

基于 PSK 调制的数字通信信号仿真分析技术

瞿伟哲

(信息工程大学 郑州 450000)

摘要: 基于 PSK 调制的数字通信系统在无线通信工程实践中有着广泛的应用, 由于受到各种条件的限制, 从实际工程系统接收到的 PSK 数字通信信号在教学科研中不易获得, 而 PSK 调制仿真数据则可以自己产生。在掌握通信原理和仿真技术的基础上利用 Matlab 实现对 BPSK、DPSK、QPSK、DQPSK、8PSK、 $\pi/4$ -DQPSK、OQPSK 等数字通信信号源的模拟仿真, 可对调制体制、工作频率、传输码率、采样频率、信道特征等参数进行灵活设置, 并按要求生成规定格式的 DAT 数据文件, 可作为调制方式识别软件的训练和测试样本。结合模方谱、平方谱、四次方谱、八次方谱等谱线参数特征, 同时结合星座图和眼图进行基于 PSK 调制的数字通信信号的调制体制判别和验证。

关键词: 数字通信系统; 相移键控 (PSK); 信号源仿真; 调制体制分析; 谱线特征

中图分类号: TN919.3+1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)01-0057-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220413003

引用格式: 瞿伟哲. 基于 PSK 调制的数字通信信号仿真分析技术[J]. 遥测遥控, 2023, 44(1): 57-63.

Simulation analysis technology of digital communication signal based on PSK modulation

QU Weizhe

(Information Engineering University, Zhengzhou, 450000)

Abstract: The digital communication system based on PSK modulation is widely used in the practice of wireless communication engineering. Due to various conditions, the PSK digital communication signal received from the actual engineering system is difficult to obtain in teaching and scientific research, while the PSK modulation simulation data can be generated by itself. On the basis of mastering the communication principle and simulation technology, this paper uses Matlab to simulate digital communication signal sources such as BPSK, DPSK, QPSK, 8PSK, $\pi/4$ -DQPSK, OQPSK, etc. It can flexibly set parameters such as modulation system, working frequency, transmission code rate, sampling frequency and channel characteristics, and generate data files with specified formats as required. It can be used as a training and testing sample for modulation mode identification software. In addition, this paper combines the spectral line parameter characteristics such as modular square spectrum, square spectrum, fourth power spectrum, eighth power spectrum, etc., and combines constellation diagram and eye diagram to identify and verify the modulation system of digital communication signals based on PSK modulation.

Keywords: Digital communication system; Phase shift keying(PSK); Signal source simulation; Modulation system analysis; Spectral line features

Citation: QU Weizhe. Simulation analysis technology of digital communication signal based on PSK modulation [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(1): 57-63.

引 言

非协作通信信号处理是对无线通信技术、数字信号处理、统计信号处理、模式识别等电子与

信息学科内容的综合运用, 是面向复杂电磁环境解决信息获取和信息反演的重要难题, 既存在众多复杂理论问题, 也存在大量工程实际问题。

在非协作通信中, 如果要获得各类无线通信

信号的信息, 首先必须分析其调制方式。调制识别就是在没有任何先验信息的条件下, 通过提取的特征参数研判出信号的调制方式。因此调制识别是非协作通信信号处理的基本内容, 在民用领域的频谱监视与管控、军事领域的通信对抗与信息截获等方面都有广泛的应用。

非协作通信信号调制识别本质上是一个模式识别的问题, 一般分为信号预处理、特征参数提取、调制分类识别三个部分, 如图 1 所示。

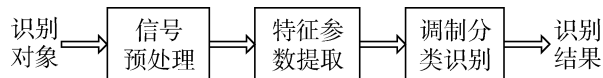


图 1 非协作通信信号调制识别框图

Fig.1 Block diagram of modulation identification of uncooperative communication signals

