

成绩评定:

分

北京理工大学

# 本科生研究型课程专题报告

题 目： 三种调制方式下理想与椭圆滤波器性能对比仿真分析

课程名称:	信号处理理论与技术 I
报告形式:	<input type="checkbox"/> 个人 <input checked="" type="checkbox"/> 小组
姓 名:	[REDACTED]
学 号:	[REDACTED]
学 院:	信息与电子学院
专 业:	电子信息工程
班 级:	[REDACTED]
授课教师:	[REDACTED]



## 摘要

本文围绕 DSB、SSB、VSB 三种调制方式，对其在理想滤波器与椭圆滤波器下的性能进行了仿真分析。首先阐述了三种调制解调的原理，包括信号的调制与解调过程及相关公式推导。随后通过仿真实验，在无噪和有噪条件下，分别对比了不同调制方式结合不同滤波器的效果，分析了误差率等性能指标。最后总结得出，理想滤波器性能优于椭圆滤波器，SSB 相移法和 VSB 调制能降低对滤波器的严苛要求，为实际通信系统的设计提供了参考。

## 1. 三种调制解调原理

### 1.1 DSB 调制解调原理

由于课程中已对 DSB 调制与解调进行过详细学习，此处仅做简单介绍。

下图为基带信号  $m(t)$  和高频载波相乘实现 DSB 信号的调制示意图：

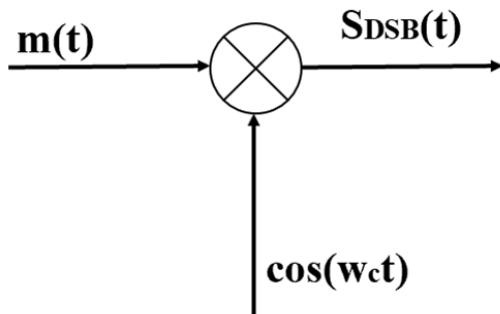


图 1 基带信号  $m(t)$  和高频载波相乘实现 DSB 信号的调制

基带信号  $m(t)$  和高频载波相乘实现 DSB 信号的调制，即：

$$S_{DSB}(t) = m(t) \cdot \cos(\omega_c t)$$

DSB 信号经过信道传输之后，再和载波相乘，然后经过低通滤波后恢复出原始基带信号，其过程为： $S_{DSB}(t)$  经信道传输得到  $S'_{DSB}(t)$ ， $S'_{DSB}(t)$  与  $\cos(\omega_c t)$  相乘后通过低通滤波器（LPF）得到  $m(t)$ ，示意图如下：

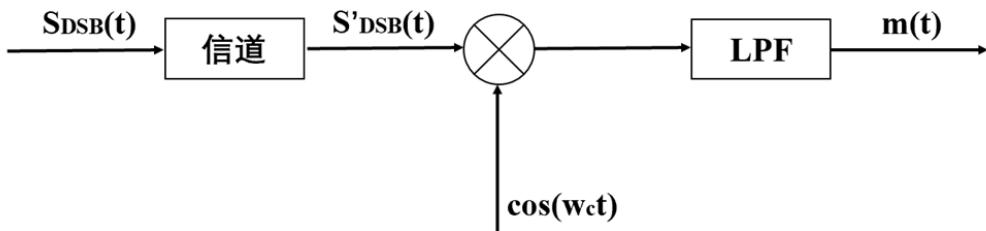


图 2 DSB 解调

### 1.2 SSB 调制解调原理

单边带调制（SSB）是通信中的一种调制方式，其目的是在传输过程中仅保留载波的一个边带，从而有效提高频谱利用效率。在 DSB 调制的信号频谱中可以看出，调制信号的上下边带均保留了一个完整的原本信号的频谱特征，所以只需传输一个边带即可，这也是 SSB 调制的原理所在。另外，本文设计的信号均为实信号，其频谱本身就是一个偶函数。在 SSB 调制中，信号只占据单边频谱，另一半则被抑制，因此可以减少所需的带宽，提高信号传输的效率。

### 1.2.1 SSB 滤波法调制

SSB 滤波法调制原理示意图为： $m(t)$ 生成 $S_{DSB}(t)$ ，再经过 SSB 滤波器得到 $S_{SSB}(t)$ ，其中 $S_{DSB}(t) = m(t) \cdot \cos(\omega_c t)$ 。

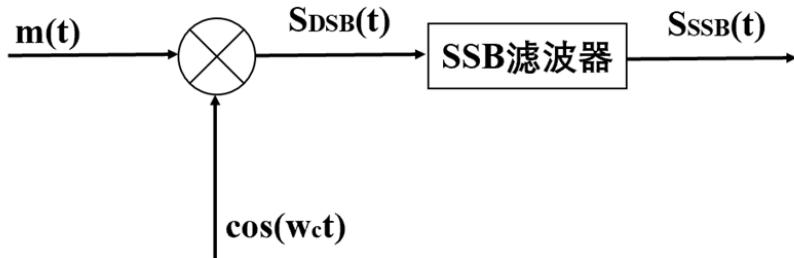


图 3 SSB 滤波法调制原理

- 设基带信号 $m(t)$ （最高频率 $f_m$ ），其频谱为 $M(f)$ 。 $(\omega = 2\pi f)$
- 生成 DSB 调制信号：载波 $c(t) = \cos(\omega_c t)$ ，DSB 调制信号为 $S_{DSB}(t) = m(t) \cdot \cos(\omega_c t)$ ，其频谱（利用傅里叶变换的调制性质）为 $S_{DSB}(f) = [M(f + f_c) + M(f - f_c)]/2$ ，包含上边带（USB： $|f| > f_c$ ）和下边带（LSB： $|f| < f_c$ ）。
- 边带滤波（以保留上边带为例）：通过带通滤波器（BPF）滤除下边带，保留上边带，即 $S_{USB}(f) = S_{DSB}(f) \cdot H_{BPF}(f)$ ，其中 $H_{BPF}(f) = \begin{cases} 1 & |f| > f_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$ 。

### 1.2.2 SSB 相移法调制

SSB 相移法调制原理涉及希尔伯特变换和正交调制。下图为 SSB 相移法调制原理示意图：

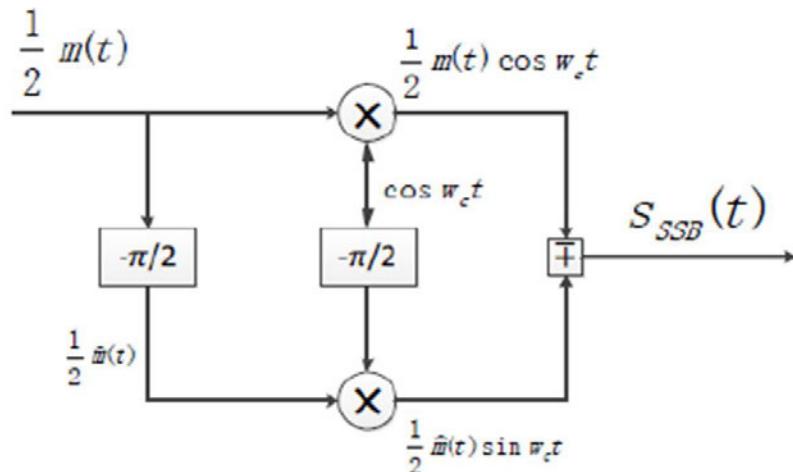


图 4 SSB 相移法调制原理

- 希尔伯特变换：基带信号 $m(t)$ 的希尔伯特变换 $\hat{m}(t)$ 是将所有频率分量相移 $-90^\circ$ ，即 $\hat{m}(t) = H\{m(t)\}$ ，其傅里叶变换为 $F\{\hat{m}(t)\} = -j \cdot sgn(f) \cdot M(f)$ ，其中 $sgn(f)$ 是符号函数。
- 正交调制：同相支路为 $m(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$ ，正交支路为 $\hat{m}(t) \cdot \sin(2\pi f_c t)$ 。USB 信号合成为： $S_{USB}(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t) - \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)$ （下边带时改减号为加号）。
- 对 $S_{USB}(t)$ 做傅里叶变换并化简后可得：

