

文章编号:1673-1522(2019)02-0211-06

DOI: 10.7682/j.issn.1673-1522.2019.02.006

# 一种主字母体制安控指令检测采样优化方法

翟龙军<sup>1</sup>,王卫玲<sup>2</sup>,高山<sup>1</sup>,姜志森<sup>1</sup>

(1. 海军航空大学;2. 烟台市规划信息中心,山东 烟台 264001)

**摘要:**针对工程实现中主字母体制安控系统的指令实时检测性能受采样方案影响较大的问题,通过对单音信号频率、检测采样频率和采样点数的合理选择,提出了一种指令检测的采样优化实现方案。仿真实验结果表明,通过对采样方案的优化,在固定多普勒频偏和可变多普勒频偏情况下,可以最低采样点数实现指令可靠检测,便于利用FPGA实现实时处理。

**关键词:**主字母;安控系统;采样率;指令检测

**中图分类号:**V556.1

**文献标志码:**A

安控系统在飞行器飞行的初始阶段处于待机状态。当飞行任务达到一定时间后,安控接收机开机,不断检测飞行器的位置及运动状态。当安控系统判定出飞行器偏离预设轨道过大或发生明显失控时,飞行器所携带的安控接收机将把自毁指令传送给安控指令执行机构控制火工品的引爆以完成安控任务,从而避免飞行器对地面基础设施以及人员造成威胁<sup>[1-7]</sup>。

安控系统按工作模式分为自主安控模式与遥控安控模式。主字母体制安控通信是利用基频及其高次谐波作为备选单音集合,利用 $m$ 个单音信号进行编码组成字母;然后,根据通信协议将多个字母组合为特定的安控指令,通过FM调制到射频频段发送给安控接收机。安控接收机需要将接收到的信号进行解调并检测指令信息,控制安控执行机构执行指令<sup>[3,8-9]</sup>。主字母安控系统的工作流程和接受处理过程分别如图1、2所示。

经过信道传输,接收信号通过带通采样将信号进行频谱搬移。然后,信号分2路分别与NCO生成的同相序列与正交序列相乘进行数字下变频解调处理。数字下变频后的输出信号,一路送给锁相环继续对载波频率进行同步跟踪,另一路直接进行FFT分析得到多音信号频谱<sup>[10-13]</sup>。

在进行FFT分析时,由于采样频率及采样点数决定了频率分辨率。在低分辨率时,将导致不能正确分辨单音信号,即栅栏效应。通过增加采样点数,提高采样频率,可以提高频谱分辨率,减小栅栏效应的影响<sup>[8,14-16]</sup>。但FFT点数的增加必然会造成时间和资源的浪费,在FPGA中进行具体的工程实现过程中会消耗更巨大的资源<sup>[17]</sup>,特别是对系统时效性要求特别高

的应用场景下,必须克服这种缺点。对于单音信号来说,只需要保证采样点数和采样率满足所有单音频点检测分辨率要求就能保证系统的通信质量。因此,可以通过合理选择单音信号频率<sup>[10]</sup>,降低采样点数,提高系统实时处理性能。

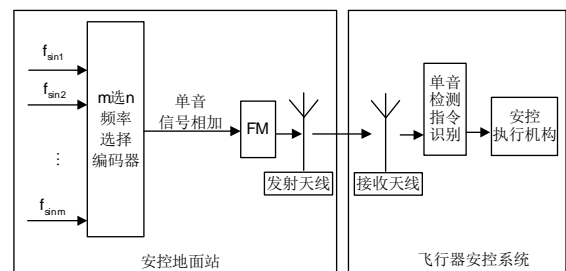


图1 主字母安控系统工作流程

Fig.1 Workflow of high alphabet safety control system

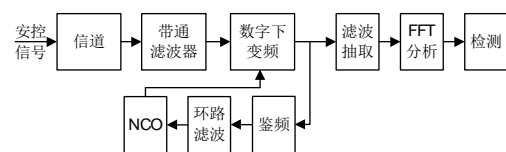


图2 安控信号的接收处理过程

Fig.2 Signal processing procedure of high alphabet safety control system

## 1 低采样点数主字母体制指令检测采样优化方案

在安控指令检测过程中,FFT采样点数与信号采样率共同决定了信号频谱的分辨率<sup>[8,15]</sup>。设采样点数为 $N$ ,采样率为 $f_s$ ,则频谱分辨率 $F$ 为:

