

32APSK-TCM 技术在中继卫星通信系统中的应用研究

张秀宁, 张旭, 王义强
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 32APSK (Amplitude Phase Shift Keying, 幅相键控) 技术与 32QAM (Quadrature Amplitude Modulation, 正交幅度调制) 技术相比, 减少了幅值数目, 适合于中继卫星通信系统非线性信道。TCM (Trellis Code Modulation, 网格编码调制) 技术将信道编码与多元调制相结合, 在不增加频谱带宽的条件下, 可以降低发射功率, 减少能耗, 降低对功率放大器技术指标的要求, 有利于实现卫星有效载荷的轻型化与小型化。本文将 32APSK 技术与 TCM 技术相结合, 提出了一种 32APSK-TCM 技术, 详细论述了基于 32APSK-TCM 技术的星座子集分割方法和星座点选择方法, 并对 32APSK-TCM 技术的性能进行了理论分析。在项目组自研的中继卫星通信系统仿真平台上, 对 32APSK-TCM 技术进行了仿真验证。仿真结果表明: 在理想信道条件、I/Q (Inphase/Quadrature, 同相/正交) 幅相不平衡、幅频特性、群时延、相位噪声、功率放大器饱和点、非线性信道条件下, 需要的最大误比特率为 $1E-6$ 时, 32APSK-TCM 技术的最小信噪比与 16APSK 调制技术的最小信噪比相比, 分别节省了 13.29 dB, 13.29 dB, 14.84 dB, 15.54 dB, 15.11 dB, 15.77 dB, 16.37 dB。

关键词: 32APSK-TCM 技术; 中继卫星通信系统; 非线性信道

中图分类号: V443+.1; TN927+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2024)05-0058-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20240524001

引用格式: 张秀宁, 张旭, 王义强. 32APSK-TCM 技术在中继卫星通信系统中的应用研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(5): 58-67.

Research on the Application of 32APSK-TCM Technology in Relay Satellite Communication System

ZHANG Xiuning, ZHANG Xu, WANG Yiqiang
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: Compared to 32QAM technology, 32APSK technology reduces the number of amplitudes and is suitable for a non-linear channel in a relay satellite communication system. TCM technology combines channel coding and multi-level modulation, doesn't increase the spectrum bandwidth, decreases the transmission power, cuts down energy consumption, lowers the requirements for technical indexes of the power amplifier, and is beneficial for achieving lightweight and miniaturization of satellite payloads. This paper combines 32APSK technology and TCM technology, proposes a kind of 32APSK-TCM technology, discusses details of the 32APSK-TCM technology constellation subset splitting method and constellation point selection method, and analyzes the performance of the 32APSK-TCM technology. This paper simulates the 32APSK-TCM technology and 16APSK technology using the simulation platform of the relay satellite communication system developed by our research team. Simulation results demonstrate that under the condition of an ideal channel, I/Q amplitude phase imbalance, amplitude frequency characteristics, group delay, phase noise, power amplifier saturation point, and nonlinear channel, if the maximization value of the required bit error rate is $1E-6$, compared to 16APSK technology, the minimization value of the signal-to-noise ratio of 32APSK-TCM technology saves 13.29 dB, 13.29 dB, 14.84 dB, 15.54 dB, 15.11 dB, 15.77 dB, and 16.37 dB, respectively.

Keywords: 32APSK-TCM technology; Relay satellite communication system; Non-linear channel

Citation: ZHANG Xiuning, ZHANG Xu, WANG Yiqiang. Research on the Application of 32APSK-TCM Technology in Relay Satellite Communication System[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(5): 58-67.

0 引言

中继卫星通信系统填补了我国天基测控的空

白, 与地基测控和海基测控一起, 提高了我国全球测控覆盖率。地基测控、海基测控覆盖不到的地方, 天基测控可以作为补充。地基测控、海基测控

能覆盖到的地方,天基测控可以作为备份,提高了测控的可靠性。随着天基测控数据速率需求的日益增长,提高频谱效率成为众多学者的研究目标。采用高阶调制技术可以提高频谱效率,增加测控信息传输速率^[1,2]。在地面蜂窝移动通信系统中,采用了自适应编码调制技术,调制技术可以根据信道情况选择32QAM(Quadrature Amplitude Modulation, 正交幅度调制), 64QAM, 128QAM, 256QAM, 512QAM, 1 024QAM, 2 048QAM技术^[3,4]。由于幅值较多MQAM(Multi-level Quadrature Amplitude Modulation, 多元正交幅度调制)技术,不适合非线性卫星通信信道。由于传输距离较远,卫星通信通常需要采用高功率放大器。当高功率放大器工作于接近饱和点时,容易引起信号的非线性恶化^[5,6]。由于减少了幅值数目, MAPSK(Multi-level Amplitude Phase Shift Keying, 多元幅相键控)技术比MQAM技术更适合于卫星通信的非线性信道环境。在相同误码率需求条件下、MAPSK需要的信噪比更低,可以降低发射功率、减少能耗,对高功率放大器的技术指标要求更低,可以节省成本、减少卫星有效载荷的体积与重量^[7,8]。

高阶调制技术与低阶调制技术相比,通过增加每符号比特数目来提高频谱效率。同时,由于星座图中信号点之间的欧氏距离减小,为了达到相同的误码率需求,需要更高的信噪比,即更大的发射功率。网格编码调制技术通过星座图逐级分割,逐级增大信号点之间的最小欧氏距离,来改善信噪比需求,不仅不需要增加发射功率,而且可以降低发射功率、节省能耗、降低成本,有利于实现卫星有效载荷的小型化^[9-12]。此外,网格编码调制技术将一部分信源比特进行信道编码后传输,通过引入冗余比特,获得了信道编码增益,可以进一步改善信噪比需求。虽然引入了冗余比特,但是网格编码调制技术通过采用高阶调制,并没有增加对频谱带宽的需求。

本文将32APSK技术与TCM(Trellis Coding Modulation, 网格编码调制)技术相结合,提出了一种32APSK-TCM技术。与16APSK技术相比,32APSK-TCM技术可以改变信息传输速率,不增加频谱带宽,降低发射功率,降低对高功率放大器技术指标的要求,降低能耗,节省成本,有利于实现卫星有效载荷的轻型化与小型化^[13,14]。在中继卫星通信系统领域,32APSK-TCM技术是一