$$\begin{aligned}
 F\{S_{USB}(t)\} &= F\{m(t) \cos(2\pi f_c t)\} - F\{\hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)\} \\
 &= \frac{1}{2} * [M(f - f_c) + M(f + f_c)] - \frac{1}{2j} * [F\{\hat{m}(t)\} * (\delta(f - f_c) - \delta(f + f_c))] \\
 &= \frac{1}{2} * [M(f - f_c) + M(f + f_c)] \\
 &\quad - \frac{[(-j \cdot \text{sgn}(f) M(f)) * (\delta(f - f_c) - \delta(f + f_c))]}{2j} \\
 &= \frac{1}{2} * [M(f - f_c) * (1 + \text{sgn}(f - f_c)) + M(f + f_c) * (1 - \text{sgn}(f + f_c))]
 \end{aligned}$$

化简后得:  $S_{USB}(f) = \begin{cases} M(f - f_c) & f > f_c \\ M(f + f_c) & f < -f_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$

- 结论为频谱仅保留上边带。

### 1.2.3 SSB 相干解调

SSB 相干解调原理示意图为:  $S_{SSB}(t)$  经信道传输得到  $S'_{SSB}(t)$ ,  $S'_{SSB}(t)$  与  $\cos(2\pi f_c t)$  相乘后通过 LPF 得到  $m(t)$ 。

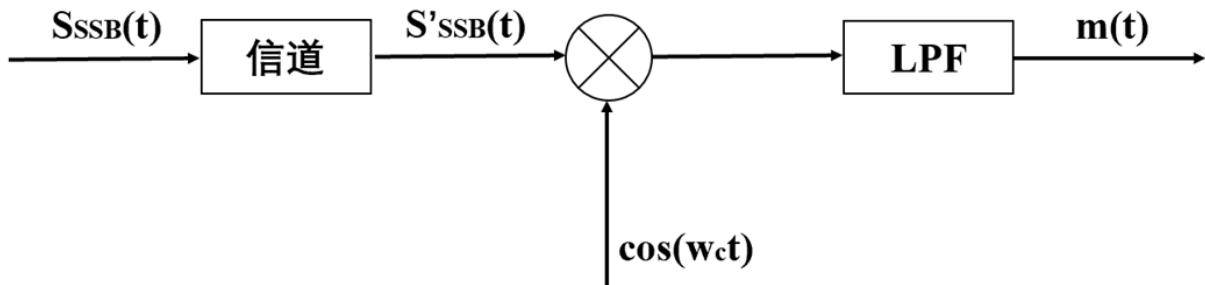


图 5 SSB 相干解调原理

- 接收信号: 设接收的 USB 信号为  $S_{USB}(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t) - \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)$
- 与本地载波相乘: 本地载波  $\cos(2\pi f_c t)$  (假设同频同相), 则  $v(t) = S_{USB}(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$
- 展开计算:  $v(t) = [m(t) \cos(2\pi f_c t) - \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t)] \cos(2\pi f_c t)$   
 $= m(t) \cos^2(2\pi f_c t) - \hat{m}(t) \sin(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_c t)$   
 $= \frac{m(t)(1 + \cos(4\pi f_c t))}{2} - \hat{m}(t) \cdot \frac{\sin(4\pi f_c t)}{2}$   
 $= m(t)/2 + m(t) \cos(4\pi f_c t)/2 - \hat{m}(t) \sin(4\pi f_c t)/2$
- 低通滤波 (LPF): 滤除高频分量  $\cos(4\pi f_c t)$  和  $\sin(4\pi f_c t)$ , 保留  $y(t) = m(t)/2$
- 解调成功, 恢复原始基带信号 (幅度减半)。

### 1.3 VSB 调制解调原理

残留边带调制 (VSB) 是在双边带调制的基础上, 通过设计滤波器, 使信号一个边带的频谱成分原则上保留, 另一个边带频谱成分只保留小部分 (残留)。该调制方法既比双边带调制节省频谱, 又比单边带易于解调, 并且对滤波器的边缘陡峭程度要求比 SSB 低。

#### 1.3.1 VSB 调制过程

VSB 调制原理示意图为:  $m(t)$  生成  $S_{DSB}(t)$ , 再经过残留边带滤波器得到  $S_{VSB}(t)$ , 其中  $S_{DSB}(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t) \leftarrow F \rightarrow S_{DSB}(f) = [M(f - f_c) + M(f + f_c)]/2$ 。

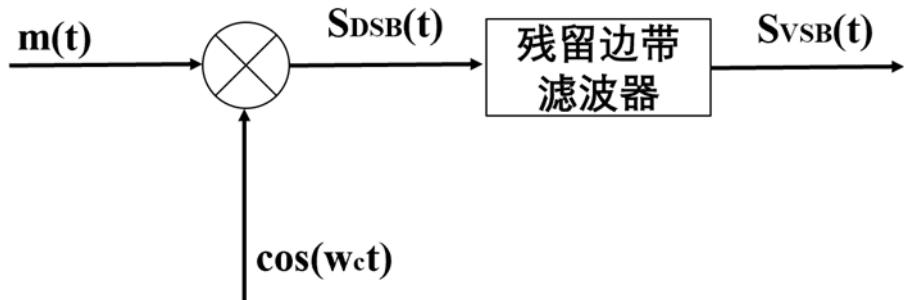


图 6 VSB 调制原理

通过 VSB 滤波器: 传递函数  $H_{VSB}(f)$  需满足  $H_{VSB}(f + f_c) + H_{VSB}(f - f_c) = C (\forall |f| \in [0, fm])$ , 其物理意义为载频  $f_c$  两侧关于  $f$  的响应互补。下图为满足条件的滤波器响应曲线例子:

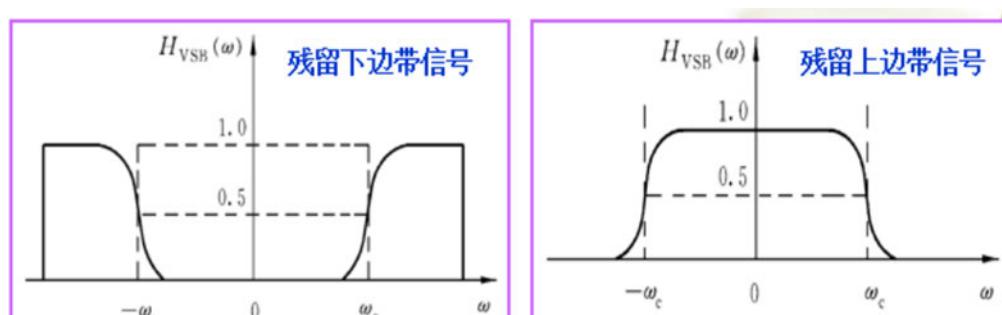


图 7 滤波器响应曲线

VSB 信号频谱为:

$$S_{VSB}(f) = S_{DSB}(f) \cdot H_{VSB}(f) = 1/2 * [M(f - f_c) + M(f + f_c)] * H_{VSB}(f)$$

### 1.3.2 VSB 相干解调

VSB 相干解调原理示意图为:  $S_{VSB}(t)$  经信道传输得到  $S'_{VSB}(t)$ ,  $S'_{VSB}(t)$  与  $\cos(2\pi f_c t)$  相乘后通过 LPF 得到  $m(t)$ 。