图 1 中, 信号预处理通常包括: 数字下变频、I 支路同相分量和 Q 支路正交分量的分解、载波频率 f_c 和符号速率 R_b 的估计等。特征参数提取是从信号预处理的结果中提取出能够表征调制信号特征的时域特征以及变换域特征。典型的时域特征包括瞬时频率、瞬时相位、瞬时幅度、瞬时特征的直方图以及其他较为复杂的特征参数等, 如零中心归一化瞬时幅度之谱密度的最大值、零中心非弱信号段瞬时相位非线性分量及其绝对值的标准偏差等; 变换域特征主要包括谱相关函数、功率谱、模方谱和高次方谱、高阶矩、高阶累积量等特征。为了便于调制识别, 一般要求所选择的特征参数能够有效地区分不同的调制类型和调制方式。调制分类识别是根据信号的特征参数, 通过不同的分类器来计算该信号属于某类调制方式的概率或相似度, 从而达到识别调制方式的目的。目前常用的通信信号调制分类识别方法主要包括神经网络分类器、基于门限判决的树型分类器以及支持矢量机(SVM)分类器等。

目前, 对各类非协作通信信号进行调制方式分析的数据源主要来自于接收数据。由于受到各种条件的限制, 从实际接收到的通信数据在教学科研中不易获得, 而通信调制仿真数据则可以有效解决这一难题, 而且调制体制、工作频率、传输码率、采样频率、信道特征等参数可以灵活设置^[1,2]。

本文主要介绍基于 PSK 调制体制(主要包括 BPSK、QPSK、8PSK、DPSK、DQPSK、 $\pi/4$ -DQPSK、OQPSK 等 7 种体制)的数字通信信号源仿真, 此外本文还利用模方谱以及高次方谱等谱线特征并结合星座图、眼图进行 PSK 调制体制判别和验证。

1 相移键控调制技术概述

数字通信系统的调制方式一般包括相移键控 (PSK)^[3]、频移键控(FSK)和幅度键控(ASK)。PSK 的特点是有较低的传输误码率、较高的带宽利用效率, DPSK 调制的性能虽稍逊于 PSK, 但易于实现, 从而使得 PSK 和 DPSK 在现代数字通信系统中都有着广泛的应用。随着高数据率的数字通信系统的发展, QPSK 体制也已经广泛使用, QPSK 的抗干扰性能比 BPSK 的性能稍差一些, 但可以节约一倍的带宽。为了进一步压缩带宽进而发展了 OQPSK、 $\pi/4$ -DQPSK 等体制。

① mPSK

PSK 是最基本最常用的一种数字调制方式, 其最基本特点是幅度和频率一般保持不变, 通过发射载波的相位变化来传递和区分基带数字信号, 针对 BPSK 信号通常用初始相位 0° 和 180° 来分别表示数字基带信号的二进制“1”和“0”。因此, BPSK 已调信号的时域表达式可以表示为正弦载波与矩形脉冲序列的乘积, 即

$$e_{2\text{PSK}}(t) = \left[\sum_n a_n g(t - nT_B) \right] \cdot \cos(\omega_c t) \quad (1)$$

其中, $g(t)$ 为时宽为 T_B 的矩形脉冲, a_n 取值为 1 或 -1。因为 BPSK 是以不同的载波相位直接去表示一个二进制基带信号数据, 所以也称为二进制绝对相移键控。

在 BPSK 调制中每个码元只能传输 1 比特(bit)信息, 为了有效提高无线通信的频带传输利用率, 可利用同一码元传输多个比特信息, 这时信号码元就可以表示为

$$e_k(t) = A \cos(\omega_c t + \theta_k) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (2)$$

其中, A 为常数, $\theta_k = 2\pi(k-1)/N$, N 一般取 2 的整数次幂。如 $N=4$ 时为 4PSK, 也称为正交相移键控(QPSK), 每个码元含有 2 比特信息; $N=8$ 时为 8PSK, 每个码元含有 3 比特信息。另外, 为了提高数据传输可靠性, 多进制相移键控一般均采用

格雷(Gray)编码,其特点是相邻数据之间只有一个相位发现跳变。

② mDPSK

DPSK称为差分相移键控,它主要利用相邻码元前后的载波相位变化来发送数字信息,可有效克服PSK调制的相位模糊而导致数据解调不正确。对于DPSK调制,如果初始的码元相位不同,则相位调制的数字序列的相位也会不同。与PSK相比,DPSK调制时需要把原始基带数据绝对码转换为相对码,而解调时则相反。另外,DPSK体制也可以设计为多进制差分相移键控,最为常见的为DQPSK。