种非常有实际工程应用前景的技术。

1 32APSK-TCM技术的星座子集分割方法

32APSK星座图如图1所示。内圆半径 $R_1=1$,中间圆半径 $R_2=2.53$,外圆半径 $R_3=4.3$ 。内圆包含了 $N_1=4$ 个信号点,中间圆包含了 $N_2=12$ 个信号点,外圆包含了 $N_3=16$ 个信号点。

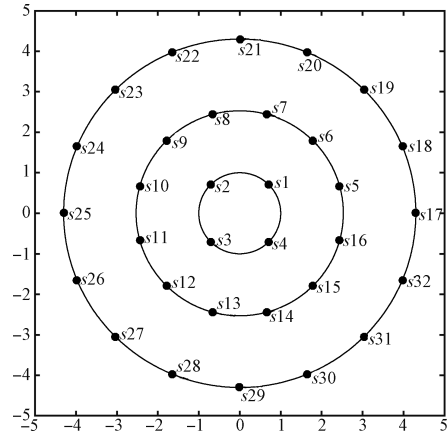


图1 32APSK星座图

Fig. 1 32APSK constellation diagram

内圆星座点坐标计算公式如式(1)所示。

$$R_1 \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{N_1}i + \theta_1\right)\right), \quad i=0, 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中, θ_1 表示内圆星座点的初始相位。中间圆星座点坐标计算公式如式(2)所示。

$$R_2 \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{N_2}i + \theta_2\right)\right), \quad i=0, 1, 2, \dots, 11 \quad (2)$$

式中, θ_2 表示中间圆星座点的初始相位。外圆星座点坐标计算公式如式(3)所示。

$$R_3 \exp\left(j\left(\frac{2\pi}{N_3}i + \theta_3\right)\right), \quad i=0, 1, 2, \dots, 15 \quad (3)$$

式中, θ_3 表示外圆星座点的初始相位。

32APSK第一级分割星座子集如图2所示。B0包含了 $s_1, s_3, s_5, s_7, s_9, s_{11}, s_{13}, s_{15}, s_{17}, s_{19}, s_{21}, s_{23}, s_{25}, s_{27}, s_{29}, s_{31}$ 一共16个信号点,B1包含了 $s_2, s_4, s_6, s_8, s_{10}, s_{12}, s_{14}, s_{16}, s_{18}, s_{20}, s_{22}, s_{24}, s_{26}, s_{28}, s_{30}, s_{32}$ 一共16个信号点。

B0第二级分割星座子集如图3(a)所示,E0包含了 $s_3, s_5, s_7, s_{15}, s_{19}, s_{23}, s_{27}, s_{31}$ 一共8个信号点,E1包含了 $s_1, s_9, s_{11}, s_{13}, s_{17}, s_{21}, s_{25}, s_{29}$ 一共8个信号点。B1第二级分割星

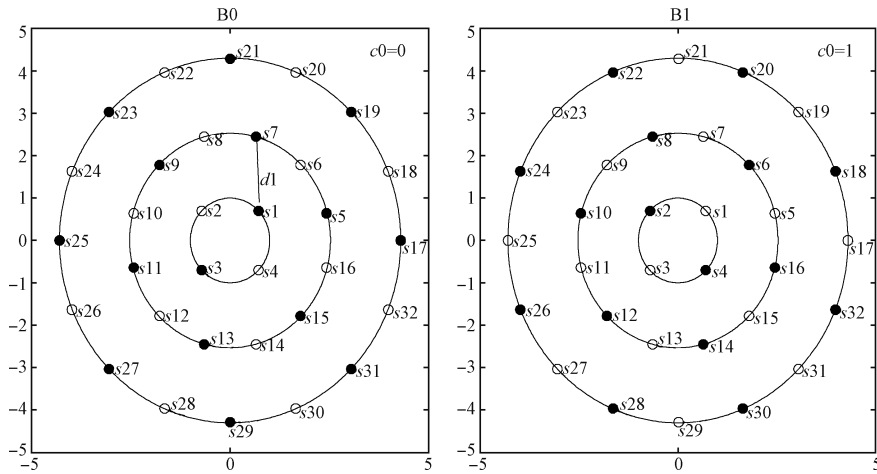
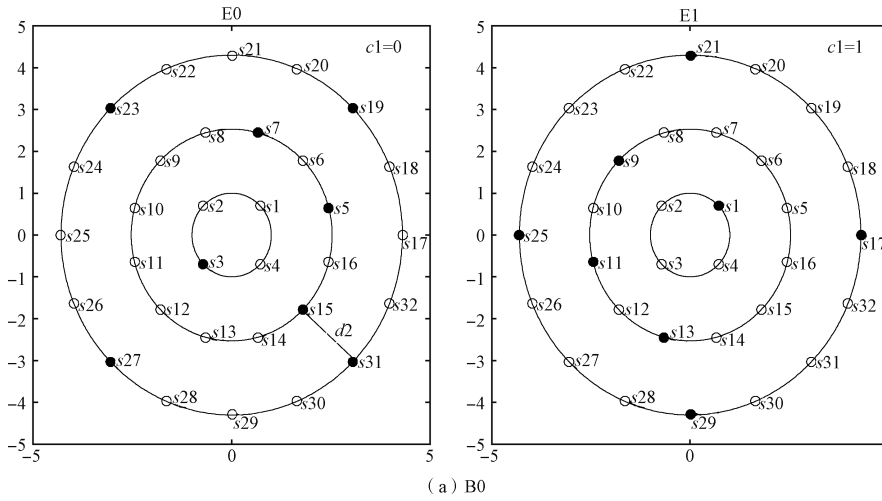


