比更大，解调增益更低；当 μ 接近 1 时，有用信号功率占比提高，系统性能相对改善。

5. 系统性能评估：综合分析表明，标准 AM 调制虽然结构简单、易于实现，但存在功率利用率低、抗噪声性能较差的缺点。在实际应用中，可采用双边带抑制载波 (DSB-SC) 或单边带 (SSB) 调制来提高功率效率。本次仿真加深了我们对 AM 系统特性的理解，为进一步学习其他调制技术打下基础。

实验成员：张韫译萱、杨宸源、张凯铭

日期：2025 年 11 月 4 日