③ OQPSK

OQPSK与QPSK调制方式一样均为恒包络调制,其主要特点是消除了QPSK调制存在的 180° 相位跳变问题,具有良好的频谱利用效率,可广泛应用于数字通信,其信号形式为

$$s_{\text{OQPSK}}(t) = I(t)\cos(\omega_c t) - Q(t - T_s/2)\sin(\omega_c t) \quad (3)$$

其中, $I(t)$ 为同相分量; $Q(t - T_s/2)$ 为正交分量,Q支路相对于I支路偏移了半个码元周期 $T_s/2$ 。由于I支路和Q支路不会同时发生变化,相邻比特的相位只可能发生 $\pm 90^\circ$ 的变化,从而消除了相位翻转 180° 的现象。

④ $\pi/4$ -DQPSK

$\pi/4$ -DQPSK调制是用差分相位编码产生的,从星座图上看,它有8种相位,分为2个相位组,2个相位组之间错开 45° 相角,相邻码元之间必然从一个相位组跳变到另外一个相位组,相位的跳变量共有4种,分别为 $\pm 45^\circ$ 或 $\pm 135^\circ$ 。 $\pi/4$ -DQPSK虽然不会产生 $\pm 180^\circ$ 的相位跳变,但在调制前需要利用滤波器对信号进行预处理,从而抑制带外辐射,但会带来包络起伏,故 $\pi/4$ -DQPSK调制不属于恒包络数字调制,它之所以能提高频带的利用率是进行综合处理的结果。

2 相移键控调制信号生成

在接收数字通信信号时,一般对中频信号进行采样并记录,故本文将仿真AWGN信道下的数字通信中频信号,同时产生目前常用的int16(十六位有符号整数)数据格式,其中频率和采样频率可设置成与实际情况一致^[4,5]。

对数字通信中频信号进行下变频后的复基带信号的基本模型为:

$$s_r(t) = s(t) \cdot A \cdot \exp(j\Delta\omega t) \cdot \exp(j\phi) + n(t) \quad (4)$$

其中, $s(t)$ 代表标准的基带复信号,适用于各类调制方式, A 、 $\Delta\omega$ 、 ϕ 分别表示信号衰减、频偏和相偏, $n(t)$ 代表噪声。对于PSK调制信号的数字通信信号, $s(t)$ 可以表示为:

$$s(t) = I(t) + jQ(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} [g(t - kT_s) A_k \exp(j\theta_k)] \quad (5)$$

其中, $g(\cdot)$ 表示成形系数为 a 的根升余弦滚降滤波器函数。

下面给出了产生各类PSK调制信号的源程序,通过改变 M 值和调制方式,可以产生BPSK、QPSK、8PSK、DPSK、DQPSK、OQPSK、 $\pi/4$ -DQPSK等多种数字调制信号。

```

clc; clear all; close all;
%初始参数设置
t=0.2; %持续时间(s)
Rb=1.5e6; %  $R_b$ 符号速率(Baud)
fc=2e6; %载波频率(Hz)
fs=10e6; %采样率(Hz)
a=0.25; %滚降系数
SNR=40; %信噪比(dB)
df=2.5e4; % $\Delta f$ 频率偏移(Hz)
M=4; %调制阶数
Modulation_type='mPSK'; %可选的调制方式
有: 'mPSK'、'mDPSK'、'pi/4-DQPSK'、'OQPSK'
N=t*Rb; bits=randi([0,M-1],1,N); %产生随机符号
%%电平映射
if strcmp(Modulation_type, 'mPSK') == 1 %M
=2,4,8
bits_mod=pskmod(bits,M,0,'gray');
elseif strcmp(Modulation_type, 'mDPSK') ==
1 %M=2,4
bits_mod=dpskmod(bits,M,0);
elseif strcmp(Modulation_type, 'pi/4-DQPSK') =
= 1 %M=4
bits_mod=dpskmod(bits,M,pi/4);
elseif strcmp(Modulation_type, 'OQPSK') ==
1 %M=4
bits_mod=pskmod(bits,M,pi/4,'gray');