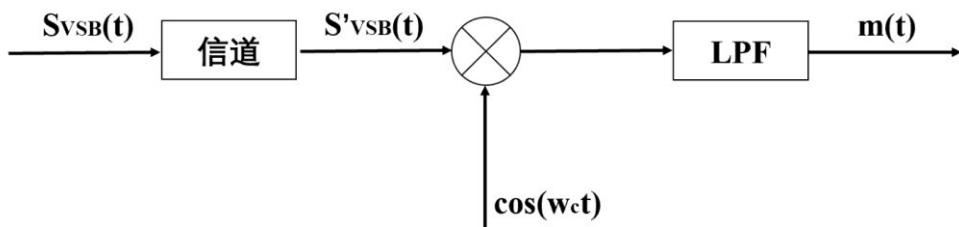


图 8 VSB 相干解调原理

- 接收信号:  $S_{VSB}(t)$ 。
- 乘以本地载波:  $v(t) = S_{VSB}(t) \cdot \cos(2\pi f_c t)$
- 其频谱搬移为  $V(f) = 1/2 * [S_{VSB}(f - f_c) + S_{VSB}(f + f_c)]$
- 关键步骤: 代入  $S_{VSB}(f)$  表达式, 利用滤波器互补条件化简:

$$V(f) = \frac{1}{2} * [S_{VSB}(f - f_c) + S_{VSB}(f + f_c)]$$

$$S_{VSB}(f) = S_{DSB}(f) \cdot H_{VSB}(f) = 1/2 * [M(f - f_c) + M(f + f_c)] * H_{VSB}(f)$$

$$S_{VSB}(f - f_c) = 1/2 * [M(f - 2f_c) + M(f)] * H_{VSB}(f - f_c)$$

$$S_{VSB}(f + f_c) = \frac{1}{2} * [M(f) + M(f + 2f_c)] * H_{VSB}(f + f_c)$$

结合上式，有：

$$V(f) = \frac{1}{4} * M(f) * [H_{VSB}(f - f_c) + H_{VSB}(f + f_c)] + \text{高频分量}$$

推出互补条： $H_{VSB}(f - f_c) + H_{VSB}(f + f_c) = \text{常数} C$ 。

- 低通滤波：恢复基带信号  $y(t) = \frac{1}{4} C * m(t)$ 。

此外，VSB 包络检波解调仅当 VSB 中加入大载波时可行（类似 AM），即：

$$S_{VSB} + \text{Carrier}(t) = A \cos(2\pi f_c t) + S_{VSB}(t)$$

其包络正比于  $m(t)$ ，残留部分补偿了边带不对称性，使包络无失真。

## 1.4 椭圆滤波器

这里我们额外介绍一种滤波器——椭圆滤波器。

椭圆滤波器是在通带等波纹、阻带等波纹衰减的一种滤波器，相比其他类型的滤波器，在阶数相同的条件下有着最小的通带和阻带波动。

其在有限频率上既有零点又有极点。极零点在通带内产生等波纹，阻带内的有限传输零点减少了过渡区，可获得极为陡峭的衰减曲线。也就是说在阶数相同的条件下，椭圆滤波器相比于其他类型的滤波器，能获得更窄的过渡带宽和较小的阻带波动，就这点而言，椭圆滤波器是最优的。它陡峭的过渡带特性是用通带和阻带的起伏为代价来换取的，并且在通带和阻带的波动相同。

其振幅平方函数为：

$$|H_a(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 R_N^2(\frac{\Omega}{\Omega_p})}$$

其中  $R_N(x)$  是雅可比 (Jacobi) 椭圆函数， $\varepsilon$  为与通带衰减有关的参数。

下图是典型的椭圆滤波器的幅度特性：

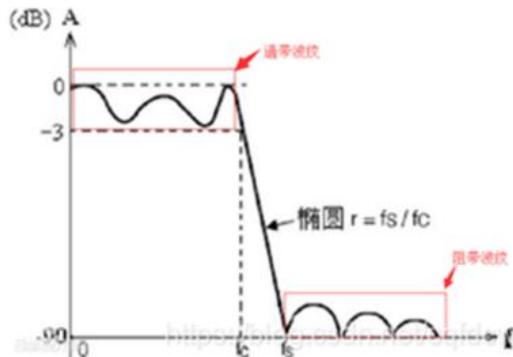


图 9 椭圆滤波器的幅度特性

## 2. 仿真流程与结果

### 2.1 无噪 SSB 相关仿真

#### 2.1.1 无噪 SSB 理想滤波器滤波法调制与解调

仿真参数设置：采样率  $f_s=20000$ ；采样点数  $N=40000$ ；载波频率  $f_c=2000\text{Hz}$ ；载波幅度  $Ac=1$ ；基带信号为随机生成的取值为  $-1$  或  $1$  的数字信号，频率  $f_m=50\text{Hz}$ ，接着根据基带信号生成 99 个码元，每个码元的周期为  $0.02\text{s}$ ，每个码元的采样点数为 404，这样做是

因为码元边界不一定从采样点开始，模拟实际信号，要生成随机相位偏移；调制系数  $Ka=1$ 。

得到载波信号、载波频域、基带信号、基带频域图像，如下图：

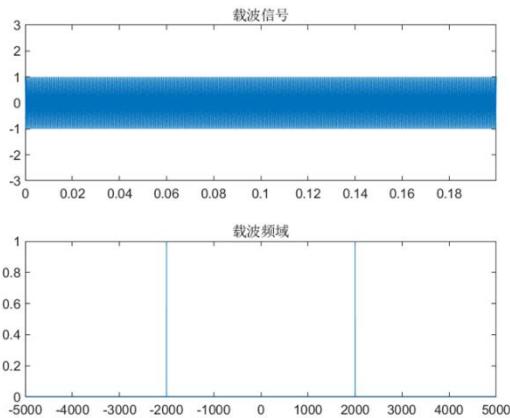


图 10 载波信号、载波频域

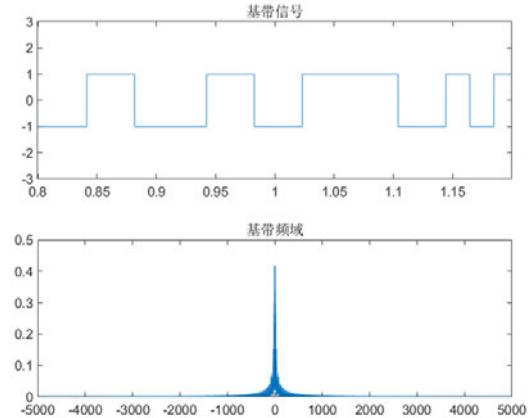


图 11 基带信号、基带频域

首先进行 DSB 调制得到相应信号(左)，然后使用截止频率为 2000Hz 的理想低通滤波器进行滤波，得到单边带信号（右）。

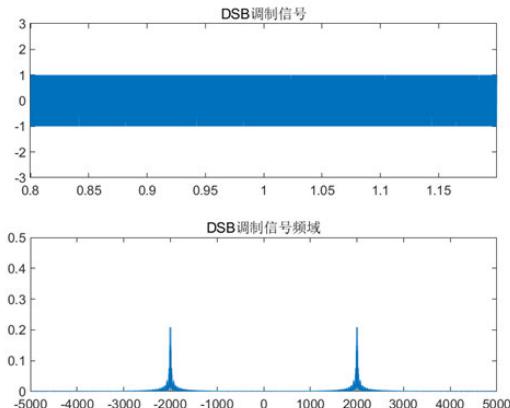


图 12 DSB 调制得到相应信号

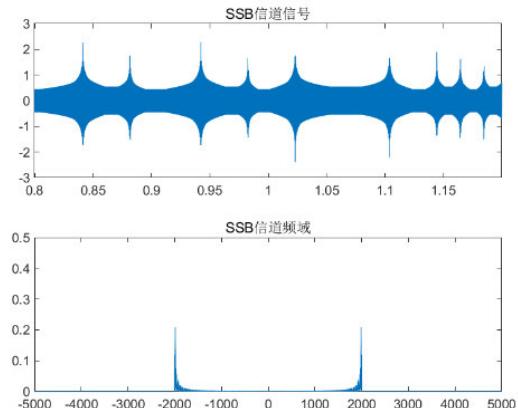


图 13 单边带信号

对调制后的信号进行相干解调，再使用低通滤波器滤除高频分量，并调整幅度，乘一个增益因子 $4/(Ka * Ac^2)$ 补偿解调过程中的衰减，与原始信号对比，解调后波形与原波形非常接近。

