

【引用格式】高成, 高俊奇, 张鹏飞, 等. 基于信号调制的抗水下电磁扫频干扰方法研究[J]. 数字海洋与水下攻防, 2024, 7(6): 608-615.

基于信号调制的抗水下电磁扫频干扰方法研究

高成^{1, 2, 3, 4}, 高俊奇^{1, 2, 3}, 张鹏飞^{1, 2, 3, *}, 沈莹^{1, 2, 3}, 孙华阳^{1, 2, 3}, 冯泽^{1, 2, 3}

- 青岛哈尔滨工程大学创新发展中心, 山东 青岛 266400;
- 哈尔滨工程大学 水声重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001;
- 哈尔滨工程大学 青岛创新发展基地, 山东 青岛 266400;
- 浙江莫干山地磁大科学装置研究院, 浙江 湖州 313000)

摘要 在水下电磁通信和探测领域, 电磁扫频干扰十分常见, 其频带覆盖范围大, 几乎可以影响工作频带内的所有频率, 降低通信与电磁探测效率。通用的降噪与滤波方法无法消除电磁扫频干扰中与有效信号同频带的成分。研究有效对抗电磁扫频干扰的方法, 提升水下信号质量, 成为业界亟待解决的问题。针对上述技术难题, 提出通过增加信号复杂度的方式增强信号抗电磁扫频干扰性能, 即基于调制技术压制电磁扫频干扰。常用的调制方式包含线性调制、非线性调制和数字调制等, 其中 2ASK (二进制幅移键控)、2FSK (二进制频移键控) 与 BPSK (二进制相移键控) 具有良好的抗干扰性能、抗信道损耗和高安全性等优点。基于 3 种调制解调方法的误码率均建立在白噪声的基础上, 进一步推导了 3 种数字调制方式在仅存电磁扫频干扰以及白噪声、电磁扫频干扰同时存在时的误码率, 并针对 3 种情况进行仿真研究。仿真计算结果表明: 3 种调制解调方式均能有效抑制电磁扫频干扰的影响, 提高水下探测质量。在应对电磁扫频干扰时, 2FSK 调制方式取得最佳性能。

关键词 2ASK; 2FSK; BPSK; 电磁扫频干扰; 数字调制; 误码率

中图分类号 TN97

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2024)06-0608-08

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2024.06.005

Research on Anti-underwater Electromagnetic Sweep Interference Method Based on Signal Modulation

GAO Cheng^{1, 2, 3, 4}, GAO Junqi^{1, 2, 3}, ZHANG Pengfei^{1, 2, 3, *}, SHEN Ying^{1, 2, 3},
SUN Huayang^{1, 2, 3}, FENG Ze^{1, 2, 3}

- Innovation and Development Center, Harbin Engineering University, Qingdao 266400, China;
- Acoustic Science and Technology Laboratory, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;
- Qingdao Innovation and Development Base, Harbin Engineering University, Qingdao 266400, China;
- Zhejiang Moganshan Institute of Geomagnetism Large-scale Scientific Facility, Huzhou 313000, China)

Abstract In the field of underwater electromagnetic communication and detection, electromagnetic sweep interference is very common, and its frequency band coverage is large, which can affect almost all frequencies in the working frequency band and reduce the efficiency of communication and detection. General-purpose noise reduction

收稿日期: 2024-07-09

作者简介: 高成 (1999-), 男, 硕士生, 主要从事水下电磁探测抗干扰研究。

*通信作者: 张鹏飞 (1990-), 男, 博士, 讲师, 主要从事电磁探测、机器学习及深度学习的工程应用等研究。

and filtering methods cannot eliminate the components of electromagnetic sweep interference in the same band of the effective signal. Studying effective methods to combat electromagnetic sweep interference and improving underwater signal quality has become an urgent problem in the industry. In view of the above technical problems, a method of suppressing electromagnetic sweep interference based on modulation technology is proposed in this paper. It enhances the anti-electromagnetic sweep interference performance of the signal by increasing the signal complexity. Commonly used modulation methods include linear modulation, nonlinear modulation and digital modulation, among which 2ASK (binary amplitude shift keying), 2FSK (binary frequency shift keying) and BPSK (binary phase shift keying) have the advantages of good anti-interference and anti-channel loss performance, and high security. According to the fact that the bit error rates of the three modulation and demodulation methods are all based on white noise, the three bit error rates are further deduced when only electromagnetic sweep interference exists, only white noise exists, and when both of them exist at the same time. And then the three situations are simulated. The simulation results show that the three modulation and demodulation methods can effectively suppress the influence of electromagnetic sweep interference and improve the quality of underwater communication. When dealing with electromagnetic sweep interference, the 2FSK modulation method achieves the best performance.