收稿日期:2019-01-24; 修回日期:2019-04-10

作者简介:翟龙军(1979-),男,副教授,博士。

$$F = \frac{f_s}{N} \tag{1}$$

$F$  表示 2 条谱线所表示的频率间隔。所以,对于多音信号,要想准确分析出其单音成分,最好的办法是让每个单音频谱都落在频谱分辨率所约束的谱线上<sup>[10]</sup>。

设单音频率为  $f_0$ , 则其周期  $T$  为  $1/f_0$ , 假设信号的截断长度在时域为  $T_p$ , 采样时间间隔为  $T_s$ , 则采样频率  $f_s = 1/T_s$ , 采样点数  $N = T_p/T_s$ 。FFT 分析中的频谱分辨率  $F$  为:

$$F = f_s/N = 1/T_p \tag{2}$$

若截取长度内含  $z$  个单音信号周期, 即  $T_p = z \times T = z/f_0$ , 由式 (1)、(2) 可得  $F = f_0/z$ , 即  $f_0 = z \times F$ 。因此, 要使  $f_0$  正好落在谱线上, 只需  $z$  为整数。因此, 为使  $\Omega = \{f_B, f_B + \Delta f_0, \dots, f_B + (m-1)\Delta f_0\}$  单音集合中的单音成分能刚好落在谱线上, 须要满足:

$$f_B + (m-1)\Delta f_0 = z \times F \tag{3}$$

令  $F = \Delta f_0$ , 假设  $f_B = s \times \Delta f_0$ , 式(3)可简化为:

$$(s+m-1) \times \Delta f_0 = z \times F \tag{4}$$

从而得出

$$z = s + m - 1 \tag{5}$$

要使多音信号中的单音成分得到正确的检测, 只需要  $s$  为整数。因此, 可以将多音信号检测的优化采样方案总结如下:

1) 选择单音信号集合:

$$\Omega = \{f_B, f_B + \Delta f_0, \dots, f_B + (m-1)\Delta f_0\}$$

中, 各单音成分和单音信号基准频率  $f_B$  满足

$$f_B + (m-1)\Delta f_0 = a \times \Delta f_0 \tag{6}$$

式(6)中,  $a$  和  $m$  为整数。

2) 选择采样率  $f_s$  满足:

$$f_s = b \times \Delta f_0 > 2f_{\max} \tag{7}$$

式(7)中:  $b$  为整数;  $f_{\max}$  为多音信号中的最高频率的单音成分。

3) 选择采样点数  $N$  满足:

$$N = k \frac{f_s}{f_B} = \frac{k \cdot b}{a - m + 1} \tag{8}$$

式中,  $k$  为正整数。

为使得采样点数最少且便于硬件快速实现, 可以选取  $k=1$ , 且选择合适的  $a$ 、 $b$ 、 $m$  值使得  $N$  为 2 的整数次幂。单音信号的频率选择可以通过安控地面站和飞行器安控系统协议约定实现。

## 2 采样率优化检测方案仿真分析

### 2.1 基带信号检测采样仿真分析

设定 Sine Wave1、Sine Wave2、Sine Wave3、Sine Wave4 分别为满足式(6)条件的 4 个单音信号组合, 频率分别为 6.8 kHz、7.2 kHz、8 kHz、8.8 kHz。建立基带信号检测采样 SIMULINK 模型如图 3 所示。4 个单音信号频率为 0.4 kHz 单音的高次谐波。采样率通过零阶保持器设置为 26 kHz, FFT 采样点数分别取 64、128、256、512 时的仿真结果如图 4 所示。

