10月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2018)05-0802-06

8PSK/16APSK 信号的频偏估计及误比特率分析

田 甜¹,朱立东¹,黄长文¹,翟继强²,李雄飞²

(1.电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室,四川 成都 611731; 2.中国空间技术研究院 西安分院,陕西 西安 710100)

摘 要: 针对 8 移相键控(PSK)和 16 振幅移相键控(APSK)信号的频偏估计及误比特率,介绍 了高阶的恒包络数字调制方式 8PSK 和 16APSK,重点研究 2 种调制信号的频偏估计,并搭建通信 链路模型。采用 Matlab 对 8PSK,16APSK 调制信号在加性高斯白噪声下的频偏估计进行仿真分析, 并使用频偏估计得到的载波频率进行相干解调,最后对比分析实际误比特率与理论误比特率。仿 真结果表明:在不同信噪比的加性高斯白噪声信道条件下,8PSK的抗噪声性能比 16APSK 好;采 用本文给出的频偏估计方法能够较好地接近理论误比特率,为设计通信系统提供依据。

关键词: 8 移相键控/16 振幅移相键控; 频偏估计; 误比特率; 软件仿真 中图分类号:TN927⁺.23 **文献标志码:** A **doi**:10.11805/TKYDA201805.0802

Frequency offset estimation and bit error rate analysis of 8PSK/16APSK signals

TIAN Tian¹, ZHU Lidong¹, HUANG Changwen¹, ZHAI Jiqiang², LI Xiongfei²

(1.National Key Laboratory of Science and Technology on Communication of UESTC, Chengdu Sichuan 611731, China; 2.China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: In order to study frequency offset estimation and Bit Error Rate(BER) of 8 Phase Shift Keying(8PSK) and 16 Amplitude Phase Shift Keying(16APSK) signals, two high-order constant envelope digital modulation methods 8PSK and 16APSK are introduced firstly, and then their frequency offset estimation is investigated. The communication link model is built to simulate the performance. Matrix Laboratory(Matlab) is utilized to simulate and analyze the frequency offset estimation of 8PSK and 16APSK modulation signals, under Additive Gaussion White Noise. Then coherent demodulation is conducted with the carrier frequency obtained by the frequency offset estimation. Finally, the actual bit error rate and theoretical bit error rate are compared and analyzed. Simulation results demonstrate that the noise immunity of 8PSK is better than that of 16APSK, under the condition of Additive Gaussion White Noise channel with different Signal–Noise Ratios(SNR). The performance of the frequency offset estimation method proposed in this paper approaches the theoretical value. This paper provides a reference for the design of communication systems.

Keywords: 8PSK/16APSK; frequency offset estimation; bit error rate; software simulation

在卫星通信系统中,随着业务需求的增加,调制方式的选取对于整个系统性能起着关键作用。8 移相键控(8PSK)和 16 振幅移相键控(16APSK)等高阶的恒包络数字调制方式,可以提高卫星通信系统的数据传输速率和频谱利用率。此外,由于卫星通信中通信双方的相对运动,接收信号总是存在较大的多普勒频偏^[1]。只有估计出这个频率偏差,才能进行正常的解调。本文在上述背景下,研究适用于 8PSK 和 16APSK 调制信号的频偏估计方法,并采用 Matlab 软件搭建卫星通信链路,研究不同信噪比下链路传输数据的误比特率。

1 8PSK,16APSK 调制方式

8PSK 是一种常用于卫星通信的高带宽效率的多相位键控调制技术^[2]。8PSK 利用载波的 8 种不同相位来表征 数字信息。它每次把 1 个 3 位的码组映射为 1 个符号的相位,因此符号率为比特率的 1/3,它们与载波相位的映 射关系如图 1(左)所示^[3]。8PSK 把载波相位的一个 0~2π 周期等分成 8 种相位,已调波相邻相位差为 π/4。

0

010

101

000

001

011

100

111

110

Fig.1 8PSK (left) and 16APSK (right) symbolic mapping 图 1 8PSK(左)、16APSK(右)符号映射关系图



$$C = R_1 \exp\left[j\left(\frac{\pi}{4}i_k\right)\right], i_k = 0, 1, \cdots, 7$$
(1)