Key words 2ASK; 2FSK; BPSK; electromagnetic sweep interference; digital modulation; BER

0 引言

随着现代军事科技手段的不断发展,无线通信逐渐在军事领域占据一席之地,其可靠性与有效性将直接决定战场信息的正确程度^[1-2]。有效可靠的通信手段可以提高主动武器的毁伤性能,增加信息的共享程度,将战场主动性掌握在我方手中。但在现代战场通信环境中存在着多种敌方的干扰手段,主要有电磁扫频干扰、跟踪干扰、压制式干扰等。其中电磁扫频干扰具有易产生、干扰带宽大、干扰效率高等特点,可在较宽的频带范围内发射大功率信号,成为常用的干扰技术手段之一^[3]。因此,在常见干扰手段下研究不同调制类型的通信系统的误码率,寻找更适用于对抗特定干扰类型的通信系统,对提升战场安全具有指导意义。电磁扫频干扰是指干扰源在某一频段内对各个频率进行周期性扫描,可对该频段内的所有信号起到干扰作用,其一般形式为线性电磁扫频干扰。线性电磁扫频干扰的时域表达式如下:

$$S(t) = A \exp \left[j \left(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \varphi \right) \right] \quad (1)$$

式中: $S(t)$ 为电磁扫频信号; A 为信号幅度; f_0 为干扰信号的初始频率; k 为干扰信号的调频系数; φ 为信号初始相位。干扰信号的幅度和调频系数是影响电磁扫频干扰性能的重要参数。

由于电磁扫频干扰的干扰范围覆盖整个信息频带,常见的低通、高通、带通与小波滤波器属于频域滤波器,用于抑制有用信号频带以外的噪声,难

以有效消除电磁扫频干扰的影响;维纳滤波、卡尔曼滤波等时域滤波方法受限于电磁扫频信号的大功率与系统的不确定性因素,也难以有效抑制电磁扫频干扰^[4]。数字调制信号的码元规律性变化为有效对抗电磁扫频干扰提供了研究方向^[5]。

在不同数字调制方式模型仿真与不同信道下的误码率分析方面已经有了大量研究^[6-12]。HLAING 等评估了 BPSK、PAM 与 QAM 这 3 种调制类型在加性高斯白噪声 (AWGN) 和瑞利多径衰落信道下的误码率,为无线通信和片上射频提供了频道类型选择的依据^[13]。在不同调制体制信号的抗干扰方面,章小梅等通过仿真研究了跳/扩频通信系统在扫频干扰、跟踪干扰以及两者共存的环境下,采用不同调制方式时抗干扰性能的差异,并通过计算误码率,最终给出了在不同干扰下的最佳扩频调制方法^[14];刘家昊与李新峰等以误码率作为评价指标分别针对通信系统的抗干扰能力与抗干扰能力的量化进行了研究^[15-16]; SHONGWE 等对 FSK 信号进行削波处理,观察处理后的 FSK 信号抗脉冲噪声干扰的能力,并推导了在存在 AWGN 和脉冲噪声的情况下 FSK 调制的误码率的闭合表达式^[17]。

虽然国内外有很多针对信号误码率分析与抗干扰能力研究的工作,但在数字调制体制信号抗电磁扫频干扰能力的研究方面较少。因此,本文针对二进制幅移键控 (2ASK)、二进制频移键控 (2FSK)、二进制相移键控信号 (BPSK) 3 种数字调制信号的传播特点,研究 3 种不同调制类型信号的误码率,

并建立相应的通信模型，分别仿真分析了 3 种通信系统在白噪声干扰下加入电磁扫频干扰时的误码率和电磁扫频干扰单独存在时的误码率，为通信与电磁探测工作中抗电磁扫频干扰提供理论依据。

1 数字调制原理与误码率计算

1.1 2ASK 的调制解调原理

数字基带信号包含较多直流、低频部分，不适合直接在空气、海水等无线信道中传输，需要将基带信号经过载波调制后频谱搬移至适合在特定无线信道中传输的频点处。

在数字调制方式中，2ASK 信号的正弦载波幅值会随着数字基带信号离散变化，一般来说低幅值对应数字基带信号“0”，高幅值对应数字信号“1”。可知当载波振幅为 1 时，2ASK 信号的一般时域表达式为

$$S_{\text{ASK}}(t) = [\sum_n a_n g(t - nT_s)] \cos \omega_c t \quad (2)$$

式中： T_s 为码元间隔； $g(t)$ 为持续时间 $[-T_s/2, T_s/2]$ 内的任意波形形状脉冲； $\sum_n a_n g(t - nT_s)$ 为包含二进制信息的单极性脉冲序列。

2ASK 信号的解调通常采用包络解调与相干解调，相干解调法的接收端需要提供与载波同频同相的相干载波，包络检波则不需要。这 2 种解调方式的误码率性能几乎相同，并且 2ASK 主要应用于低信噪比环境中。因此，工程上多采用包络解调法对 2ASK 信号进行解调。