```

```

end
pu=4; fs1=pu*Rb; %选择初始采样频率是符号
速率的 4 倍
h=rcosdesign(a,6,pu,'sqrt'); %根升余弦成形滤
波器
b=upfirdn(bits_mod,h,pu);
if strcmp(Modulation_type,'OQPSK')== 1
b=real(b(3: end)) +1i*imag(b(1: end-2)); %
OQPSK: 移位  $T_{\text{码元}}/2$ 
end
T=length(b)/fs1;
signal=interp1(0: (1/fs1): (T-1/fs1), b, 0: (1/fs1): T,
'spline'); %按设置采样频率要求插值
scatterplot(bits_mod); title('星座图'); %画星
星座图
eyediagram(b(1:2000),pu*2); %画眼图
N=length(signal);
Plural_signal=signal. *exp(1i*2*pi*df*(0: N-1)/
fs)*exp(1i*rand*2*pi); %频偏+相偏
sig_UDC=Plural_signal. *exp(1i*2*pi*fc*(0: N-
1)/fs); %上变频
sig =awgn(sig_UDC, SNR, 'measured', 'dB'); %
加噪
s=real(sig); %取实部
fid=fopen('pskdata.dat','wb'); %文件存储
fwrite(fid, round(s/max(abs(s))*2^15), 'int16'); %
数值量化
fclose(fid);

```

3 相移键控调制信号分析^{[6]-[18]}

数字通信信号的调制识别方法很多, 如基于时域特征或变换域特征, 但大部分识别方法所选用的特征参数都需要载波频率 f_c 、符号速率 R_b 等先验信息, 而这些信息在预先不知道信号调制方式的情况下是很难准确估计得到的。同时基于 PSK 调制的通信数字信号在功率谱和时频图上很难进行识别, 故需探讨选择稳健性好的特征参数来进行调制识别。

对基于 PSK 调制的数字通信信号进行非线性变换后, 信号会在频域出现离散谱线特征, 谱线出现的位置和强度与信号的调制方式及调制参数

都有内在的联系, 且该离散谱线特征在非理想环境中易于提取且具有一定的鲁棒性。本文利用信号成形导致瞬时幅度周期性(符号周期)变化的特点, 对中频接收信号数字下变频后的复基带信号取模、平方、四次方、八次方等变换后进行功率谱分析, 则调制信号的特征参数(符号速率谱线、直流谱线)以清晰的离散谱线形式凸显出来, 同时结合解调后的星座图和眼图, 可以进行 PSK 信号调制体制识别。

通过对式(4)所表达的复基带接收信号进行取模、平方、四次方、八次方等非线性变换后进行谱分析, 则调制信号的特征参数(符号速率谱线、直流谱线)以清晰的离散谱线形式凸显出来, 其中模谱可以表示为:

$$P_a(\omega) = \text{PSD} [|s_r(t)|] \quad (6)$$

其中, $\text{PSD}(\cdot)$ 表示功率谱估计, $|s_r(t)|$ 可表示为:

$$|s_r(t)| = \left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} [g(t-kT_s)A_k \exp(j\theta_k)] \right|$$

$$|\exp(j \cdot (\Delta\omega \cdot t + \phi))| = \left| \sum_{k=-\infty}^{\infty} [g(t-kT_s)A_k \exp(j\theta_k)] \right| \quad (7)$$

式(7)中模谱中的符号速率谱线、直流谱线可以表示为

$$|s_r(t)| \triangleq \sum_{k=-\infty}^{\infty} |A_k g(t-kT_s)| \quad (8)$$

M 高次方谱可以表示为:

$$P_M(\omega) = \text{PSD} [(s_r(t))^M] \quad (9)$$

其中, $[s_r(t)]^M$ 可表示为:

$$[s_r(t)]^M = \left(\sum_{k=-\infty}^{\infty} [g(t-kT_s)A_k \exp(j\theta_k)] \right)^M$$

$$\exp(jM\Delta\omega t) \exp(jM\phi) \quad (10)$$

式(10)中, 相偏($M\phi$)对功率谱不产生影响, 可忽略, 而频偏会造成谱线位置发生搬移, 且搬移量为 $M\Delta\omega$ 。另外, 由于 M 次方具有去调制相位信息的功能, 故 $\exp(jM\theta_k)=1$ 时, 则有功率谱中的符号速率谱线、直流谱线可以表示为

$$[s_r(t)]^M \triangleq \sum_{k=-\infty}^{\infty} [(A_k g(t-kT_s))^M] \cdot \exp(jM\Delta\omega t) \quad (11)$$