0

1010

1011

0010

0110

0111

001

1000

1101

1001

0000

0100

0101

0001

卫星信道具有典型的非线性特征,采用 APSK 调制,既可以与 QAM 一样具有较高的频谱效率,又可以获得 与 PSK 相近的功率效率^[4]。16APSK 是高阶的振幅移相键控调制方式,利用载波的 2 种不同幅值和 8 种不同相位 来表征数字信息^[5]。它每次把 1 个 4 位的码组映射为 1 个符号,因此符号率为比特率的 1/4,它们与载波相位的 映射关系如图 1(右)所示。

16APSK 星座图有 2 个同心圆, 半径分别为 R₁, R₂, 内圆为 4 个点, 外圆为 12 个点, 信号集表达式为:

$$C_{1} = R_{1} \exp\left[j\left(\frac{\pi}{2}i_{k} + \frac{\pi}{4}\right)\right], i_{k} = 0, 1, \cdots, 3$$
(2)

$$C_2 = R_2 \exp\left[j\left(\frac{\pi}{6}i_k + \frac{\pi}{12}\right)\right], i_k = 0, 1, \cdots, 11$$
(3)

$$R_{\rm I} = \frac{16}{12\gamma^2 + 4} \tag{4}$$

 γ 值的不同会直接导致性能差异,一般 γ 的最佳选择在 2.7 左右^[6]。

2 8PSK,16APSK 调制信号的频偏估计

载波频偏估计方法都有关键的两点:一是如何 有效去除接收信号中携带的调制信息;二是如何快 速精确地估计出信号的频率^[7]。在不知道发送信息 序列时,对于多进制数字相位(Multiple Phase Shift Keying, MPSK)调制信号,可以采用非线性变换 ——*M*次方的方法来移去信号的调制信息^[8]。本文



图 2 8PSK 调制信号频偏估计流程图

采用实信号进行仿真分析,不能直接通过对接收信号进行 M 次方去除调制信息。因此,本文给出如图 2 所示的 方法达到去除调制信息的目的,完成频率估计。

假设输入信号为 8PSK 调制信号,可表示为如下形式:

$$S_{\rm 8PSK} = \cos\left(2\pi \left(f_{\rm c} + \Delta f\right) k T_{\rm S} + \varphi_k\right) \tag{5}$$

式中: f_c 为载波频率; Δf 为频偏; T_s 是符号周期; φ_k 为受调相位,可以有 8 种不同的取值。 对 8PSK 信号平方后,可得:

$$(S_{\text{SPSK}})^2 = \left(\cos\left(2\pi(f_c + \Delta f)kT_s + \varphi_k\right)\right)^2 = \frac{1}{2} + \frac{\cos 2\varphi_k}{2}\cos\left(4\pi(f_c + \Delta f)kT_s\right) - \frac{\sin 2\varphi_k}{2}\sin\left(4\pi(f_c + \Delta f)kT_s\right)$$
(6)
经过带通滤波器后,再进行平方处理,得到:

第16卷

$$\Rightarrow Q_{k} = \frac{\sin 4\varphi_{k}}{2} , \hspace{0.1cm} \text{经过带通滤波器后, 再进行平方处理, 得到:} \\ \left(\text{bandpass} \left(\text{bandpass} \left(S_{\text{8PSK}} \right)^{2} \right)^{2} \right)^{2} = \frac{1}{64} \left(Q_{k} \sin \left(8\pi (f_{c} + \Delta f) kT_{s} \right) \right)^{2} = \frac{\left(Q_{k} \right)^{2}}{128} \left(1 - \cos \left(16\pi (f_{c} + \Delta f) kT_{s} \right) \right)$$
(8)

由于 $(Q_k)^2 = \frac{1}{4}$,经过带通滤波器后,得到:

$$\operatorname{bandpass}\left(\operatorname{bandpass}\left(\operatorname{bandpass}\left(S_{\mathrm{8PSK}}\right)^{2}\right)^{2}\right)^{2} = -\frac{1}{512}\cos\left(16\pi\left(f_{\mathrm{c}} + \Delta f\right)kT_{\mathrm{S}}\right)$$
(9)

Ŷ

$$y = -\frac{1}{512}\cos\left(16\pi\left(f_{\rm c} + \Delta f\right)kT_{\rm s}\right) \tag{10}$$

其中,信号 y已去除调制信息,为一单载波 信号。

对信号 y做 FFT 变换,得到的频谱图将 在 8(f_c+Δf)载频处出现峰值。假定频率分辨 力足够小,通过搜索信号频谱的最大值,即 可找到实际载波的位置,从而完成频偏估计。 若实际载波频率落在最大峰和次大峰之间,