在 AWGN 信道中，2ASK 信号的信噪比计算公式为

$$P_e = Q(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}) \quad (3)$$

式中， Q 是标准正态函数在无穷远处的补函数，其表达式为

$$Q(x) = 1/(2\pi) \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt \quad (4)$$

1.2 2FSK 的调制解调原理

2FSK 信号是利用载波频率变化来进行信息传输的一种方式，调制载波的频率会随着数字基带信号变化而变化，高频载波对应数字信号“1”，低频载波对应数字信号“0”，可看作载频为 f_1 和 f_2 的 2 个振幅键控信号的合成。因此，当载波振幅为 1 时，

2FSK 信号的一般时域表达式为

$$S_{\text{FSK}}(t) = m_1(t) \cos \omega_1 t + m_2(t) \cos \omega_2 t \quad (5)$$

$$m_1(t) = [\sum_n a_n g(t - nT_s)] \quad (6)$$

$$m_2(t) = [\sum_n \bar{a}_n g(t - nT_s)] \quad (7)$$

式中： T_s 为码元间隔； $g(t)$ 为持续时间 $[-T_s/2, T_s/2]$ 内的任意波形形状脉冲； \bar{a}_n 为传输数字序列 a_n 的反码。

2FSK 信号的解调方法有很多种，主要分为非相干解调法与相干解调法。由于 2FSK 的相干解调方法提取相干载波时较为困难，且误码率相同时，非相干解调所需的信噪比只比相干解调高 1~2 dB。工程上多采用非相干法实现 2FSK 信号解调。

由于在 AWGN 信道中，2FSK 信号的检测分为相干检测与非相干检测，不同的检测方法对应不同的误码率。在相干检测情况下 2FSK 的误码率为

$$P_e = Q(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}) \quad (8)$$

在非相干检测下 2FSK 的误码率为

$$P_e = \frac{1}{2} \exp(-\frac{E_b}{2N_0}) \quad (9)$$

1.3 BPSK 的调制解调原理

BPSK 的正弦载波的相位随着数字基带信号离散变化，通过 $0/\pi$ 的相位变化表征二进制数字基带信号的大小，一般发送二进制符号“0”时，相位大小取 0 相位；发送二进制符号“1”时，相位大小取 π 相位。BPSK 信号的时域表达式与 2ASK 的时域表达式相同：

$$S_{\text{BPSK}}(t) = [\sum_n a_n g(t - nT_s)] \cos \omega_c t \quad (10)$$

式中，由于存在相移 $0/\pi$ ，所以这里的 a_n 为双极性序列。

由于 BPSK 信号相邻码元的最大相位差可达到 180° ，存在 180° 的相位模糊，恢复的本地载波和相干载波可能同相也可能反相，信号的包络起伏会很大。所以，BPSK 信号的解调只能采用相干解调。

在 AWGN 信道中，BPSK 信号的信噪比计算公式为

$$P_e = Q(\sqrt{2\frac{E_b}{N_0}}) = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}) \quad (11)$$

式中，erfc 函数与 Q 函数是互补函数，两者的关系

是 $\operatorname{erfc}(x) = 2Q(\sqrt{2}x)$ 。

1.4 抗电磁扫频干扰理论推导

根据公式 (1) 给出的电磁扫频信号的表达式可知, 电磁扫频信号的频率与时间为线性变化关系。假定电磁扫频信号的初始频率为 f_0 , 截止频率为 f_c , 截止时间为 T , 则频率变化率为

$$K = \frac{f_c - f_0}{T} \quad (12)$$

由于电磁扫频信号的频率是线性变化的, 而调制信号为单频信号, 所以电磁扫频干扰只会在某个固定时间与固定频点处对调制信号产生影响。

1.4.1 2ASK 的理论抗单独电磁扫频能力

对于载波频率为 f_c 的 2ASK 信号, 我们认为电磁扫频干扰会在以 f_c 为中心频点的 Δf 范围内对 2ASK 信号产生干扰^[18-19]。假定电磁扫频信号的持续时间与 2ASK 信号发射码元的持续时间一致, 发射码元的总数量为 N , 则可能受到干扰的码元数量占比为

$$N_c = \frac{\Delta f}{f_c - f_0} N \quad (13)$$

式中, Δf 与信号功率、干扰功率、BER 容限等参数有关^[20]。

根据 2ASK 信号的调制解调原理, 发送“0”时, 调制信号波形幅值为 0, 发送信号“1”时, 调制信号的波形幅值为 1; 在相关解调过程中, 会将低幅值判别为“0”, 高幅值判别为“1”。在干扰范围内, 电磁扫频干扰会使低幅值变为高幅值, 而对高幅值的判别并不会产生影响, 即只会产生将码元“0”判为码元“1”的错误。由于码元序列发生器是伯努利二进制信号, 服从伯努利分布 $B(1, p)$, p 为产生码元“1”的概率。所以在干扰范围内产生误判的概率为