图2 32APSK 第一级分割星座子集

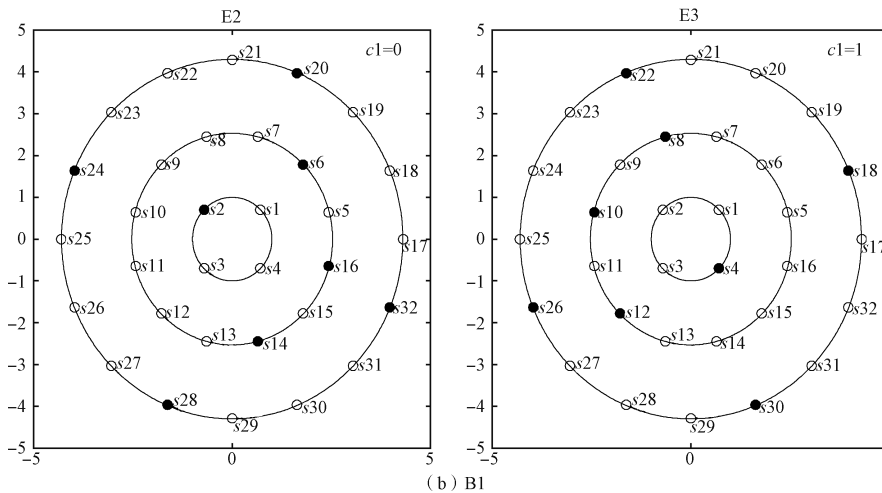
Fig. 2 32APSK first level segmentation constellation subset

星座子集如图 3(b)所示, E2 包含了 s_2 、 s_6 、 s_{14} 、 s_{16} 、 s_{20} 、 s_{24} 、 s_{28} 、 s_{32} 一共 8 个信号点, E3 包

含了 s_4 、 s_8 、 s_{10} 、 s_{12} 、 s_{18} 、 s_{22} 、 s_{26} 、 s_{30} 一共 8 个信号点。



(a) B0



(b) B1

图3 32APSK 第二级分割星座子集

Fig. 3 32APSK second level segmentation constellation subset

E0第三级分割星座子集如图4(a)所示，F0包含了 s_7 、 s_{15} 、 s_{19} 、 s_{27} 一共四个信号点，F1包含了 s_3 、 s_5 、 s_{23} 、 s_{31} 一共四个信号点。E1第三级分割星座子集如图4(b)所示，F2包含了 s_1 、 s_{11} 、 s_{21} 、 s_{29} 一共四个信号点，F3包含了 s_9 、 s_{13} 、 s_{17} 、 s_{25} 一共四个信号点。E2第三级分割

星座子集如图4(c)所示，F4包含了 s_2 、 s_{16} 、 s_{20} 、 s_{28} 一共四个信号点，F5包含了 s_6 、 s_{14} 、 s_{24} 、 s_{32} 一共四个信号点。E3第三级分割星座子集如图4(d)所示，F6包含了 s_4 、 s_8 、 s_{26} 、 s_{30} 一共四个信号点，F7包含了 s_{10} 、 s_{12} 、 s_{18} 、 s_{22} 一共四个信号点。

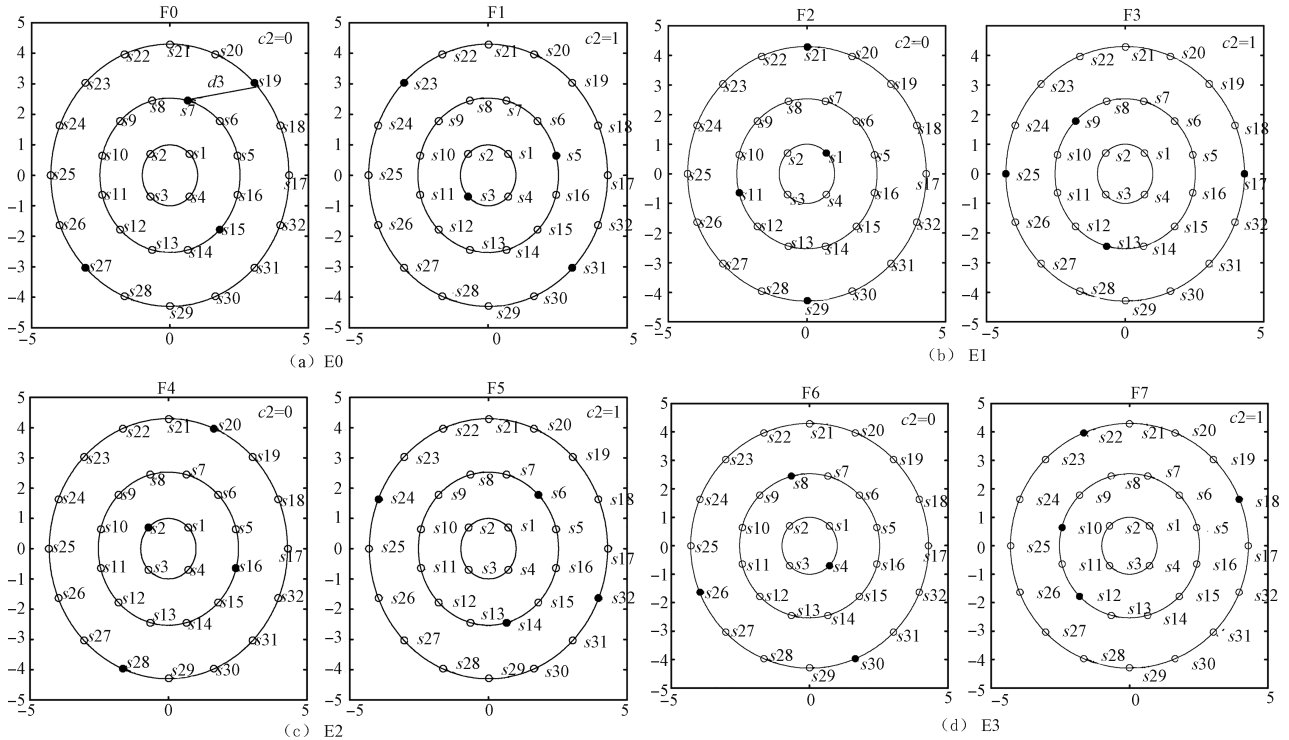


图4 32APSK第三级分割星座子集

Fig. 4 32APSK third level segmentation constellation subset

F0第四级分割星座子集如图5(a)所示，G0包含了 s_{15} 、 s_{19} 一共两个信号点，G1包含了 s_7 、 s_{27} 一共两个信号点。F1第四级分割星座子集如图5(b)所示，G2包含了 s_3 、 s_{31} 一共两个信号点，G3包含了 s_5 、 s_{23} 一共两个信号点。F2第四级分割星座子集如图5(c)所示，G4包含了 s_1 、 s_{29} 一共两个信号点，G5包含了 s_{11} 、 s_{21} 一共两个信号点。F3、F4、...、F7第四级分割星座子集读者可自行推导。