则可能产生较大的频率估计误差,此时考虑以下 2 种处理方式:第一,降低频率分辨力;第二,把上述方法的估计结果作为粗估计值,再选用二次插值等算法^[9]进行精细估计。

对于 16APSK 信号,根据定义式(2)、(3)可知,16APSK 的受调相位共有 16 个值: $\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}, \frac{3\pi}{12}, \frac{5\pi}{12}, \frac{7\pi}{12}, \frac{9\pi}{12}, \frac{11\pi}{12}, \frac{3\pi}{12}, \frac{5\pi}{12}, \frac{7\pi}{12}, \frac{7\pi}{12}, \frac{\pi}{12}, \frac{\pi}$

 $\overline{12}$, $\overline{12}$

基于上述 MPSK 频偏估计思想,为去除调制信息,16APSK 的倍频数应为受调相位值的各分母的最小公倍数,即 12。因此,16APSK 调制信号的频偏估计过程如图 3 所示,具体公式推导可参照 8PSK 进行,不再赘述。

16APSK 调制信号在经过图 3 所示的处理过程后,得到的信号将在 $12(f_c + \Delta f)$ 载频处出现峰值,通过搜索该信号频谱的最大值,完成频偏估计。

对于更高阶的 MPSK 信号,可以按照 8PSK 的方法进行 M 次倍频,完成频偏估计;而对于更高阶的多重振 幅移相键控(MAPSK)信号,需参照 16APSK 的方法进行倍频,如星座选用 4+12+16 的 32APSK 调制信号可采用 24 倍频,完成频偏估计。

3 8PSK 和 16APSK 的频偏估计性能仿真

在上述分析的基础上,本文从以下 2 个方面,对 8PSK 和 16APSK 的频偏估计性能进行仿真分析。

由于每次倍频处理后,频偏和载波频率也会相应增加, 为了保证 8PSK 和 16APSK 调制下的带通滤波器均能正常 工作,本文选取采样频率为载波频率的 30 倍,即 600 MHz。 频率分辨力设为 1 kHz,具体仿真参数设置如表 1 所示。

Table1 Basic simulation parameters	
parameters	value
sampling frequency/MHz	600
carrier frequency/MHz	20
data length/bits	60
data rate/Mbps	2
$R_{\rm SN}/{ m dB}$	-10-20
frequency offset/kHz	25,19,7

表1 基本仿真参数

3.1 给定频偏和不同信噪比下的频率估计性能

图 4 中显示频偏为 25 kHz,19 kHz,7 kHz 情况下, 信噪比为-10~20 dB 范围的频率估计平均误差。图中红色实 线表示的是误差为 0,可以得出: 8PSK 和 16APSK 调制信号分别在信噪比大于-6 dB 和-2 dB 时, 频偏估计平均 误差较小; 在加性高斯白噪声信道条件下, 8PSK 的频率估计性能优于 16APSK。



图4 不同信噪比下的频率估计误差

3.2 给定信噪比和不同频偏下的频率估计性能

下面仿真分析给定信噪比和不同频偏条件下的载波 频率估计性能,需要更改的仿真参数如表2所示,其他参 数如表1所示。

根据设置的仿真参数,得到图5所示的仿真结果。

表 2 仿真参数 Table2 Simulation Parameters	
$R_{\rm SN}/{\rm dB}$	-10,-5,0,5,10
frequency offset/kHz	-25–25

选取信噪比为-10 dB,-5 dB,0 dB,5 dB,10 dB, 分析频

偏在-25~25 kHz 范围的频偏估计性能。从图 5 中可以看出,8PSK 在信噪比-10 dB 下,大量频偏估计值可能受到 影响;在其余几种信噪比条件下,不同频偏基本都能获得正确的频率估计值。16APSK 在信噪比-10 dB 和-5 dB 下,大量频偏估计值可能受到影响,在其余几种信噪比条件下,不同频偏基本都能获得正确的频率估计值。可以 得出:在加性高斯白噪声的影响下,8PSK 信号的频偏估计性能优于 16APSK 信号,与前一节的仿真结果相似。