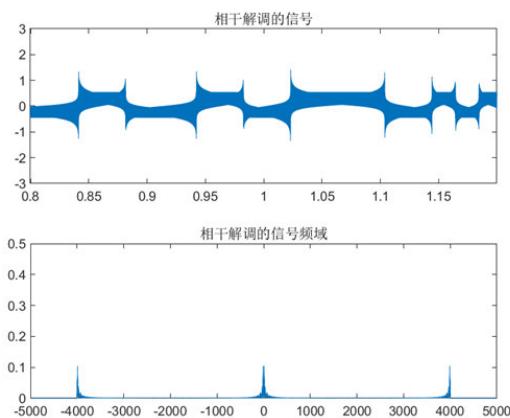


图 14 相干解调信号

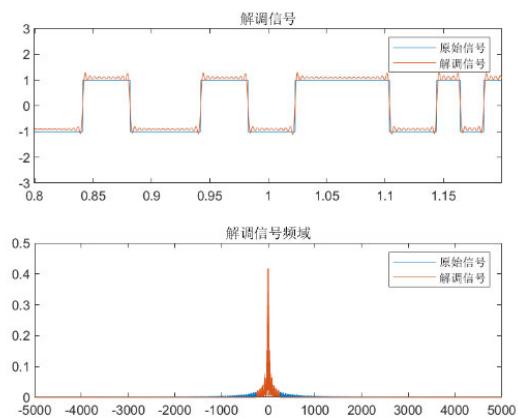


图 15 解调信号与原始信号对比

利用施密特触发器将解调后的模拟信号转化为与基带信号类似的取值为 -1 或 1 的数字信号。

施密特触发器阈值设为-0.5 和 0.5:

- ① 当解调后的幅值大于 0.5 时，输出的整型信号为 1。
- ② 当解调后的幅值小于-0.5 时，输出的整型信号为-1。
- ③ 当解调后的幅值介于-0.5 与 0.5 之间时，本时刻输出的整型信号与上一时刻的输出的整型信号相同。

由此得到转化后的整型信号和误差波形，如下图：

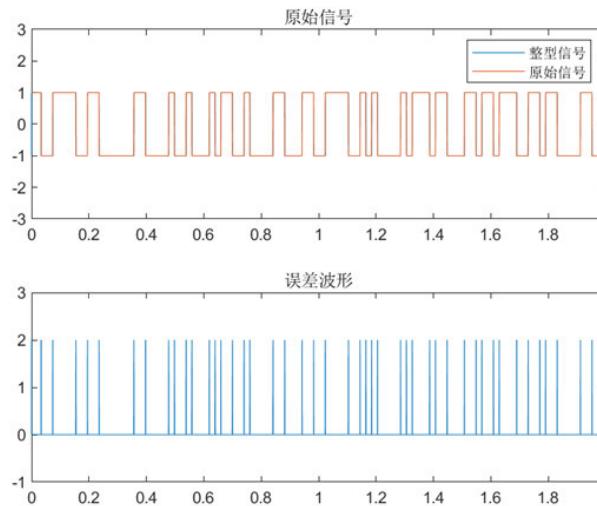


图 16 转化后的整型信号和误差波形

得到误差点数为 484，误差率为 1.21%，可见在无噪条件下，使用理想滤波器进行 SSB 调制，解调后得到的整型信号与原始信号非常接近。

### 2.1.2 无噪 SSB 理想滤波器相移法调制与解调

在 DSB 调制后，使用相移法调制得到 SSB 信号，其余步骤与滤波法相同，最终得到解调信号及其频域、转化后的整型信号和误差波形，如下图：

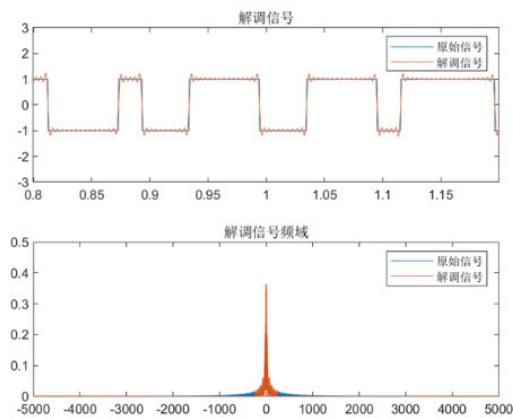


图 17 解调信号及其频域

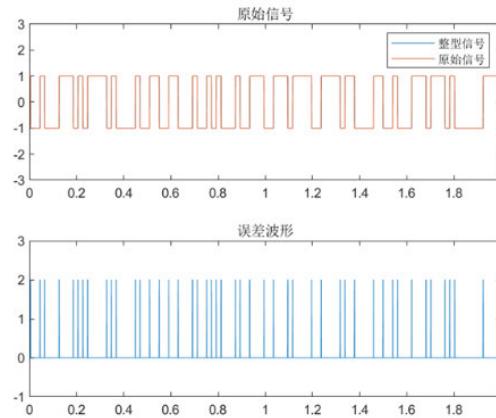


图 18 转化后的整型信号和误差波形

得到误差点数为 478，误差率为 1.20%，可以看出在理想滤波器条件下，利用相移法进行 SSB 调制，解调后得到的整型信号与原始信号非常接近，并且与滤波法相差不大。

### 2.1.3 无噪 SSB 椭圆滤波器滤波法调制与解调

因为实际中我们无法搭建一个理想滤波器，而椭圆滤波器截止频率附近的边缘比较陡峭，所以我们这里将利用椭圆滤波器替换理想滤波器。

椭圆滤波器参数配置：滤波器阶数  $N=7$ ；截止频率 2000Hz；通带波纹  $R_p=0.1\text{dB}$ ；阻带衰减  $R_s=40\text{dB}$ 。

我们给出椭圆低通滤波器的幅频响应，如下图：

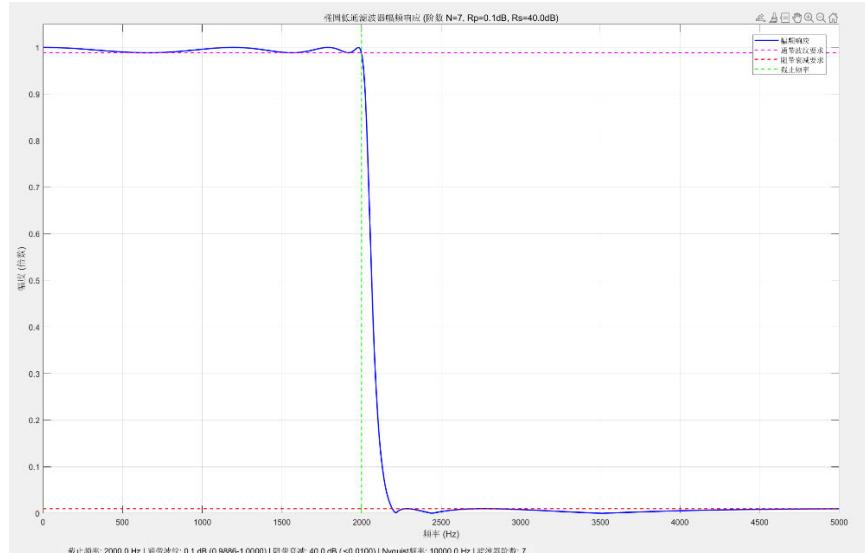


图 19 椭圆低通滤波器的幅频响应

进行 DSB 调制后，使用上述椭圆低通滤波器进行滤波得到单边带信号（左），与理想滤波器滤波后的单边带信号（右）比较，椭圆滤波器另半边带依旧有频率成分存在，没有彻底滤除。