$$P(1/0) = 1 - p \quad (14)$$

则 2ASK 信号受电磁扫频干扰的总误码率为

$$P_e = N_c \cdot P(1/0) \quad (15)$$

1.4.2 BPSK 的理论抗单独电磁扫频能力

同理于 2ASK 信号, BPSK 信号的载波频率为单频, 只会在载波频点的 Δf 范围内产生干扰^[21]。根据 BPSK 信号的调制解调原理, 电磁扫频干扰会在 BPSK 信号中引入 ϕ 的固定相位变化, ϕ 服从 $(0 \sim \pi)$ 的均匀分布。当相位 ϕ 处于 $0 \sim \pi/2$ 范围内

时, 经过低通滤波后, ϕ 并不会对相位的正负变化判断产生影响; 当相位 ϕ 处于 $\pi/2 \sim \pi$ 范围内时, 经过低通滤波后, ϕ 的存在会使相位变化与原来相反, 即出现“倒 π ”现象。结合码元序列与相位 ϕ 的分布规律可知, 码元“0”误判为“1”的概率为 $P(1/0) = 1/2(1 - p)$; 码元“1”误判为“0”的概率为 $P(0/1) = 1/2 \cdot p$ 。

BPSK 信号受电磁扫频干扰的总误码率为

$$P_e = N_c \cdot (P(1/0) + P(0/1)) \quad (16)$$

1.4.3 2FSK 信号的理论抗单独电磁扫频能力

由于 2FSK 信号的载波频率分为高低 2 个载频, 所以电磁扫频干扰对于 2FSK 的影响存在 2 个频点。假定 2FSK 调制方式的 2 个载波频率为 f_1 、 f_2 , $\Delta f \ll f_2 - f_1$ 。在电磁扫频干扰存在的时间内存在以下 4 种干扰情况: 1) 干扰处于 f_1 、 f_2 时, 2FSK 信号的频率为 f_1 、 f_1 ; 2) 干扰处于 f_1 、 f_2 时, 2FSK 信号的频率为 f_1 、 f_2 ; 3) 干扰处于 f_1 、 f_2 时, 2FSK 信号的频率为 f_2 、 f_1 ; 4) 干扰处于 f_1 、 f_2 时, 2FSK 信号的频率为 f_2 、 f_2 。

根据 2FSK 的调制解调原理可知, 相干解调需要频率相同的相干载波, 经低通滤波后, 再进行抽样判决。根据判决方法可知, 只有在情况 3 时, 会使系统出现绝对的误判, 将“10”错误地判决为“00”, 即 $P(00/10) = p \cdot (1 - p)$, 情况 1 和 2 则不会出现误判, 情况 4 与电磁扫频干扰的幅值有关, 当幅值大于信号幅值时会出现误判。

所以, 2FSK 信号受电磁扫频干扰的总误码率为

$$P_e = N_c \cdot P(00/10) + P_4 \quad (17)$$

式中, P_4 与干扰信号的功率、幅值有关。经上述推导可知 2FSK 信号的抗电磁扫频干扰性能要优于 2ASK 与 BPSK 信号。

2 通信模型仿真

为研究高斯白噪声信道中 3 种数字调制方式的误码率性能, 使用 Simulink 仿真工具构建了 3 种数字调制方式的通信仿真模型^[22-24]。为便于比较系统的误码率, 3 种通信模型的信号源都使用伯努利二进制生成器作为随机数据源, 数据序列的传输速率为 30 000 bit/s, 仿真时间均为 1 s。

2.1 2ASK 通信模型建立

高斯白噪声背景下 2ASK 调制解调模型如图 1 所示。仿真模型的调制解调模块采用 2PAM 调制解调方法，该模块利用 M 元脉冲幅度调制原理进行调制，此

处的 M 是信号星座图中的点数；以高斯白噪声信道作为传输信道；输出部分通过零阶保持器进行数据离散化，最后将数据送入误码率计算器进行计算，从而得到 2ASK 信号在高斯白噪声信道下的误码率。

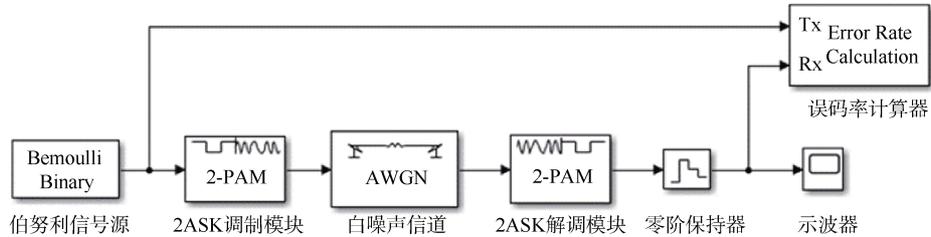


图 1 2ASK 仿真模型
Fig. 1 2ASK simulation model

模型建立完毕后，通过仿真软件 bertool 误码率计算工具箱验证模型的正确性，该工具箱支持多种调制方法的理论误码率计算与蒙特卡洛仿真模拟。仿真信噪比范围选取 $-20 \sim 20$ dB，将理论计算曲线与蒙特卡洛仿真结果进行对比分析仿真模型的正确性。