4 链路误比特率仿真分析

本文研究的通信链路主要包括基带信号产生/恢复、调制/解调、频偏估计、误比特率计算等几个模块,具体 框图如图 6 所示。

误比特率是衡量数据在规定时间内传输准确性的指标,是度量一个数字系统可靠性的主要判断依据。本文基于 Matlab 软件,搭建如图 6 所示的仿真链路,研究不同调制信号在加性高斯白噪声信道条件下传输的误比特率,并对比分析理论误比特率与实际误比特率。

设基带数据长度为 6×10⁶ bit, 频偏为 25 kHz, 其他仿真参数参照表 1 设置, 可得到如图 7 所示的仿真结果。

图 7 为 8PSK 和 16APSK 调制信号在有频偏估计和无频偏估计时的误比特率曲线图,16APSK(estimated carrier frequency)表示采用 16APSK 调制方式,使用本文给出的频偏估计方法的信号; 16APSK(actual carrier frequency)

表示采用 16APSK 调制方式,不使用本文给出的频偏估计方法,直接采用正确的载波频率进行解调的信号。由图 7 可知:在 SNR 大于-5 dB 时,使用文中的频偏估计方法,误比特率能较好地接近理论曲线;在同样 SNR 条件 下,8PSK 的误比特率性能好于 16APSK;8PSK 信号能在较低信噪比条件下达到较低的误比特率。



5 结论

本文针对卫星通信系统中 8PSK 和 16APSK 两类高阶的恒包络数字调制信号,阐述其调制基本原理,并在不同信噪比的加性高斯白噪声信道条件下进行频偏估计分析。基于 Matlab 软件搭建通信链路,对 2 种调制信号在同样信道条件下传输的误比特率进行仿真分析。仿真结果表明:采用本文给出的频偏估计方法可以较好地接近理论误比特率,并且在不同信噪比的加性高斯白噪声信道条件下,8PSK的频偏估计效果和抗噪声性能好于16APSK。

参考文献:

- FARR W. Technology development for high efficiency optical communication[C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Piscataway,NJ,USA:IEEE, 2012:11-8.
- [2] 杜兵团,郭海鹏. 基于 FPGA的 8PSK 解调器设计[J]. 无线电工程, 2014(11):73-76. (DU Bingtuan, GUO Haipeng. Design of 8PSK demodulator based on FPGA[J]. Radio Engineering, 2014(11):73-76.)
- [3] TOMASI W. Electronic communications systems: fundamentals through advanced[M]. NJ,USA: Prentice Hall, 1998.
- [4] 杨旭,王晓燕,苑超,等. 卫星通信中 APSK 调制方式的参数设计及优化[C]//卫星通信学术年会. 北京:[s.n.], 2013:434-438. (YANG Xu,WANG Xiaoyan,YUAN Chao, et al. Parameter design and optimization of APSK modulation in satellite communication[C]// Annual Conference on Satellite Communications. Beijing:[s.n.], 2013:434-438.)
- [5] 谢秋杨. 面向卫星通信高阶调制解调 16-APSK 算法实现研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012. (XIE Qiuyang. Research on 16-APSK algorithm implementation of high order modulation and demodulation for satellite communication[D]. Changsha, China:Hunan University, 2012.)
- [6] 成风毅,刘爱军,张青双,等. APSK 与极化码级联系统星座优化设计方案[J]. 通信技术, 2016,49(1):12-17. (CHENG Fengyi,LIU Aijun,ZHANG Qingshuang, et al. APSK and polar code cascade system constellation optimization design scheme[J]. Communication Technology, 2016,49(1):12-17.)
- [7] 胡景明,刘爱军,郭道省. 基于 APSK 信号周期性相差的载波频偏估计算法[J]. 军事通信技术, 2013(1):9-14. (HU Jingming,LIU Aijun,GUO Daoxing. Algorithm for carrier frequency offset estimation based on periodic difference of APSK signals[J]. Military Communications Technology, 2013(1):9-14.)
- [8] 胡礼,廖明,王世练. 基于粒子群优化的 MPSK 信号频偏估计算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6): 947-951. (HU Li,LIAO Ming,WANG Shilian. MPSK signal frequency estimation algorithm of particle swarm optimization[J]. Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):947-951.)
- [9] 丁玉杰.低信噪比短突发通信系统下载波频偏估计算法研究[D].西安:西安电子科技大学, 2014. (DING Yujie. Study on wave frequency offset estimation algorithm for short message burst communication systems with low SNR[D]. Xi'an, China:Xidian University, 2014.)