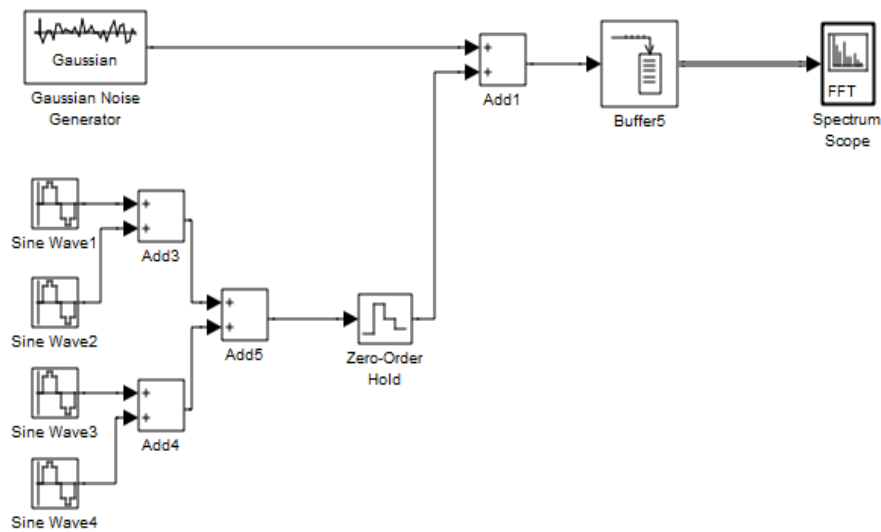


图3 基带信号检测采样仿真模型

Fig.3 Simulation model of based band signal