2.2 2FSK 通信模型建立

二进制频移键控信号存在频率瞬变的特性，考

虑到频率突变时相位的变化情况，2FSK 调制方法可划分为连续相位和非连续相位。此次仿真使用 Simulink 的 2FSK 调制解调模块，选择连续相位调制方式。该调制模块利用多元频移键控理论进行调制与解调；传输信道仍选用高斯白噪声信道。最后将输出数据序列与输入数据序列送入误码率计算器进行计算，得到 2FSK 信号在高斯白噪声信道下的误码率。通信仿真模型如图 2 所示。

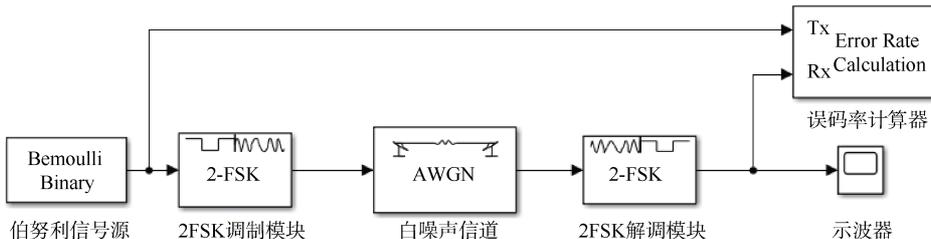


图 2 2FSK 仿真模型
Fig. 2 2FSK simulation model

为了验证 2FSK 模型的正确性，使用误码率模型计算工具箱 bertool 计算通信模型误码率与理论误码率，仿真的信噪比范围选取 $-20 \sim 20$ dB，并将计算得出的理论计算结果与模型仿真结果进行对比。

2.3 BPSK 通信模型建立

BPSK 信号在 AWGN 信道中的误码率系统仿真模型如图 3 所示，该模型的调制解调模块为 Simulink 的 BPSK 模块，该模块基于相移键控理论进行调制与相应的解调，输出为调制信号的基带表示形式。

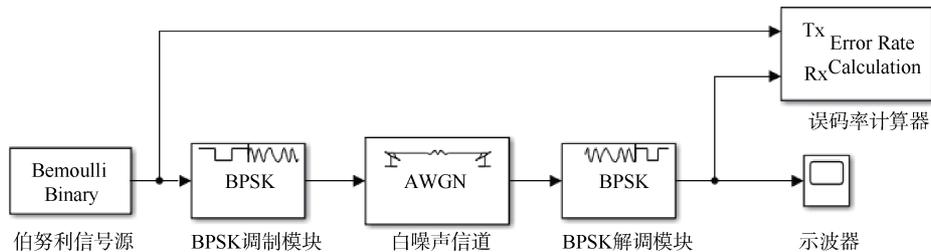


图 3 BPSK 仿真模型
Fig. 3 BPSK simulation model

同样使用 bertool 工具箱对 BPSK 通信模型与理论误码率结果进行对比。最终 3 种数字调制方式的仿真模型与理论分析的对比结果如图 4 所示。

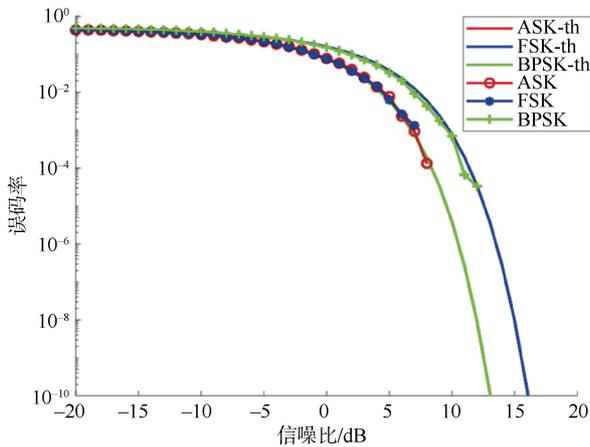


图 4 3 种调制方式在白噪声下的误码率对比
Fig. 4 Comparison of bit error rates of 3 modulation modes under white noise