G0第五级分割星座子集如图6(a)所示，H0包含了 s_{15} 一个信号点，H1包含了 s_{19} 一个信号点。G1第五级分割星座子集如图6(b)所示，H2包含了 s_7 一个信号点，H3包含了 s_{27} 一个信号点。G2、G3、...、G15第五级分割星座子集读者可自行推导。

图2中电平间隔 d_1 为信号点 s_1 与 s_7 之间的距离，如式(4)所示。式(4)中 $real$ 表示信号点的实部， $imag$ 表示信号点的虚部。内圆信号点 s_1 的坐标可以根据式(1)求出，中间圆信号点 s_7 的坐标可以根据式(2)求出。图3中电平间隔 d_2 为信号点 s_{15} 与 s_{31} 之间的距离，如式(5)所示。中间圆信号点 s_{15} 的坐标可以根据式(2)求出，外圆信号点 s_{31} 的坐标可以根据式(3)求出。图4中电平间隔 d_3 为信号点 s_7 与 s_{19} 之间的距离，如式(6)所示。外圆信号点 s_{19} 的坐标可以根据式(3)求出。图5(a)G0中信号点 s_{15} 与 s_{19} 之间的距离，如式(7)所示，G1中信号点 s_7 与 s_{27} 之间的距离，如式(8)所示。G2、G3、...、G15中信号点之间的距离读者可自行推导。32APSK-TCM的电平间隔 $d_{32APSK-TCM}$ 即为32APSK第四级分割距离的平均值，如式(9)所示。

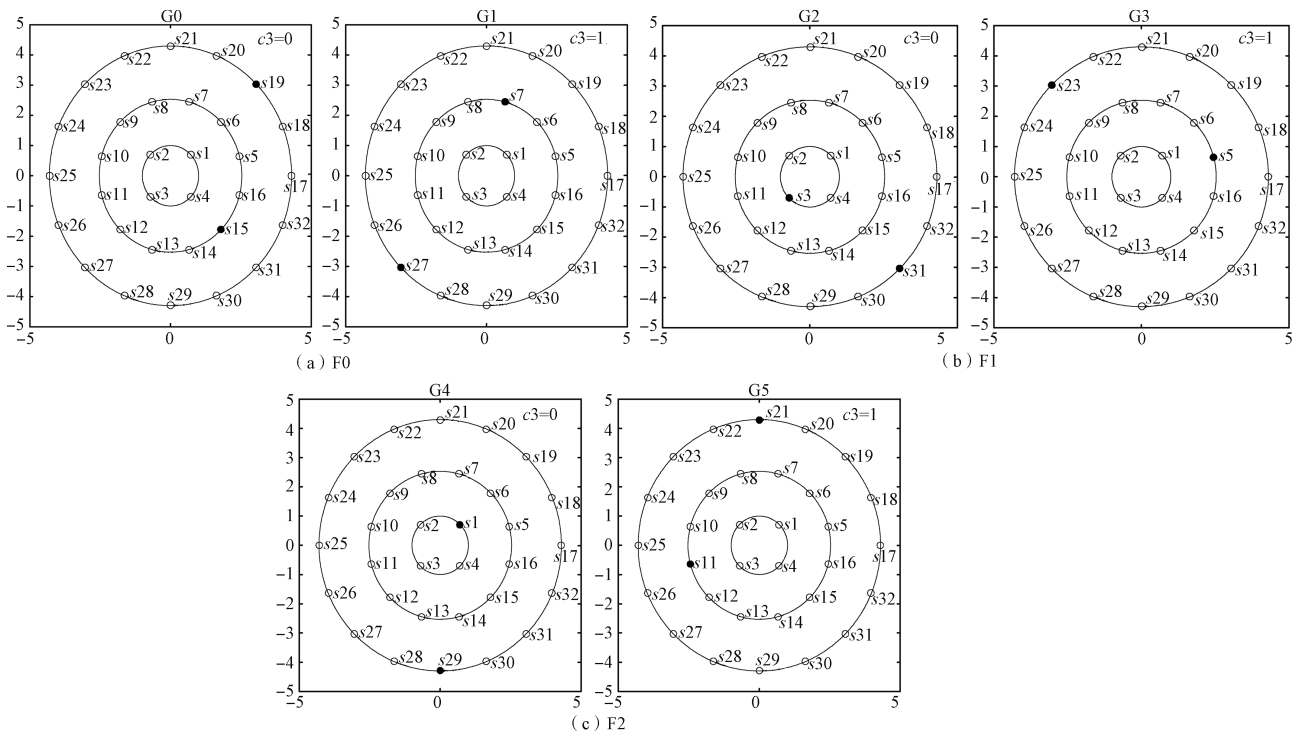


图 5 32APSK 第四级分割星座子集

Fig. 5 32APSK fourth level segmentation constellation subset

$$d1 = \sqrt{(\text{real}(s1) - \text{real}(s7))^2 + (\text{imag}(s1) - \text{imag}(s7))^2} = 1.737 5 \tag{4}$$

$$d2 = \sqrt{(\text{real}(s15) - \text{real}(s31))^2 + (\text{imag}(s15) - \text{imag}(s31))^2} = 1.77 \tag{5}$$

$$d3 = \sqrt{(\text{real}(s7) - \text{real}(s19))^2 + (\text{imag}(s7) - \text{imag}(s19))^2} = 2.459 3 \tag{6}$$

$$d_{15,19} = \sqrt{(\text{real}(s15) - \text{real}(s19))^2 + (\text{imag}(s15) - \text{imag}(s19))^2} = 4.989 1 \tag{7}$$

$$d_{7,27} = \sqrt{(\text{real}(s7) - \text{real}(s27))^2 + (\text{imag}(s7) - \text{imag}(s27))^2} = 6.613 2 \tag{8}$$

$$d_{32\text{APSK-TCM}} = (d_{15,19} + d_{7,27} + d_{3,31} + d_{5,23} + d_{1,29} + d_{11,21} + d_{9,17} + d_{13,25} + d_{2,28} + d_{16,20} + d_{6,14} + d_{24,32} + d_{4,26} + d_{8,30} + d_{12,22} + d_{10,18}) / 16 = 5.600 65 \tag{9}$$