sampling and detection

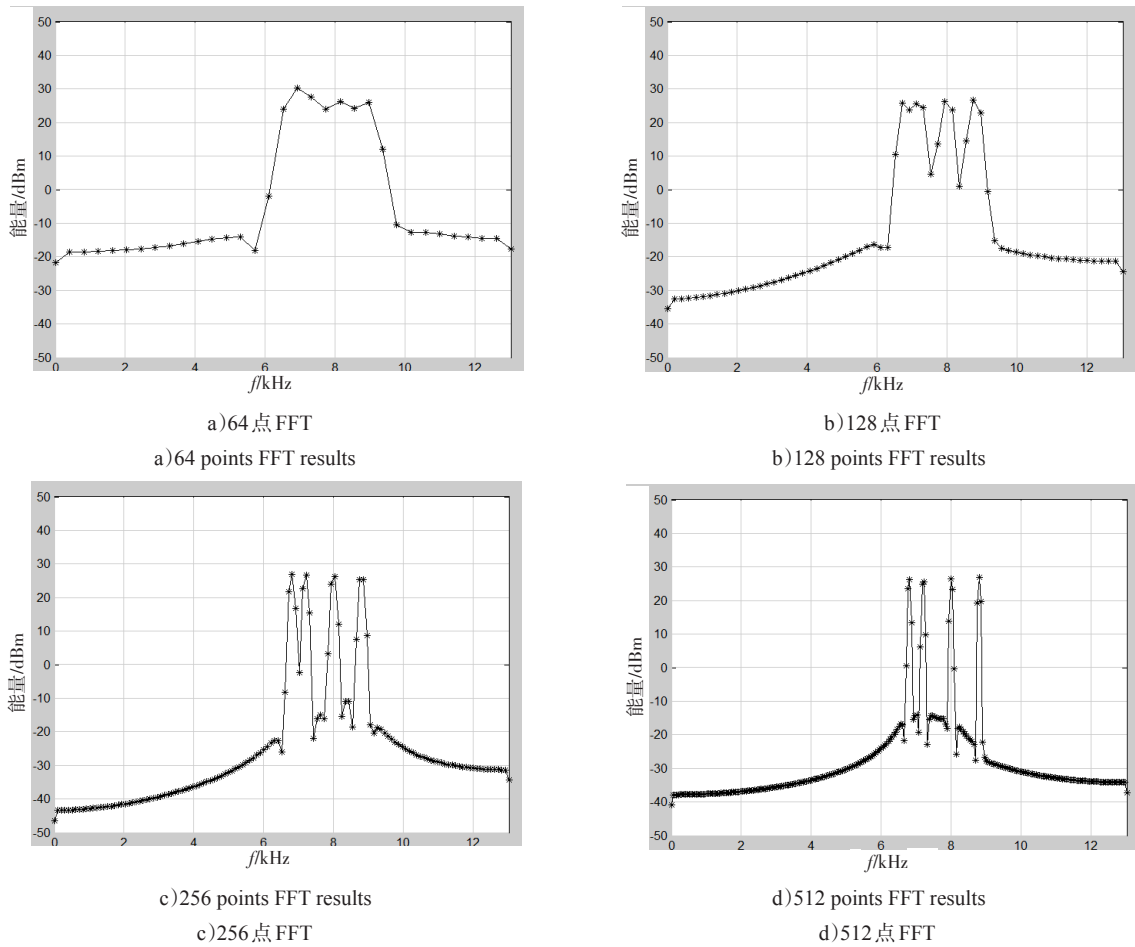
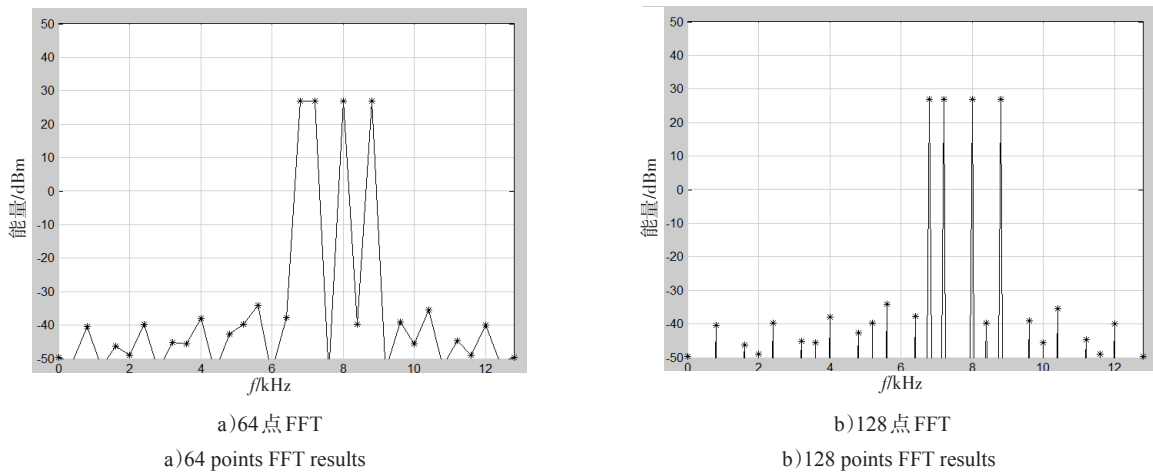