对 BPSK 而言, $M=2,4,8$ 时, $\exp(jM\theta_k)=1$ 均满足, 故平方谱、四次方谱、八次方谱均存在符号速率谱线和直流谱线; 对 QPSK 而言, $M=2$ 时,

$\exp(jM\theta_k)=1$ 不满足, 故平方谱不存在符号速率谱线和直流谱线, 但四次方谱、八次方谱均存在; 对 8PSK 而言, $M=2,4$ 时, $\exp(jM\theta_k)=1$ 不满足, 故平方谱和四次方谱不存在符号速率谱线和直流谱线, 但八次方谱均存在。

另外根据 $g(t)$ 的频率特性, 平方谱、四次方谱、八次方谱的频谱带限区间分别为 $\left[-\frac{1+a}{T_s}, \frac{1+a}{T_s}\right]$ 、

$\left[-\frac{2(1+a)}{T_s}, \frac{2(1+a)}{T_s}\right]$ 、 $\left[-\frac{4(1+a)}{T_s}, \frac{4(1+a)}{T_s}\right]$, 其中 T_s 为符号周期, a 为滚降系数。

图 2 和图 3 分别是 BPSK/DPSK、QPSK/ DQPSK 调制信号的仿真结果, 每种调制方式的仿真图形中有分别包括模方谱、平方谱、四次方谱、八次方谱、星座图和眼图等图形, 图注中 Δf 表示多普勒频偏, R_b 表示符号速率。