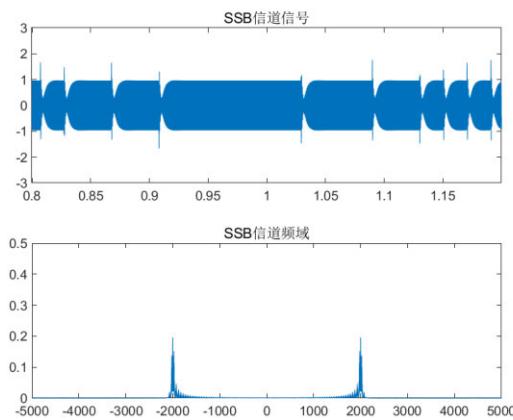


图 20 椭圆低通滤波器单边带信号

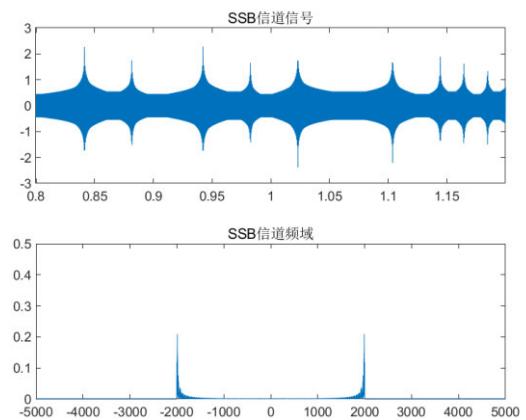


图 21 理想滤波器滤波单边带信号

对调制后的信号进行解调，具体处理步骤与前面仿真实验相同，最终得到解调信号及其频域、转化后的整型信号和误差波形，如下图：

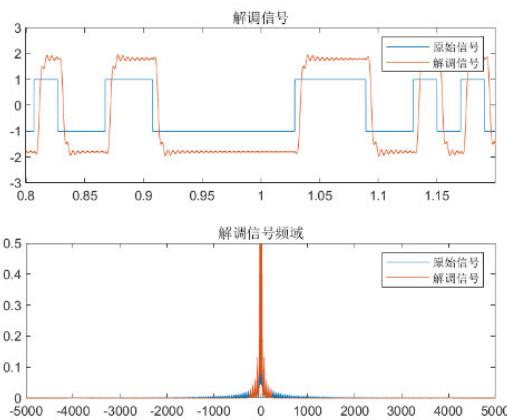


图 22 解调信号及其频域

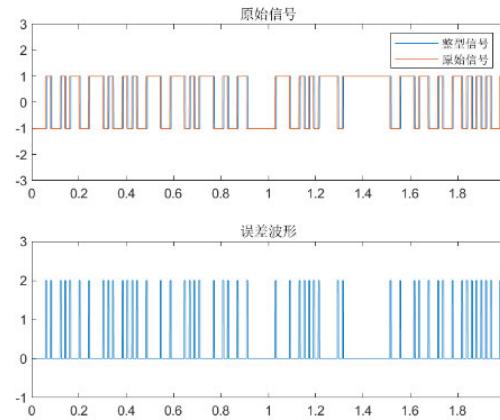


图 23 转化后的整型信号和误差波形

得到误差点数为 5203，误差率为 13.01%，可见在无噪条件下，使用椭圆滤波器进行 SSB 调制明显不如理想滤波器进行 SSB 调制的效果好，这是因为与理想滤波器相比，椭圆滤波器边缘不够陡峭，对另外半边带的波形滤除不彻底。

#### 2.1.4 无噪 SSB 椭圆滤波器相移法调制与解调

为了改善上述缺点，我们利用相移法进行 SSB 调制：

在 DSB 调制后，我们使用相移法调制得到 SSB 信号，其余步骤与滤波法相同，最终得到解调信号及其频域、转化后的整型信号和误差波形，如下图：

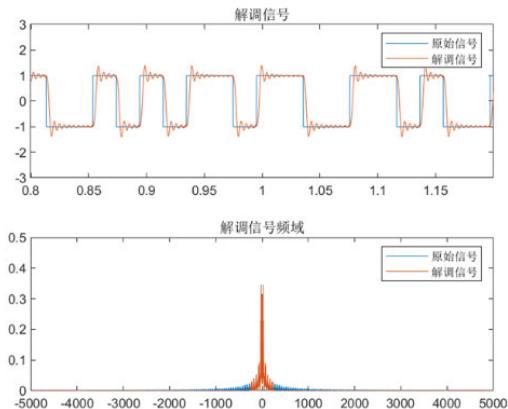


图 24 解调信号及其频域

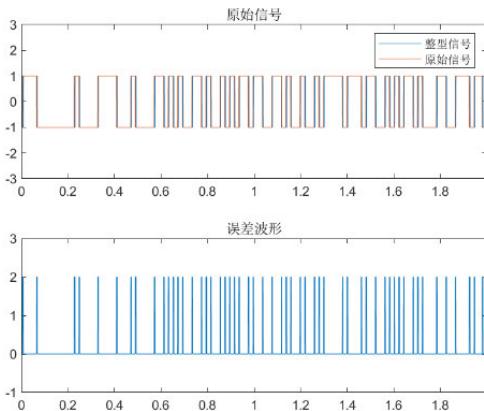


图 25 转化后的整型信号和误差波形

得到误差点数：3167，误差率：7.92%，得到的误差率有所改善，说明相移法对滤波器边缘陡峭程度要求不高，可以改善 SSB 滤波法调制对滤波器的严苛要求。

## 2.2 无噪 VSB 相关仿真

### 2.2.1 无噪 VSB 理想滤波器调制与解调

我们设计的 VSB 滤波器频谱特性曲线如下图：

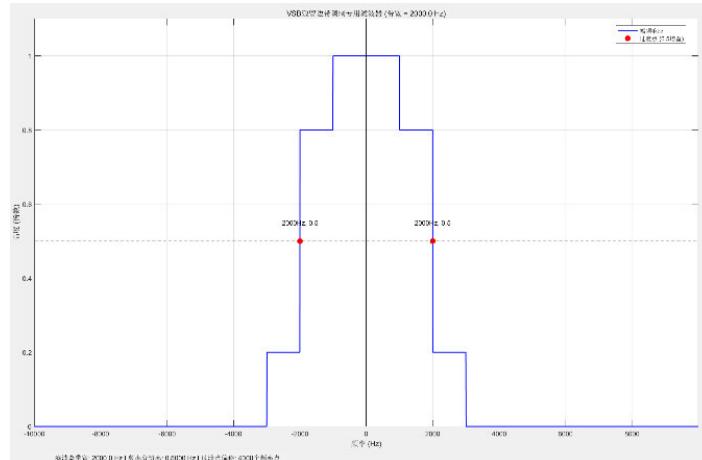


图 26 VSB 滤波器频谱特性曲线

为了简化仿真，我们设计一个理想的 VSB 滤波器，该滤波器幅频特性在临界频率点处发生突变。保留通过 DSB 调制的信号绝大部分下边带的频谱成分，上边带频谱成分只保留小部分。由图象可看出，载波频率  $f_c = 2000\text{Hz}$  时，传递函数  $H_{VSB}(f)$  为：

$$H_{VSB}(f) = \begin{cases} 1 & |f| < 1000 \\ 0.8 & 1000 < |f| < 2000 \\ 0.2 & 2000 < |f| < 3000 \\ 0 & |f| > 3000 \end{cases}$$