图 4 中的图例分别表示: 2ASK-th、2FSK-th、BPSK-th 这 3 条曲线是 3 种调制方式在-20~20 dB 信噪比内的理论误码率; 2ASK、2FSK、BPSK 这 3 条曲线代表 3 种调制方式在-20~20 dB 信噪比内仿真模型计算得出的误码率。

从图中可以看出 3 种通信模型的蒙特卡洛仿

真结果与理论值基本吻合, 表明 3 种通信仿真模型的正确性, 可以作为理论通信模型仿真结果。同时可以看出在信噪比-20~20 dB 范围内, 2ASK 与 BPSK 的误码率基本相同; 2FSK 的误码率要高于 2ASK 与 BPSK 调制方式, 且随着信噪比的变大, 2FSK 与另外 2 种调制方式的误码率差距逐渐增大。可知在白噪声信道下, 2FSK 的抗噪性能较差, 2ASK 与 BPSK 的抗噪性能几乎相同。

3 抗干扰性能仿真

Simulink 中产生电磁扫频干扰的模块为 Chirp Signal, 该模块可以产生从初始频率到目标时间频率范围内的电磁扫频信号。

3.1 2ASK、2FSK、BPSK 在白噪声下抗电磁扫频性能

在白噪声信道下误码率模型的基础上添加电磁扫频干扰模块, 电磁扫频干扰范围 300~3 000 Hz, 幅值与信号幅值保持相同且不变, 改变高斯白噪声与信号的信噪比大小, 分别观察 3 种调制方式的误码率变化情况。BPSK 系统模型如图 5 所示, 2ASK 与 2FSK 系统模型除了调制模块与相应的解调模块不同外, 其余部分与 BPSK 系统模型相同, 图 6 为 2FSK 与 2ASK 调制与解调模块示意图。

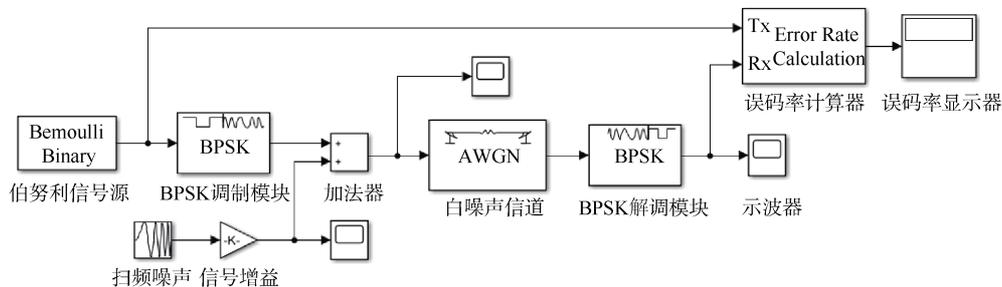


图 5 电磁扫频干扰对 AWGN 信道中 BPSK 信号影响
Fig. 5 Effect of electromagnetic sweep interference on BPSK signals in AWGN channel

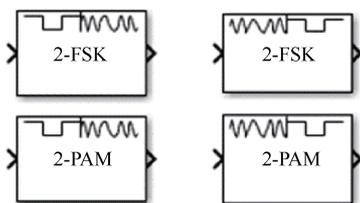


图 6 2FSK 与 2ASK 调制与解调模块示意图
Fig. 6 Schematic diagram of 2FSK and 2ASK modulation and demodulation modules

仿真过程选取信噪比范围-10~20 dB, 得出 3 种调制方式在白噪声下的抗电磁扫频干扰结果如图 7 所示。从图中曲线可知 2ASK 与 BPSK 在所选取的信噪比范围内误码率变化基本一致; 2FSK 的误码率在信噪比-10~2 dB 范围内要高于 2ASK 与 BPSK; 在 2~20 dB 范围内随着信噪比增大, 2FSK 的误码率逐渐低于 2ASK 与 BPSK。

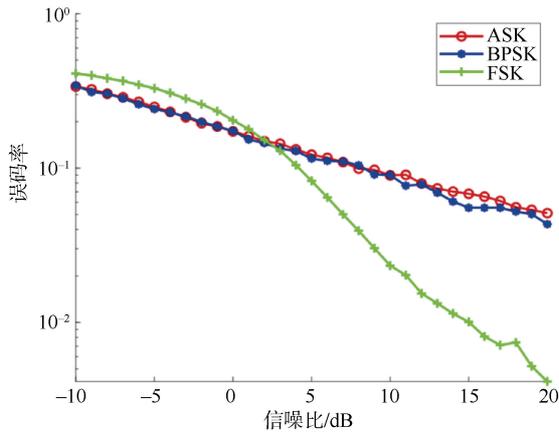


图 7 电磁扫频干扰对 AWGN 信道中不同调制方式误码率影响

Fig. 7 Effect of electromagnetic sweep interference on bit error rates of different modulation modes in AWGN channel