图4 采样率为26kHz时仿真结果

Fig.4 Sampling results of 26kHz sampling rate

取幅度大于 20 dBm 的点作为 FFT 分析后得到的单音成分检测结果。由图 4 可见,当采样点为 64 时,系统将不能正确检测出信号中的单音成分,采样点取 128 点时,问题仍存在,但随着采样点数的倍增,虽然能用近似的方法得到正确的结果,但误差并未消除。

根据本文给出的检测采样优化方法,采样率选择为 25.6 kHz,采样点数仍分别取 64、128、256、512,得到仿真结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出,在对信号进行 FFT 检测分析时,可以以相对较低的采样点数(64 点)正确分辨出信号中的多音组合。



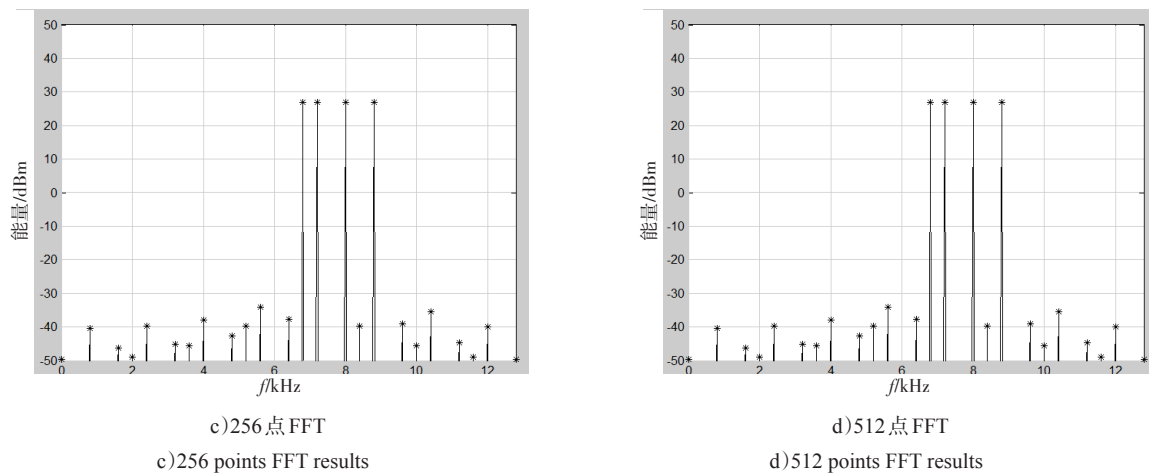


图5 采样率为 25.6 kHz 时仿真结果

Fig.5 Sampling results of 25.6 kHz sampling rate

### 2.2 载波同步解调后采样抽取检测仿真分析

在 2.1 节基带信号仿真的基础上,建立载波同步解调和采样抽取检测模型,如图 6 所示。仿真主要参数分别为:① 单音信号频率取满足式(6)条件的单音组合,分别为 6.4 kHz、6.8 kHz、7.2 kHz 与 12 kHz;

② FM 调制载波为 70 MHz,最大频偏为 24 kHz(调制系数为 2~3.75);③ 带通采样采样率为 16 MHz;④ CIC 抽取采样总计 625 倍;⑤ 经抽取后采样频率为  $16\text{ MHz}/625 = 25.6\text{ kHz}$ ,最小采样点数为  $25.6/0.4 = 64$  点。

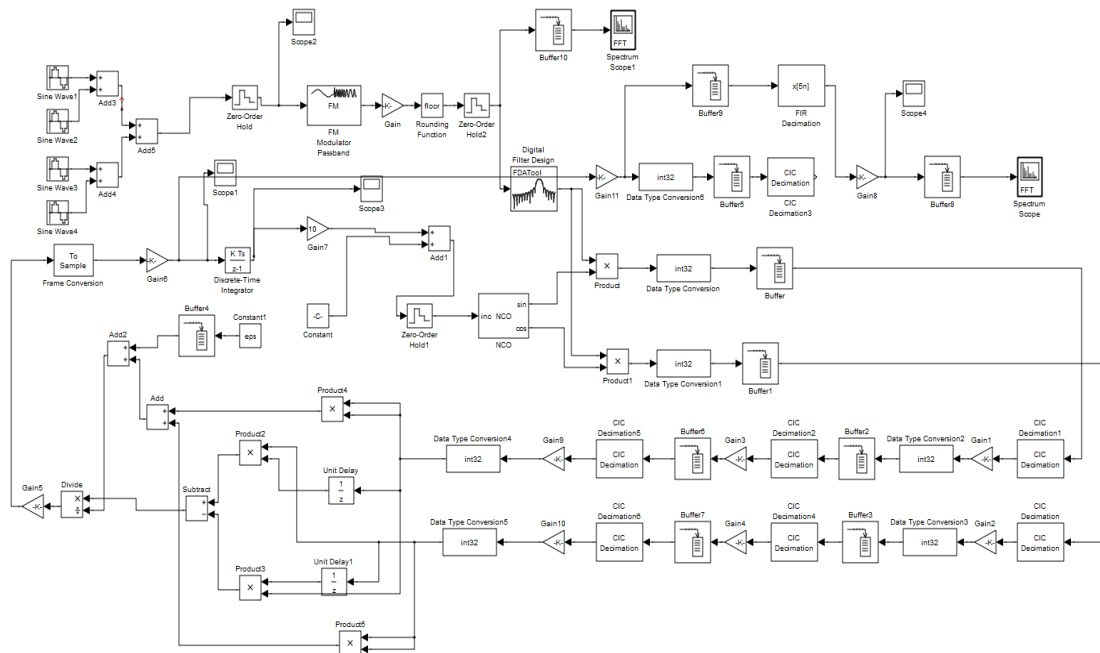


图6 载波同步解调和采样抽取检测仿真模型

Fig.6 Simulation model of carrier synchronous demodulation and sampling decimation