满足： $H_{VSB}(f + fc) + H_{VSB}(f - fc) = 1$ ，符合 VSB 滤波器的无失真设计要求。

进行 DSB 调制后，对信号进行 VSB 调制，与 SSB 调制理想滤波器滤波法得到的单边带信号（右）比较，VSB 信号（左）下边带的频谱成分大部分保留，上边带频谱成分只保留小部分。

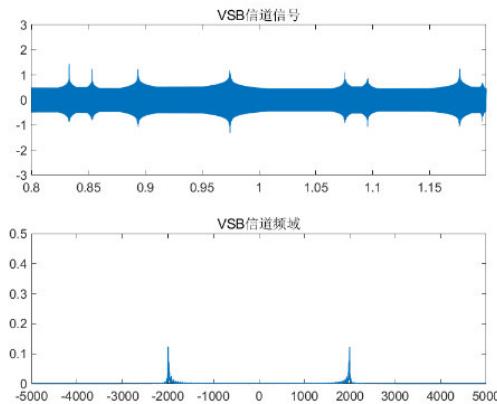


图 27 VSB 信号

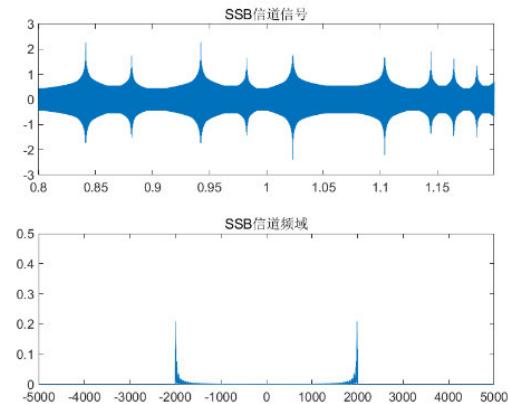


图 28 SSB 信号

对调制后的信号进行解调，使用理想滤波器滤除高频分量，处理步骤与前面仿真实验相同，最终得到解调信号及其频域、转化后的整型信号和误差波形，如下图：

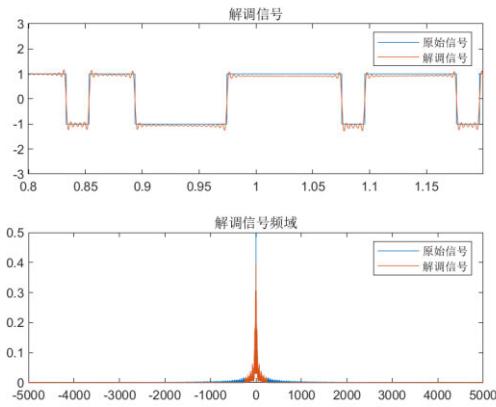


图 29 解调信号及其频域

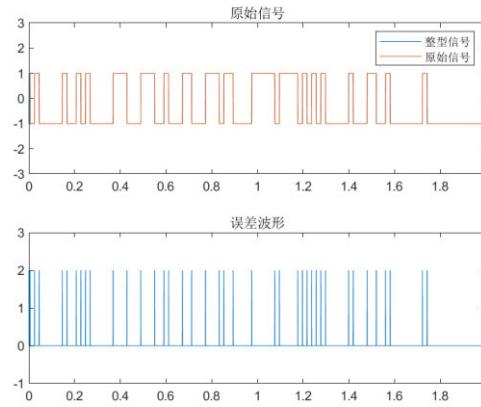


图 30 转化后的整型信号和误差波形

得到误差点数为 424，误差率为 1.06%，可见在使用理想滤波器条件下，进行 VSB 调制，解调后得到的整型信号与原始信号非常接近，并且与 SSB 理想滤波器滤波法相差不大。

### 2.2.2 无噪 VSB 椭圆滤波器调制与解调

在无噪条件进行 VSB 调制，解调后使用椭圆滤波器滤除高频分量，最终得到解调信号及其频域、转化后的整型信号和误差波形，如下图：

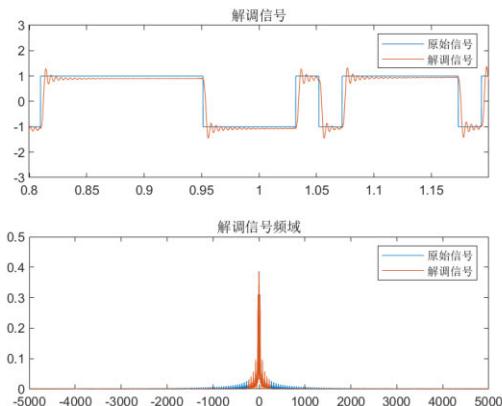


图 31 解调信号及其频域

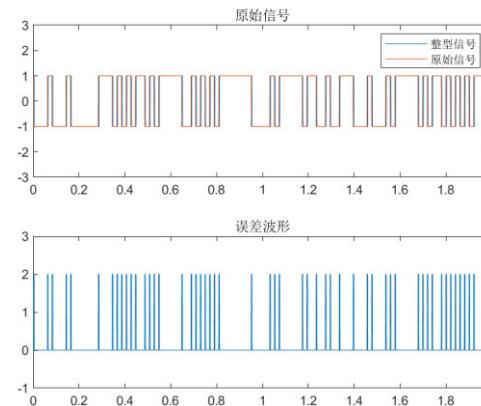


图 32 转化后的整型信号和误差波形

得到误差点数为 3044，误差率为 7.61%，可以看出在使用椭圆滤波器条件下，VSB 调制与 SSB 调制椭圆滤波器滤波法相比改善很多，说明 VSB 调制对滤波器边缘陡峭程度要求不高，并且不需要像 SSB 调制相移法一样使用复杂的希尔伯特电路。

### 2.3 有噪情况下的相关仿真

有噪情况下的仿真实验过程与无噪情况类似。我们不具体给出。下面探究不同信噪比下的调制情况：

在不同信噪比下，利用理想滤波器、椭圆滤波器进行 SSB 滤波法调制的误差率对比显示如下图所示：

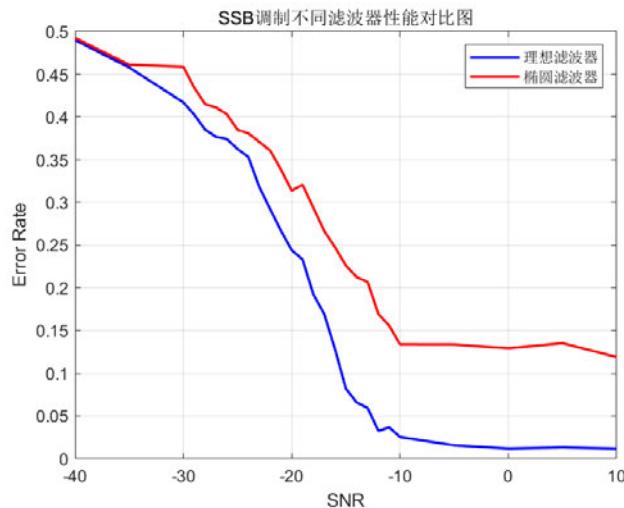


图 33 不同信噪比下，理想滤波器、椭圆滤波器进行 SSB 滤波法调制的误差率

可以看出：理想滤波器误差率低于椭圆滤波器误差率，并且在  $\text{SNR} > -10 \text{ dB}$  时，两者误差率基本稳定且差距最大，说明在有噪条件下，使用椭圆滤波器进行 SSB 调制明显不如理想滤波器进行 SSB 调制的效果好，进一步说明了 SSB 滤波法调制对滤波器边缘陡峭程度要求很高。