2 32APSK-TCM 技术的星座点选择方法

输入的信源比特 $u_0u_1u_2$ 经过 $n=4, k=3, K=3(4,3,3)$ 的卷积编码器, 如图 7 所示, 生成卷积编码后的比特 $c_0c_1c_2c_3$, 信源比特 u_3 与 c_4 一一对应^[15,16]。 $c_0c_1c_2c_3$ 从 $G_0, G_1, G_2, \dots, G_{15}$ 中选择一个子集, c_4 从确定的子集中选择一个信号点。

3 32APSK-TCM 性能评价

假设 32 个星座点等概率出现, 则 32APSK 的平均归一化功率如式(10)所示。

$$\frac{\sum_{i=1}^{32} ((\text{real}(s_i))^2 + (\text{imag}(s_i))^2)}{32} = 11.770 3 \tag{10}$$

平均归一化电压幅度为 $\sqrt{11.770 3} = 3.430 8 \text{ V}$,

32APSK 星座图中最小电平间隔如式(11)所示。

$$d_{5,6} = \sqrt{(\text{real}(s5) - \text{real}(s6))^2 + (\text{imag}(s5) - \text{imag}(s6))^2} = 1.309 6 \tag{11}$$

32APSK 欧氏距离如式(12)所示。

$$Euc_{32\text{APSK}} = d_{5,6} / 3.430 8 = 1.309 6 / 3.430 8 = 0.381 7 \tag{12}$$

32APSK-TCM 的欧氏距离如式(13)所示。

$$Euc_{32\text{APSK-TCM}} = d_{32\text{APSK-TCM}} / 3.430 8 = 5.600 65 / 3.430 8 = 1.632 46 \tag{13}$$

图 1 中内圆和中间圆构成了 16APSK 星座, 假设 16 个星座点等概率出现, 则 16APSK 的平均归

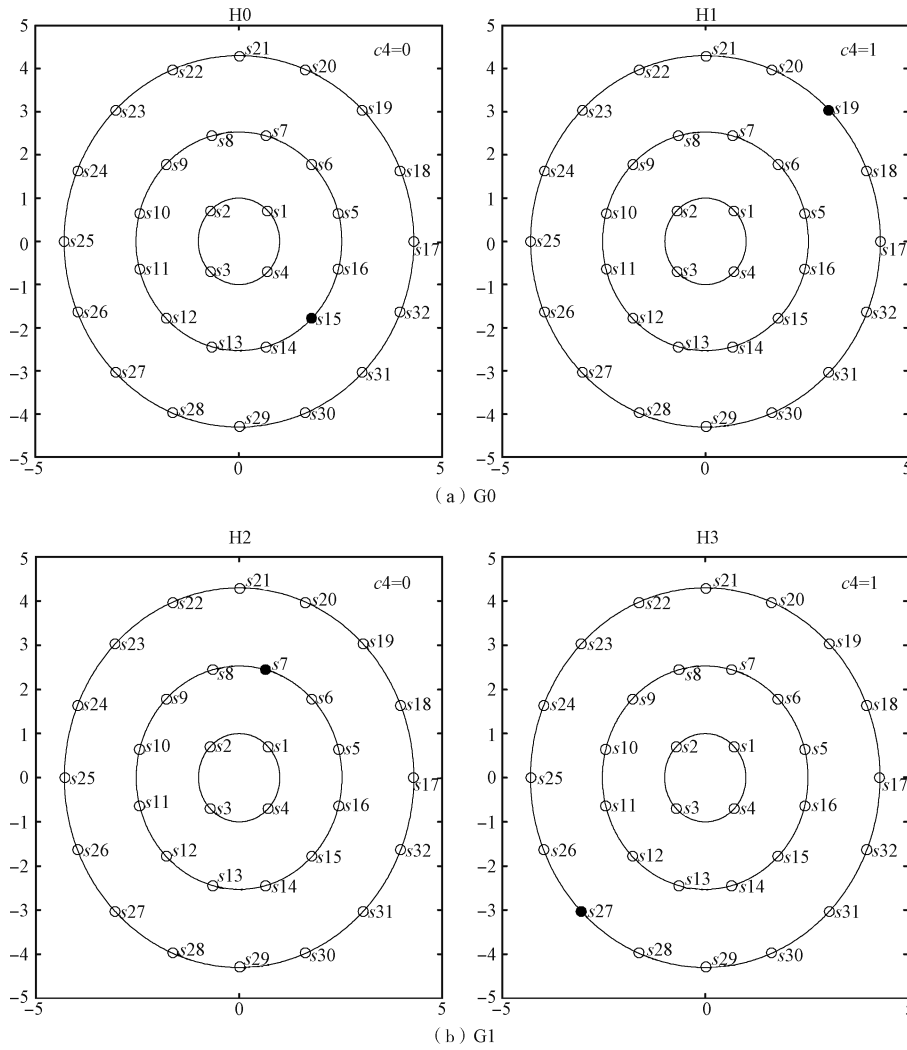


图6 32APSK第五级分割星座子集

Fig. 6 32APSK fifth level segmentation constellation subset

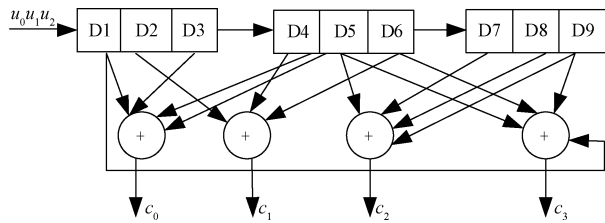


图7 $n=4, k=3, K=3$ 的(4,3,3)卷积编码器

Fig. 7 $n=4, k=3, K=3, (4,3,3)$ convolutional encoder

一化功率如式(14)所示。

$$\frac{\sum_{i=1}^{16} ((\text{real}(s_i))^2 + (\text{imag}(s_i))^2)}{16} = 5.0507 \quad (14)$$

平均归一化电压幅度为 $\sqrt{5.0507} = 2.2474 \text{ V}$, 16APSK星座图中最小电平间隔如式(11)所示, 与32APSK星座图中的最小电平间隔相等。16APSK的欧氏距离如式(15)所示。

$$Euc_{16\text{APSK}} = d_{5,6} / 2.2474 = 1.3096 / 2.2474 = 0.5827 \quad (15)$$

为了提高信息传输速率, 采用高阶调制32APSK技术, 与低阶调制16APSK技术相比, 性能损失如式(16)所示。

$$\frac{Euc_{32\text{APSK}}^2}{Euc_{16\text{APSK}}^2} = \frac{(0.3817)^2}{(0.5827)^2} = 0.4290958 \quad (-3.674457 \text{ dB})$$