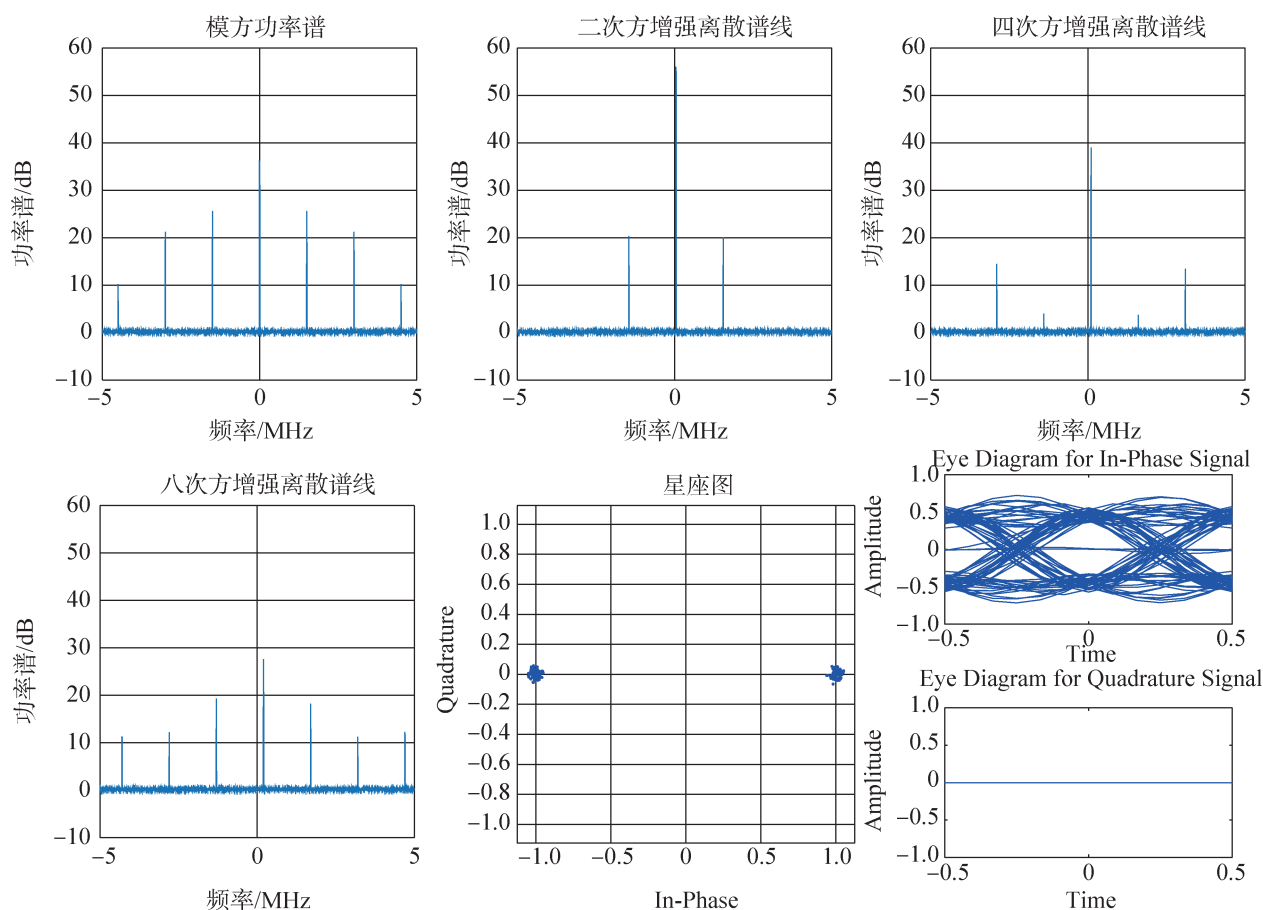


图 2 BPSK/DPSK 调制的仿真信号

Fig. 2 Simulation signal modulated by BPSK/DPSK

表 1 对各类 PSK 体制信号的离散谱线特征分析进行了简单总结, 据此可以看出: BPSK 和 DPSK、QPSK 和 DQPSK 的星座图、眼图、模方谱和高次方谱是一样的, 只能根据解调数据的帧同步码或其他特征进行区分; 根据平方谱具有 $2\Delta f, 2\Delta f \pm R_b$ 的特征, 可以将 BPSK/DPSK 与其他 PSK 体制进行区分; 根据平方谱无增强谱线、四次方谱具有 $4\Delta f, 4\Delta f \pm R_b$ 谱线的特征, 可以将 QPSK/DQPSK 与其他 PSK 体制进行区分; 根据平方谱、四次方谱无增强谱线、八次方谱具有 $8\Delta f, 8\Delta f \pm R_b$ 谱线特征, 可

以将 8PSK 与其他 PSK 体制进行区分; 根据平方谱无增强谱线、四次方谱具有 $4\Delta f \pm R_b/2, 4\Delta f \pm 3R_b/2$ 谱线的特征, 可以将 $\pi/4$ -DQPSK 与其他 PSK 体制进行区分; 根据模方谱无符号速率增强谱线、平方谱具有 $2\Delta f \pm R_b$ 谱线的特征, 可以将 OQPSK 与其他 PSK 体制进行区分。

综上所述, 通过对 PSK 调制信号取模、平方、四次方、八次方等变换后进行谱分析, PSK 调制信号的特征信息以清晰的离散谱线形式显示出来。另外, 根据离散谱线的物理意义还可以估算载波频率