在不同信噪比下，利用椭圆滤波器进行 SSB 滤波法、相移法调制的误差率对比显示如下图所示：

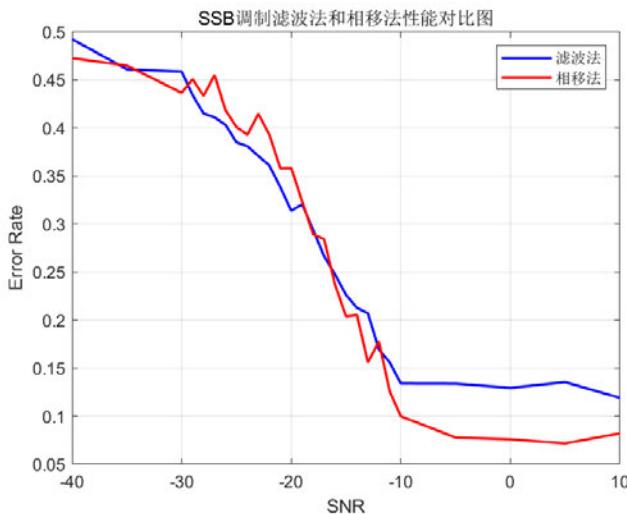


图 34 不同信噪比下，椭圆滤波器进行 SSB 滤波法、相移法调制的误差率  
可以看出：

- 1) 在强噪声条件下 ( $\text{SNR} < -10 \text{ dB}$ )，由于噪声的影响，滤波法、相移法的误差率相近。
- 2) 在噪声较小时 ( $\text{SNR} > -10 \text{ dB}$ )，相移法误差率低于滤波法误差率，两者误差率基本稳定且差距最大，说明相移法对滤波器边缘陡峭程度要求不高，可以改善 SSB 滤波法调制对滤波器的严苛要求。

在不同信噪比下，利用椭圆滤波器进行 SSB 滤波法调制、VSB 调制的误差率对比显示如下图所示：

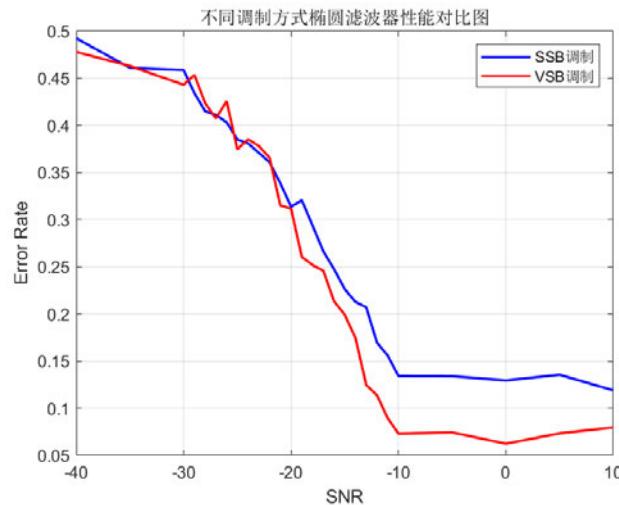


图 35 不同信噪比下，椭圆滤波器进行 SSB 滤波法调制、VSB 调制的误差率可以看出：

- 1) 在强噪声条件下 ( $\text{SNR} < -20\text{dB}$ )，由于噪声的影响，SSB 滤波法调制、VSB 调制的误差率相近。
- 2) 在噪声较小时 ( $\text{SNR} > -20\text{dB}$ )，VSB 调制误差率低于 SSB 滤波法调制误差率，两者误差率随着噪声减小逐渐趋于稳定，说明 VSB 调制对滤波器边缘陡峭程度要求不高，并且不需要像 SSB 调制相移法一样使用复杂的希尔伯特电路。

## 2.4 SSB、VSB 调制不同滤波法对比

接着我们计算误码率，首先确定译码序列，确定最佳采样位置，这里采用码元周期的中间位置，此时受其他码元干扰较小，绘制 SSB 和 VSB 调制下，分别使用理想滤波器和椭圆滤波器，误码率随信噪比变化曲线，如图所示：

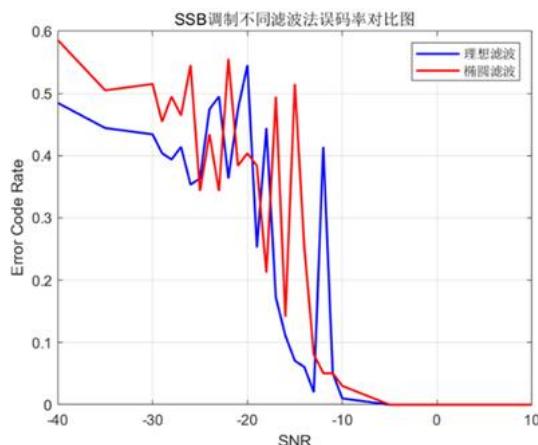


图 36 SSB 调制不同滤波法误码率对比图

可以看出：

- 1) 在低噪声 ( $\text{SNR} > -10\text{dB}$ ) 条件下，SSB 调制和 VSB 调制的理想与椭圆滤波法的误码率均较低
- 2) 在强噪声 ( $\text{SNR} > -10\text{dB}$ ) 条件下，误码率均较高，因为此时信道容量过低，几乎失去传送信息的功能

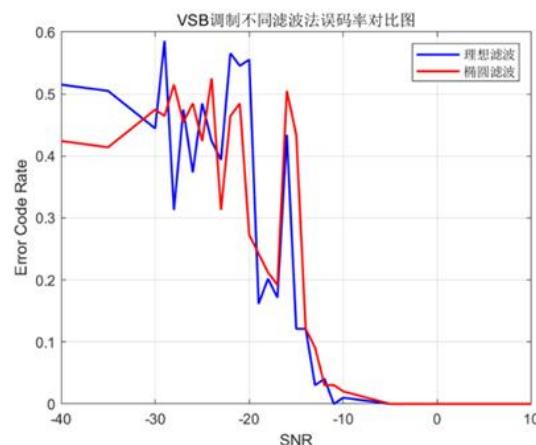


图 37 VSB 调制不同滤波法误码率对比图

尽管椭圆滤波器恢复的波形在所有采样点上误差率较大，波形失真较严重，但由于在低噪声条件下二者效果差别不大，因此实际通信系统中可以使用椭圆滤波器代替理想滤波器进行滤波，仍能起到很好的传输效果。

我们在这里介绍一种衡量调制方法效率的方法——功率利用率，其定义为在给定误比特率条件下能量信噪比。

由上两图可以看出：在低噪声条件下，误码率（纵坐标）相同时，SSB 调制和 VSB 调制的信噪比（横坐标）几乎相同，可以认为 SSB 调制和 VSB 调制在低噪声下功率利用率相等。其本质是因为数字化后的比特率与调制方式无关，仅由信号带宽决定，而带宽与功率是线性缩放关系，使得单位比特能量与噪声密度的比值，即功率利用率保持不变，所以 DSB 调制、SSB 调制、VSB 调制三者的功率利用率都相等。