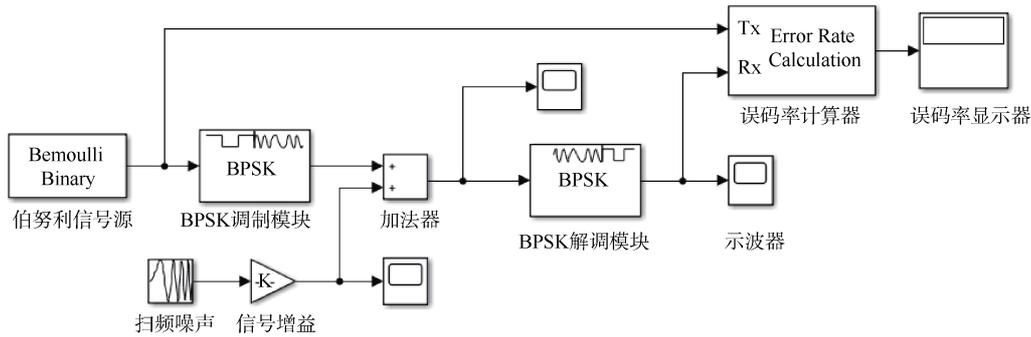


图 8 BPSK 调制方式模型
Fig. 8 BPSK modulation model

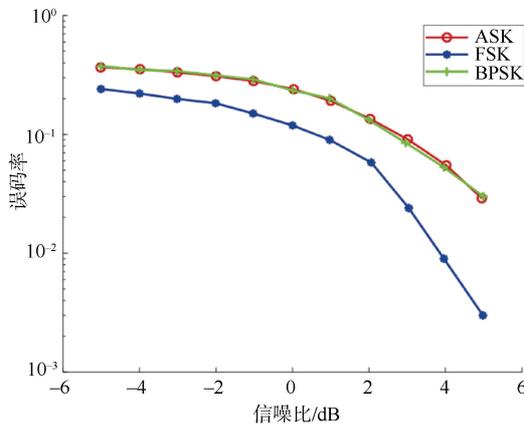


图 9 电磁扫频干扰对 3 种调制方式误码率的影响
Fig. 9 Effect of electromagnetic sweep interference on bit error rates of 3 modulation modes

从图中结果可以看出，即使在单独电磁扫频干扰下 2ASK 与 BPSK 的误码率也几乎相同，而 2FSK 信号在仿真干信比-5~5 dB 范围内的误码率要低于其它

3.2 抗单独电磁扫频干扰能力

为更好的体现 3 种调制方式抗电磁扫频干扰的能力，以寻找最优的抗干扰调制方法。在 Simulink 环境下搭建了电磁扫频干扰单独存在时的 2ASK、2FSK 和 BPSK 仿真系统模型，其中 BPSK 仿真模型如图 8 所示。3 种调制方式仿真模型的区别在于调制与解调模块，其他模块参数相同。其中，2ASK 与 2FSK 的调制解调模块已在图 6 给出。

分别计算电磁扫频干扰和数字调制信号的能量，并以两者的比值作为干信比。通过改变电磁扫频干扰的幅值，计算出电磁扫频干扰与调制信号的干信比大小，得出了干信比在-5~5 dB 范围内 3 种调制方式对应的误码率大小，结果如图 9 所示。

2 种调制方式。可知在抗电磁扫频干扰方面 2FSK 的性能要优于 2ASK 与 BPSK，在选择抗电磁扫频干扰信号时可以将 2FSK 调制作为基础调制手段。

4 结束语

电磁扫频干扰频带覆盖范围大、影响频率范围广，严重影响水下电磁通信与探测信号质量，常见的降噪滤波方式无法有效消除电磁扫频干扰。应对电磁扫频干扰最有效的方式为通过信号编码与调制增加信号复杂性进而增强信号抗干扰性能。2ASK、2FSK 与 BPSK 均具有低信道损耗和高安全性等优点，但目前的应用研究仅限于高斯信道中的白噪声。

本文对 3 种调频方式抗干扰性能进行对比，推导拓展了 3 种调制方式在电磁扫频干扰下误码率等参数，进一步通过数值模拟验证了在白噪声、电磁扫频干扰与两者都存在 3 种情况下的抗干扰性能。

在白噪声条件下 BPSK 与 2ASK 的误码率大小几乎相同,而 2FSK 误码率要明显高于 2ASK 与 BPSK;在白噪声与电磁扫频干扰同时存在时,改变白噪声与信号的信噪比大小,在信噪比 $-10\sim 2$ dB 范围内 2FSK 的误码率要高于 2ASK 与 BPSK 的误码率,当信噪比大于 2 dB 时,2FSK 的误码率要明显小于另外 2 种调制方式;在电磁扫频干扰单独存在时,2ASK 与 BPSK 的误码率大小变化趋势几乎相同,而 2FSK 的误码率要远小于 2ASK 与 BPSK 方式。仿真分析表明:在抗电磁扫频干扰方面,2FSK 调制方式的抗干扰能力要优于 2ASK 与 BPSK 调制方式。在通信或探测系统中对抗电磁扫频干扰时,可以选择 2FSK 调制方式对信号进行初步调制,对于其他调制方式的抗干扰能力还需做进一步研究。