图 7 为载波无频偏时仿真结果。由图 7 可见,6.4 kHz、6.8 kHz、7.2 kHz 与 12 kHz 4 个频点的信号能量明显高于其他频点,通过对采样方案的优化,系统可以在低 FFT 采样点数下正确检测出多音信号中的单音成分。

图 8 为有 Gaussian 噪声及固定频偏时的仿真结果。在图 6 的仿真模型的基础上,对调制信号叠加 Gaussian 噪声和载波固定频偏。设定 Gaussian 噪声方差 40 V,信号幅度为 1 V(信噪比为 12 dB),固定频偏设定为 -130 kHz 和 +130 kHz。

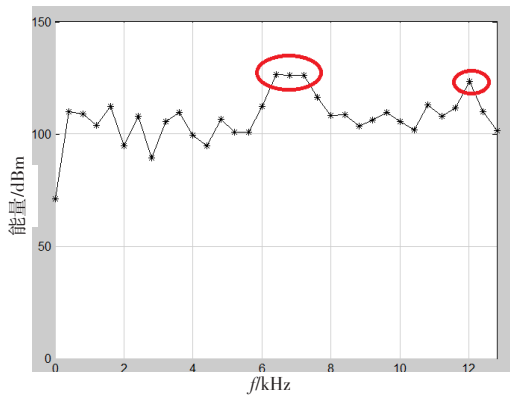
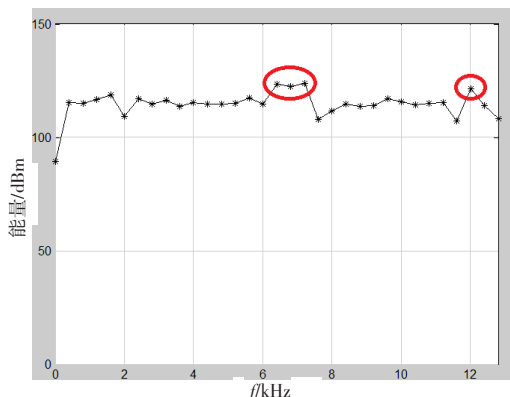


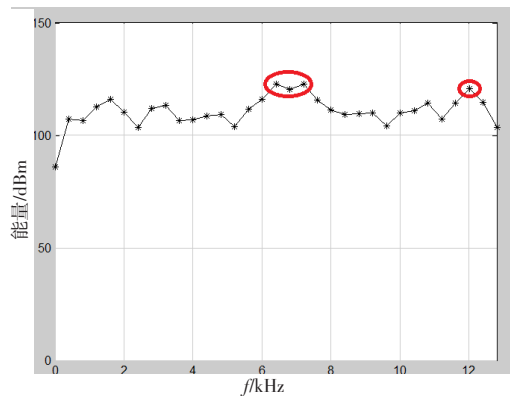
图7 载波无频偏时仿真结果

Fig.7 Simulation result without carrier frequency offset



a)固定频偏 -130 kHz

b)Fix carrier frequency offset is -130 kHz



b)固定频偏 +130 kHz

b)Fix carrier frequency offset is +130 kHz

图8 信噪比为 12 dB 时仿真结果

Fig.8 Simulation result when SNR is 12 dB

图9为有 Gaussian 噪声及不固定频偏时仿真结果。在图6的仿真模型的基础上,对调制信号叠加 Gaussian 噪声和载波不固定频偏。设定 Gaussian 噪声方差 40 V,信号幅度为 1 V (信噪比为 12 dB),频偏设定为 -130~+130 kHz,扫描速度为 5 MHz/s。

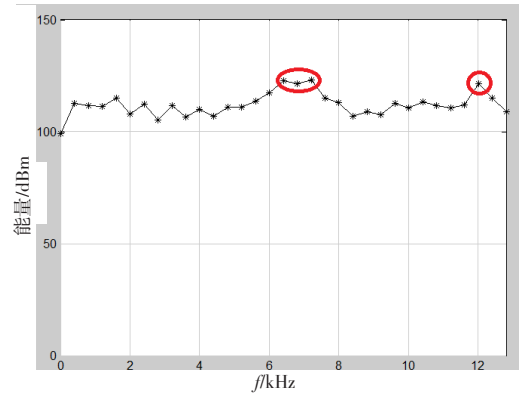


图9 信噪比 12 dB, -130 ~ 130 kHz 多普勒频偏时仿真结果

Fig.9 Simulation result when SNR is 12 dB and carrier frequency offset is variable in -130 ~ 130 kHz