(16)

由式(16)可知, 与16APSK相比, 32APSK性能损失了3.674457 dB。如果采用32APSK-TCM技术, 可以获得的性能增益如式(17)所示。

$$\frac{Euc_{32\text{APSK-TCM}}^2}{Euc_{16\text{APSK}}^2} = \frac{(1.63246)^2}{(0.5827)^2} = 7.8487 \quad (8.948 \text{ dB}) \quad (17)$$

由式(17)可知, 32APSK-TCM技术通过星座图逐级分割, 增加了星座点之间的最小欧氏距离, 与16APSK技术相比, 可以将性能改善8.948 dB。

32APSK-TCM技术通过卷积编码器引入了1比特冗余, 但是与16APSK技术相比, 调制阶数变高, 1个符号由4个比特表示变成了由5个比特表示, 所以并不需要增加频谱带宽^[17]。

4 仿真结果与分析

表1列出了实施仿真时采用的仿真参数^[18-21]。所涉及的中继卫星通信系统以及仿真平台来源于文献[18]和文献[19]。

表1 仿真采用的参数
Table 1 Simulation parameters

参数名称	参数取值
原始信息速率	900 Mbps
成形系数	0.35
幅相偏差	0.4 dB, 3°
幅频特性	$f_0 \pm 35\% : 2.0 \text{ dB}$
	$f_0 \pm 50\% : 3.0 \text{ dB}$
群时延	$f_0 \pm 25\% : 15 \text{ ns}$
	$f_0 \pm 35\% : 25 \text{ ns}$
	$f_0 \pm 50\% : 30 \text{ ns}$
相位噪声	10 Hz -48.67 dBc
	100 Hz -70.59 dBc
	1 kHz -82.77 dBc
	10 kHz -85 dBc
	100 kHz -94.3 dBc
	1 MHz -112.35 dBc
16APSK 半径	1(内圆), 2.53(外圆)
32APSK 半径	1(内圆), 2.53(中圆), 4.3(外圆)

4.1 AWGN 信道条件下仿真结果与分析

16APSK 与 32APSK-TCM 在 AWGN 信道条件下的仿真误码率曲线如图8所示。

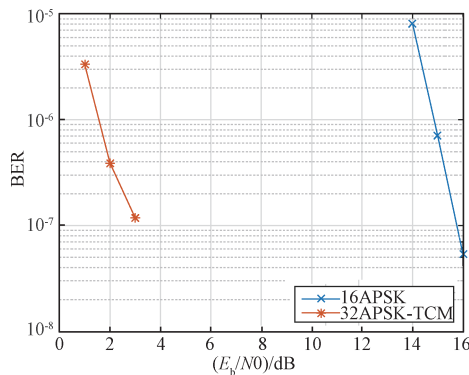


图8 16APSK 与 32APSK-TCM 在 AWGN 信道条件下的仿真误码率曲线

Fig. 8 Bit error rate curve of 16APSK and 32APSK-TCM under AWGN channel

由图8可知, 误码率需求为1E-6时, 16APSK需要的信噪比为14.85 dB, 32APSK-TCM需要的信噪比为1.56 dB。32APSK-TCM与16APSK相比, 可节省13.29 dB。

4.2 幅相偏差信道条件下仿真结果与分析

图9为幅相偏差条件下, 16APSK和32APSK-TCM两种调制技术误比特率与信噪比仿真关系曲线。与图8进行对比, 可以得到如下结论:

① 误比特率需求为1E-6时, 幅相偏差信道条件下, 16APSK调制技术需要的信噪比在14.5 dB与15 dB之间, 32APSK-TCM需要的信噪比在1 dB与2 dB之间。与理想信道相比, 信噪比损失较小, 这是因为中继用户终端的接收机采用了幅相偏差校正技术^[18-21]。

② 误比特率需求为1E-6时, 32APSK-TCM调制技术比16APSK调制技术可节省13.29 dB。

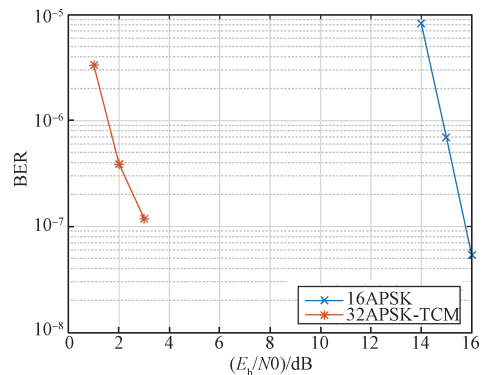


图9 幅相偏差条件下16APSK与32APSK-TCM仿真误码率曲线

Fig. 9 Bit error rate curve of 16APSK and 32APSK-TCM under conditions of amplitude phase imbalance

4.3 幅频特性信道条件下仿真结果与分析

幅频特性条件下, 16APSK调制技术和32APSK-TCM技术的误码率仿真曲线如图10所示。仿真结果表明:

① 幅频特性信道条件下仿真值与理想信道条件下仿真值相比, 无论是16APSK调制技术还是32APSK-TCM技术, 信噪比损失均较小, 这是因为中继用户终端接收机采用了均衡技术, 对使信号恶化的幅频特性进行了纠正^[18-21]。

② 假设误比特率需求为1E-6, 32APSK-TCM技术与16APSK调制技术相比, 节省的信噪比为14.84 dB。

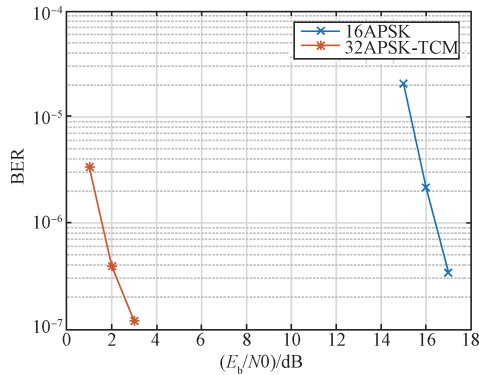


图10 幅频特性条件下16APSK与32APSK-TCM仿真误码率曲线

Fig. 10 Bit error rate curve of 16APSK and 32APSK-TCM under conditions of amplitude frequency characteristics