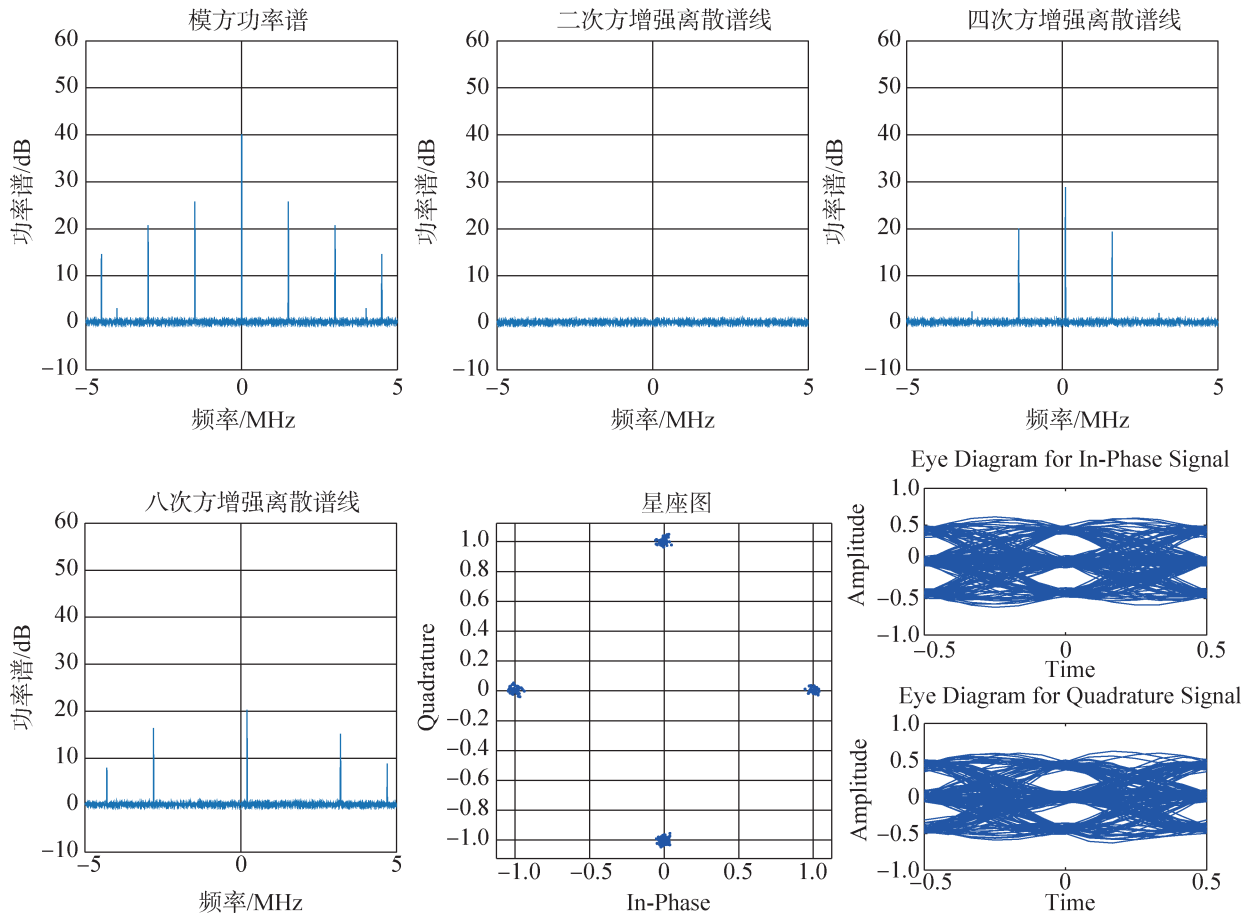


图 3 QPSK/ DQPSK 调制的仿真信号

Fig. 3 Simulation signal modulated by QPSK/DQPSK

表 1 各类 PSK 体制信号谱分析及星座图特征表

Table 1 Signal spectrum analysis and constellation characteristics of various PSK systems

PSK 体制	模方谱	平方谱	四次方谱	八次方谱	星座图
BPSK/ DPSK	$0, \pm n \times R_b (n=1, 2, \dots)$	$2\Delta f, 2\Delta f \pm R_b$	$4\Delta f, 4\Delta f \pm 2R_b$	$8\Delta f, 8\Delta f \pm n \times R_b (n=1, 2, \dots)$	2 个点
QPSK/ DQPSK	$0, \pm n \times R_b (n=1, 2, \dots)$	无谱线	$4\Delta f, 4\Delta f \pm R_b$	$8\Delta f, 8\Delta f \pm 2R_b$	4 个点
8PSK	$0, \pm n \times R_b (n=1, 2, \dots)$	无谱线	无谱线	$8\Delta f, 8\Delta f \pm R_b$	8 个点
$\pi/4$ -DQPSK	$0, \pm n \times R_b (n=1, 2, \dots)$	无谱线	$4\Delta f \pm R_b/2, 4\Delta f \pm 3R_b/2$	$8\Delta f, 8\Delta f \pm R_b$	8 个点
OQPSK	0	$2\Delta f \pm R_b$	$4\Delta f, 4\Delta f \pm 2R_b$	$8\Delta f$	4 个点