参考文献

- [1] 韩晨,牛英滔,夏志,等.线性扫频干扰检测算法及抗干扰方法研究[J].计算机应用研究,2020,37(1):267-270,274.
- [2] 马思强,彭超.通信侦察在航空反潜作战中的应用[J].舰船电子对抗,2018,41(2):49-51.
- [3] 张新道,姜亚浩.高性能扫频干扰标准声源的制作[J].舰船科学技术,2003,25(6):6-7,29.
- [4] 张天鹏,刘忙龙,谢嘉.基于 FRFT 的调频引信 LFM 干扰抑制改进方法[J].探测与控制学报,2019,41(2):22-25.
- [5] 于洪海,闫晓鹏,贾瑞丽,等.M 序列伪码调相脉冲多普勒引信抗干扰性能研究[J].兵工学报,2020,41(3):417-425.
- [6] PUSHPALATHA, PRATHYUSHA, SINDHU, et al. BER performance using BPSK modulation over Rayleigh and Rician fading channel[C]// 2022 IEEE 11th International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT). Indore: IEEE, 2022.
- [7] SARNIN S S, KADRI N, MOZI A M, et al. Performance analysis of BPSK and QPSK using error correcting code through AWGN[C]// 2010 International Conference on Networking and Information Technology (ICNIT). Manila: IEEE, 2010.
- [8] WANG G, CHENG W. Analysis and simulation of 2ASK digital band-pass transmission system basing on SIMULINK[C]// The 7th International Conference on Education, Management, Computer and Medicine. Shenyang: IEEE, 2017.
- [9] ZEREK A R, ELLABU N, MHAMMED H. Performance assessment and computer simulation of the M-ary FSK modulation scheme[C]// The 7th International Conference on Modelling, Identification and Control. Sousse: IEEE, 2015.
- [10] 丁凯. AWGN 信道中 BPSK 误码率仿真分析[J].微处理机,2021,42(3):23-26.
- [11] 刘立林,胡世安,司兵.几种数字调制方式的仿真与分析[J].现代电子技术,2012,35(9):95-99,102.
- [12] 张卓伟,朱润,沈凡.面向通信系统的误码率计算方法[J].雷达与对抗,2022,42(1):6-8.
- [13] HLAING N W, FARZAMNIA A. Bit Error Rate comparison for Radio Frequency interconnection based on BPSK, PAM and QAM modulation[C]// The 19th Student Conference on Research and Development (SCORED). Kota Kinabalu: IEEE, 2021.
- [14] 章小梅,孙倩,危水根.用不同调制方式实现跳/扩频混合通信的抗干扰性能[J].数字通信,2014,41(4):6-8,13.
- [15] 李新峰,郝晓军,韩慧,等.基于误码率的通信系统电磁干扰效应研究[J].微波学报,2017,33(1):71-76.
- [16] 刘家昊,章小梅.基于误码率分析的通信抗干扰能力预测研究[J].信息技术,2019,43(11):111-114,120.
- [17] SHONGWE T, VINCK A J H. Waveform clipping in FSK modulated signal to combat impulse noise[C]// 2018 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC). Manchester: IEEE, 2018.
- [18] 刘万洪,刘敏,陆俊.部分频带噪声干扰下 DS/FH 系统误码率分析[J].舰船电子工程,2013,33(1):81-82,100.
- [19] 马永涛,张力,刘开华.窄带连续波干扰下的宽带接入网上行信道误码率研究[J].电路与系统学报,2011,16(2):103-106.
- [20] 全厚德,赵波,尹中秋,等.共址干扰下的车载跳频电台误码率计算与分析[J].电讯技术,2012,52(8):1232-1238.
- [21] 王亮,梁学东,张乃通.相干 BPSK 调制方式的混合 DS-SFH 系统误码率分析[J].遥测遥控,2002,23(6):24-27.
- [22] HUANG L W, CHEN Y L, HUANG H, et al. Research of digital communication system[C]// 2020 IEEE Conference on Telecommunications, Optics and Computer Science (TOCS). Shenyang: IEEE, 2020.
- [23] SADINOV S M. Simulation study of M-ARY QAM modulation techniques using MATLAB/Simulink[C]// The 40th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO). Opatija: IEEE, 2017.
- [24] 邵正途,张路,陈鹏,等.基于 Simulink 的直扩通信干扰建模与分析[J].通信技术,2019,52(6):1326-1331.

(责任编辑:曹晓霖)