4.4 群时延信道条件下仿真结果与分析

32APSK-TCM调制技术与16APSK技术在群时延信道条件下的解码解调误比特率与信噪比关系曲线如图11所示。仿真结果表明：

① 误比特率需求为 10^{-6} 时，群时延信道信噪比仿真值与理想信道信噪比仿真值相比，32APSK-TCM调制技术的解码解调信噪比损失可以忽略，16APSK技术的解码解调信噪比损失为2.25 dB。

② 32APSK-TCM技术和16APSK调制技术相比，节省的信噪比为15.54 dB。

4.5 相位噪声信道条件下仿真结果与分析

32APSK-TCM调制技术与16APSK技术在相位噪声信道条件下的解码解调误比特率与信噪比关系曲线如图12所示。仿真结果表明：

① 相位噪声信道信噪比仿真值与理想信道信噪比仿真值相比，16APSK调制技术损失了1.82 dB，32APSK-TCM技术的损失可以忽略，两种调制技术的损失均较小，这是因为中继用户终端接收机采用了盲自适应均衡技术，对相位噪声引起的信号畸变可以进行改善^[18-21]。

② 假设误比特率需求为 10^{-6} ，32APSK-TCM技术和16APSK调制技术相比，可以将信噪比改善15.11 dB。

4.6 功放饱和点条件下仿真结果与分析

中继用户终端功率放大器工作于饱和点时，16APSK调制技术和32APSK-TCM技术的解码解调误比特率与信噪比关系曲线如图13所示。仿真结果表明：

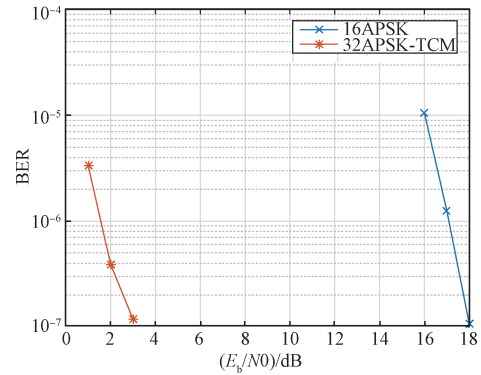


图11 群时延条件下32APSK-TCM与16APSK仿真误码率曲线

Fig. 11 Bit error rate curve of 16APSK and 32APSK-TCM under conditions of group delay

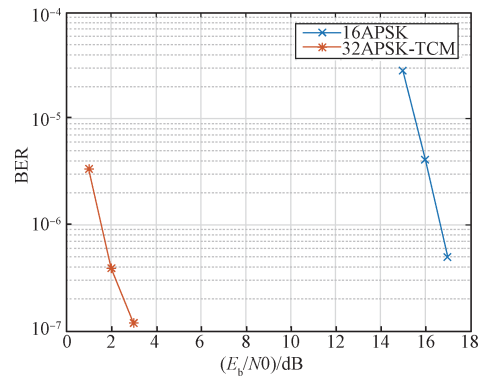


图12 相位噪声条件下16APSK与32APSK-TCM仿真误码率曲线

Fig. 12 Bit error rate curve of 16APSK and 32APSK-TCM under conditions of phase noise

① 当功率放大器工作于饱和点时，与理想信道相比，16APSK调制技术的信噪比损失了2.48 dB，32APSK-TCM调制技术的信噪比损失可以忽略。

② 假设误比特率需求为 10^{-6} ，32APSK-TCM技术和16APSK调制技术相比，可以将信噪比改善15.77 dB。

4.7 非线性信道条件下仿真结果与分析

非线性信道条件下，16APSK技术和32APSK-TCM调制技术的误比特率与信噪比之间的仿真曲线如图14所示。

仿真结果表明：

① 与理想信道相比，非线性信道条件下16APSK调制技术的信噪比损失了3.08 dB，32APSK-TCM调制技术的信噪比损失可以忽略。

② 假设误比特率需求为 10^{-6} ，32APSK-TCM

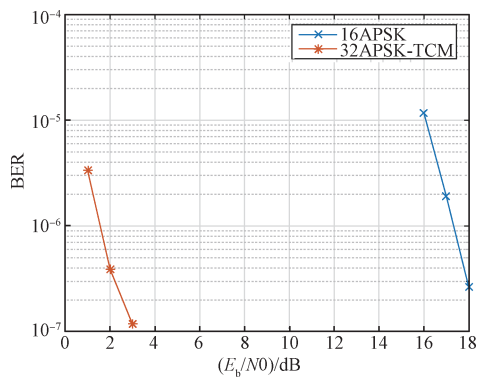


图 13 功放饱和条件下 16APSK 与 32APSK-TCM 仿真误码率曲线

Fig. 13 Bit error rate curve of 16APSK and 32APSK-TCM under conditions of power amplifier saturate point

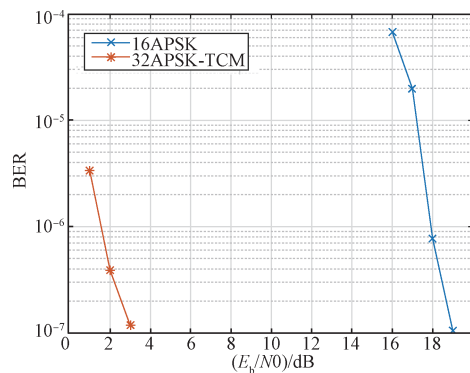


图 14 非线性信道条件下 16APSK 与 32APSK-TCM 仿真误码率曲线

Fig. 14 Bit error rate curve of 16APSK and 32APSK-TCM under conditions of non-linear channel

技术和 16APSK 调制技术相比, 可以将信噪比改善 16.37 dB。

4.8 仿真结论

在理想信道条件、I/Q 幅相不平衡、幅频特性、群时延、相位噪声、功率放大器饱和点、非线性信道条件下^[18-21], 需要的最大误比特率为 $1E-6$ 时, 32APSK-TCM 技术的最小信噪比与 16APSK 调制技术的最小信噪比相比, 分别节省了 13.29 dB, 13.29 dB, 14.84 dB, 15.54 dB, 15.11 dB, 15.77 dB, 16.37 dB。