(频偏)和符号速率, 再结合星座图、眼图或其他特征, 可对各类 PSK 调制体制进行有效识别和验证。

4 结束语

基于 PSK 调制的数字通信系统在实际工程中有着广泛的应用, 本文对其信号源进行仿真和分析, 不仅可以对调制方式进行灵活设置, 还可以灵活设置信噪比等参数, 同时根据中频信号数据

记录的格式生成 int16 格式的数据文件, 事后通过信号分析处理软件验证了仿真数据的正确性, 另外本文还分析了基于模方谱及高次方功率谱的 PSK 调制方式识别方法, 具有很强的鲁棒性和广泛的应用价值。

参考文献

[1] 杨杰, 刘珩, 卜祥元, 等. 通信信号调制识别: 原理与算法

- [M].北京:人民邮电出版社, 2014.
- [2] 刘娟. 数字通信信号自动调制识别算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [3] 樊昌信, 曹丽娜. 通信原理(第7版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [4] 谭学治. 基于MATLAB的多功能通信信号源仿真[J]. 电子器件, 2006, 29(3):963-966.
TAN Xuezhi. Simulation of multifunctional communication signal source based on MATLAB[J]. Electronic Devices, 2006, 29(3): 963-966
- [5] 刘兵, 蒋洪晖, 孙高海. 基于MATLAB的相位调制系统仿真分析[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(6):104-106,129.
LIU Bing, JIANG Honghui, SUN Gaohai. Simulation analysis of phase modulation system based on MATLAB [J]. Ship Electronic Engineering, 2010 30(6): 104-106,129.
- [6] 范海波, 杨志俊, 曹志刚. 卫星通信常用调制方式的自动识别[J]. 通信学报, 2004, 25(1): 140-149
FAN Haibo, YANG Zhijun, CAO Zhigang. Automatic identification of common modulation modes in satellite communication[J]. Journal of Communication, 2004, 25(1): 140-149.
- [7] 邓璋, 徐以涛, 王乃超. 基于信号谱线特征的调制方式识别[J]. 通信技术, 2013, 46(1): 7-9,13.
DENG Zhang, XU Yitao, WANG Naichao. Modulation recognition based on signal spectral line characteristics [J]. Communication Technology, 2013, 46(1): 7-9,13.
- [8] 杨琳, 许小东, 路友荣, 等. 基于谱线特征的恒包络数字调制方式识别方法[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(9):936-943.
YANG Lin, XU Xiaodong, LU Yourong, et al. Identification method of constant envelope digital modulation based on spectral line characteristics[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(9): 936-943.
- [9] 赵岚. 基于谱线特征的调制方式自动识别方法[J]. 中国电子科学研究学报, 2012, 7(2):182-185,190.
ZHAO Lan. Automatic identification method of modulation mode based on spectral line characteristics[J]. Chinese Journal of Electronic Science, 2012, 7(2): 182-185,190.
- [10] 李少凯, 董斌, 刘宁. 基于谱线特征的MPSK调制识别[J]. 通信技术, 2010, 43(8): 127-128,131.
LI Shaokai, DONG Bin, LIU Ning. MPSK modulation recognition based on spectral line characteristics[J]. Communication Technology, 2010, 43(8): 127-128,131.
- [11] 李杰. 基于谱特征的数字调制信号识别[C]//浙江省信号处理学会2015年学术年会论文集, 2015.
LI Jie. Digital modulation signal recognition based on spectral characteristics [C]//Proceedings of the 2015 Academic Annual Meeting of Zhejiang Signal Processing Society, 2015.
- [12] 高新诚. 基于谱特征提取的调制识别算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [13] 杨琳. 数字通信信号调制方式自动识别技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [14] 伊彬. 通信信号调制方式自动识别[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- [15] 蒋道福. 卫星信号监测系统关键技术研究及实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.

[作者简介]

瞿伟哲 2000年生, 硕士研究生, 主要研究方向为信息与通信工程。

(本文编辑: 杨秀丽)