## 2.5 频谱利用率

我们引出帕塞瓦尔定理，定理表明信号在时域和频域上的能量相等，即：

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega$$

绘制出 DSB 信号、SSB 信号、VSB 信号的能量频谱图，如下图所示：

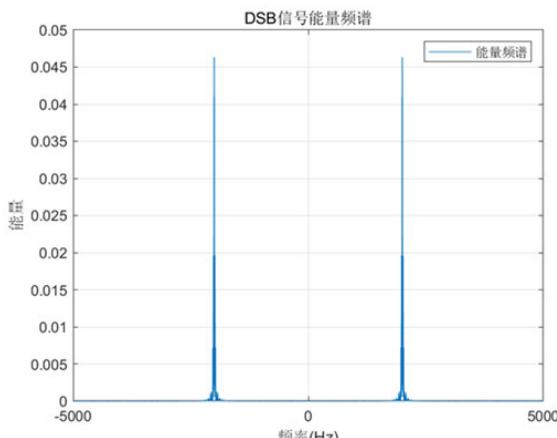


图 38 DSB 信号能量频谱

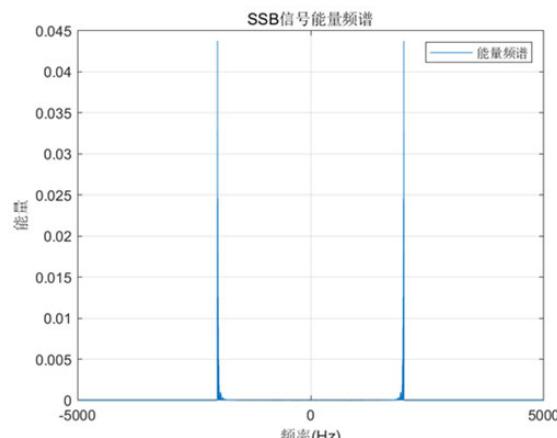


图 39 SSB 信号能量频谱

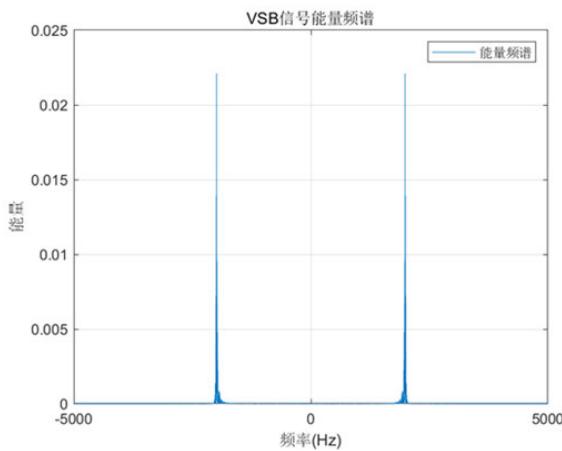


图 40 VSB 信号能量频谱

我们再介绍一种衡量调制方法效率的方法——频谱利用率，其定义为系统所传输的信息速率  $R$  与系统带宽  $W$  的比。

这里采取能量占总能量的 90% 频带的宽度作为带宽，信息速率等于码元速率，即基带信号频率。在上述带宽定义下，DSB 频谱占用率为 0.3472 bps/Hz，SSB 频谱占用率为

0.7092 bps/Hz, VSB 频谱占用率为 0.5405 bps/Hz, 可知: SSB 调制的频谱利用率最大, VSB 调制次之, 最后为 DSB 调制。

### 3. 总结

#### 3.1 三种调制方式对比分析

特性	DSB	SSB	VSB
带宽需求	基带信号带宽的 2 倍 (2B)	与基带信号带宽相同 (B)	略大于基带带宽
频谱利用率	低 (占用双倍带宽)	高 (带宽最小, 利用率最高)	较高 (接近 SSB, 略逊于 SSB)
功率利用率	三者的功率利用率都相等		
解调方式	可用相干解调, 加大载波可用包络检波	必须使用相干解调	可用相干解调, 加大载波可用包络检波
功率消耗	高	低 (仅一个边带, 功率更集中)	较低 (接近 SSB, 略高于 SSB)
实现复杂度	简单 (仅需乘法器和滤波器)	复杂 (需锐截止滤波器或移相网络)	中等 (滤波器设计难度低于 SSB)
噪声性能	信噪比比 SSB 低 (带宽大, 噪声功率高)	信噪比最高 (带宽小, 噪声功率低)	信噪比接近 SSB (略低于 SSB)

#### 3.2 三种调制方式应用场景

- 1) DSB: 主要用于通信理论分析、教学实验以及少数高精度测量信号传输 (如特殊测试系统)。其调制实现简单, 但带宽浪费严重, 频谱利用率低。
- 2) SSB: 适用于窄带语音通信 (如短波无线电、航空通信) 和低速数据传输 (如电报、传统 MODEM)。它带宽效率最高, 功率集中, 抗噪声性能最佳, 但滤波法要求边带滤波器截止频率附近的边缘陡峭, 设计困难, 且需严格载波同步。

- 3) VSB: 常用于电视广播(如 NTSC/PAL 制图像信号、ATSC 数字电视 8 - VSB) 和高速数据传输(如有线 MODEM)。它避免了 SSB 的滤波器锐截止难题, 适合含低频 / 直流信号, 带宽效率接近 SSB, 实现难度低。

### 3.3 滤波器及调制方法相关总结

本报告围绕 DSB、SSB、VSB 三种调制解调原理展开, 通过仿真实验对比了理想滤波器与椭圆滤波器在信号处理中的性能差异, 主要结论如下:

- 1) 调制特性对比: DSB 调制实现简单但带宽利用率低, SSB 带宽效率最高但对滤波器陡峭程度要求严苛, VSB 通过残留边带设计平衡了带宽效率与实现难度, 适合含低频信号的场景。
- 2) 椭圆滤波器的工程适用性: 椭圆滤波器虽在通带、阻带存在波纹, 但其过渡带陡峭特性优于非理想滤波器, 相比理想滤波器, 实际应用中对边带滤除不彻底, 导致 SSB 滤波法调制误差率显著上升(无噪时误差率从 1.21% 升至 13.01%)。
- 3) 调制方法优化: SSB 相移法通过移相网络, 显著降低对滤波器的依赖(误差率从 13.01% 降至 7.92%); VSB 调制因允许残留边带, 对滤波器要求低于 SSB 滤波法(无噪时误差率 7.61% vs. SSB 滤波法 13.01%), 且无需复杂移相电路。
- 4) 噪声影响与性能趋势: 有噪条件下, 理想滤波器始终优于椭圆滤波器; SNR 较高时, 相移法和 VSB 调制的误差率优势更明显, 验证了其工程实用性。
- 5) 功率与频谱利用率: DSB、SSB、VSB 在低噪声下功率利用率相等; 频谱利用率 SSB ( $0.7092 \text{ bps/Hz}$ ) > VSB ( $0.5405 \text{ bps/Hz}$ ) > DSB ( $0.3472 \text{ bps/Hz}$ )。

本研究为实际通信系统中滤波器选型与调制方式优化提供了参考——需陡峭过渡带时优先理想滤波器, 工程实现中可采用相移法或 VSB 调制降低对滤波器的严苛要求, 椭圆滤波器更适合对波纹不敏感、需高效过渡带的场景。

下一步研究可聚焦于: ①结合深度学习优化椭圆滤波器参数, 提升边带滤除精度以降低 SSB 调制误差率; ②研究非线性信道下椭圆滤波器对三种调制方式的影响, 完善实际通信系统的抗噪声优化策略。

## 参考文献

- [1] 王兆华, 杨知行. 单边带与残留边带调制的性能分析 [J]. 通信学报, 2001, 22 (4): 86-91.
- [2] Weinstein S B, Ebert P M. Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform[J]. IEEE Transactions on Communications, 1971, 19(5): 628-634.
- [3] GB/T 17747-2020 声学 声强法测定噪声源声功率级和指向性 第 1 部分：离散点上的测量 [S]. 北京：中国标准出版社，2020.
- [4] 张明。基于 MATLAB 的通信系统调制解调仿真研究 [D]. 西安：西安电子科技大学，2019: 35-48.

## 分工及贡献度