5 结束语

使用项目组开发完成的中继卫星通信系统仿真平台, 在各类信道条件下, 仿真了 16APSK 调制技术和 32APSK-TCM 技术的误码率与信噪比关系曲线。仿真结果表明: 32APSK-TCM 技术在各类

信道条件下的性能均优于 16APSK 技术, 与理论分析结果一致。本文的理论分析结果与仿真验证结果, 对实际工程建设的中继卫星通信系统的调制技术选择有一定的借鉴意义。更高阶的网格编码调制技术, 比如 64APSK-TCM 技术、128APSK-TCM 技术可以作为下一步的研究方向。

参考文献

- [1] 余飞, 赵春阳, 张楹. 高阶调制技术在 LTE 网络中的研究及应用[J]. 电信工程技术与标准化, 2020, 33(5): 25-27.
YU Fei, ZHAO Chunyang, ZHANG Ying. Research and application of high-order modulation technology in LTE network[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2020, 33(5): 25-27.
- [2] 王中果, 汪大宝, 胡月, 等. 低轨遥感卫星 Ka 频段自适应编码调制应用效能分析[J]. 航天器工程, 2021, 30(4): 69-76.
WANG Zhongguo, WANG Dabao, HU Yue, et al. Analysis on application efficiency of adaptive coding and modulation for LEO remote sensing satellite at Ka-band [J]. Spacecraft Engineering, 2021, 30(4): 69-76.
- [3] 王月. 基于 5G 的自适应编码调制技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.
- [4] LAI J Y, ZHANG W, ZHAO J, et al. An adaptive coding and modulation based multicast scheme to reduce bandwidth consumption in the next generation satellite TV systems[C]// International Conference on Computing, Networking and Communications, 2017.
- [5] 王长红, 高飞, 杜伟. 基于星载高速调制器的预失真算法研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(9): 988-993.
WANG Changhong, GAO Fei, DU Wei. Study on predistortion algorithm of spaceborne high rate modulator[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(9): 988-993.
- [6] 李良山, 杨育红, 王兰. 卫星通信中快速非线性信道 RLS 均衡算法[J]. 信号处理, 2016, 32(4): 451-456.
LI Liangshan, YANG Yuhong, WANG Lan. A fast nonlinear channel RLS equalization algorithm in satellite communication[J]. Journal of Signal Processing, 2016, 32(4): 451-456.
- [7] 李朝辉, 屈晓旭, 娄景艺, 等. 非线性功放对卫星通信质量的影响分析[J]. 舰船电子工程, 2017, 37(11): 59-62.

- LI Chaohui, QU Xiaoxu, LOU Jingyi, et al. Influence analysis of nonlinear power amplifier on satellite communication quality[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(11): 59-62.
- [8] 张厦, 姜泉江, 梁广, 等. 一种 DVB-S2X 标准 16APSK 软解调优化算法[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(5): 660-665.
- ZHANG Sha, JIANG Quanjiang, LIANG Guang, et al. A soft demodulation optimization algorithm of 16APSK signal for DVB-S2X standard[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(5): 660-665.
- [9] 合艳春. 一种新型的网格编码差分混沌调制技术的系统设计与性能分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2017.
- [10] 何荣涛. 超短波收发信机的网格编码调制技术研究 with 实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
- [11] IZHAR M A M, ALJOHANI A J, SOON X N. Distributed joint source coding and trellis coded modulation for symbol-based Markov sources[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(5): 4031-4041.
- [12] YANG Yanping, CHEN Wei. Trellis and network-coded modulation for decode-and-forward two-way relaying over time-varying channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(6): 4845-4858.
- [13] 赵广才. 宽带固态功率合成放大器的设计与实现[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [14] 张健, 吴倩文, 高泽峰, 等. 卷积编码及 Viterbi 译码的低时延 FPGA 设计实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 96-99.
- ZHANG Jian, WU Qianwen, GAO Zefeng, et al. Low-latency FPGA design and implementation of convolutional coding and Viterbi decoding[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 96-99.
- [15] 赵宏伟, 刘春阳, 许利, 等. 基于 SCMA 和卷积编码的联合检测译码算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(3): 847-853.
- ZHAO Hongwei, LIU Chunyang, XU Li, et al. Joint detection and decoding algorithm based on SCMA and convolution coding[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(3): 847-853.
- [16] 陆鸣越, 郭道省, 牛和昊. 一种有效的卷积码与物理层网络编码联合译码算法[J]. 通信技术, 2017, 50(3): 400-405.
- LU Mingyue, GUO Daoxing, NIU Hehao. An effective joint decoding algorithm of convolutional-coded physical-layer network coding[J]. Communications Technology, 2017, 50(3): 400-405.
- [17] 北京遥测技术研究所. 一种 32QAM 网格编码调制方法: 202210715556.3[P/OL]. (2023-03-21)[2023-08-14]. <https://d.wanfangdata.com.cn/patent/ChhQYXRlbnRO-ZXdTmJyAyNDA5MjAxNTEyMDgSEENOMjAyMjEw-NzE1NTU2LjMaCG1rZjVzc2wy>.
- [18] 张秀宁, 李正岱, 张旭. 应用于中继卫星通信系统的 16QAM-TCM 技术研究[J]. 遥测遥控, 2024, 45(2): 42-49.
- ZHANG Xiuning, LI Zhengdai, ZHANG Xu. 16QAM-TCM technology research applied in relay satellite communication system[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2024, 45(2): 42-49.
- [19] 刘斌, 张秀宁, 李澎. 中继卫星系统仿真软件设计与应用[J]. 遥测遥控, 2020, 41(1): 1-11.
- LIU Bin, ZHANG Xiuning, LI Peng. Relay satellite system simulation software design and application[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(1): 1-11.
- [20] 翟高伟, 梁晨光, 赵锦瑾. 基于天链卫星的箭载 Ka 频段中继用户终端设计与实现[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(4): 7-14.
- ZHAI Gaowei, LIANG Chenguang, ZHAO Jinjin. The design and implementation of general Ka-band terminal based on TDRSS[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(4): 7-14.
- [21] 黄浩. 跟踪与数据中继卫星间链路捕获和跟踪仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.

[作者简介]

张秀宁 1984年生, 博士, 工程师。

张旭 1991年生, 硕士, 工程师。

王义强 1989年生, 硕士, 工程师。

(本文编辑: 傅杰)

(英文编辑: 赵尹默)