由图8、9仿真结果可见,通过对采样方案的优化,在信噪比为 12 dB、固定频偏为 ±130 kHz 或多普勒频偏范围为 (-130~+130 kHz) 的情况下仍然可以实现单音频率成分的可靠检测。

### 3 结论

为实现低 FFT 采样点数下多音指令的正确检测,本文根据组成指令的单音信号的特点提出了一种主字母体制安控系统采样方案优化方法。分析和仿真实验表明,相对于先根据奈奎斯特采样定理先确定采样率,通过增加 FFT 采样点数的方法相比,优化后的采样方案可以在低 FFT 采样数下实现指令的准确检测,且便于 FPGA 工程实现,提高系统实时性能。

### 参考文献:

[1] 张昊,周军辉,吴松,等. 飞航武器遥测系统现状及发展趋势分析[J]. 飞航导弹,2017(11):80-84.  
ZHANG HAO, ZHOU JUNHUI, WU SONG, et al. Current situation and development trend of telemetry system for aerodynamic weapon[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2017(11):80-84. (in Chinese)

[2] 宋扬,霍建华,孙伟. 舰基遥测综合解调控制系统设计[J]. 计算机测量与控制,2017,25(11):99-102.  
SONG YANG, HUO JIANHUA, SUN WEI. Design of ship-based telemetry integrated demodulation control system[J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(11):99-102. (in Chinese)

[3] 倪春雷,邹铁军. 基于主字母技术的导弹安全控制指令调制体制的研究[J]. 战术导弹技术,2005(6):56-60.  
NI CHUNLEI, ZOU TIEJUN. Research on the modu

- lation system of missile safety control commands based on high alphabet technology[J]. Tactical Missile Technology, 2005(6):56-60. (in Chinese)
- [4] 陶德桂,刘关心. 基于北斗短报文通信的无人机安控系统[J]. 电光与控制, 2018, 25(6):98-101.  
TAO DEGUI, LIU GUANXIN. UAV safety control system based on beidou short-message communication[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(6):98-101. (in Chinese)
- [5] 袁静,胡昌华,徐瑞,等. 基于改进BDD算法的导弹安控系统故障树仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1):9-12  
YUAN JING, HU CHANGHUA, XU RUI, et al. Fault tree simulation analysis of missile safety control system based on improved BDD algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(1):9-12. (in Chinese)
- [6] 王刚,丁军辉,梁明. 靶弹安控系统的舵机故障诊断程序设计[J]. 战术导弹技术, 2011(1):105-108.  
WANG GANG, DING JUNHUI, LIANG MING. Program design for actuator fault diagnosis used in security control system of target missile[J]. Tactical Missile Technology, 2011(1):105-108. (in Chinese)
- [7] 周志久. 无人机飞行控制仿真系统研究[J]. 航天控制, 2010, 28(1):64-69.  
HOU ZHIJU, WEI MINFEN. Research on flight control simulation system of UAV[J]. Aerospace Control, 2010, 28(1):64-69. (in Chinese)
- [8] 吴岭. 新型主字母安控体制原理研究与性能分析[J]. 宇航学报, 2007, 28(6):1728-1731.  
WU LING. The principle study and performance analysis of a new safety telecomm and system based on high alphabet[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(6):1728-1731. (in Chinese)
- [9] 左增宏. 主字母体制原理及其在航天测控中的应用[J]. 遥测遥控, 2008, 29(1):9-13.  
ZUO ZENGHONG. High alphabet system basis and its implementation in range safety systems[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2008, 29(1):9-13. (in Chinese)
- [10] 岳新宇,张润生. 一种新的单音快速识别算法[J]. 无线电通信技术, 2016, 42(3):52-54.  
YUE XINYU, ZHANG RUNSHENG. A new and fast recognition algorithm for single tone[J]. Radio Communications Technology, 2016, 42(3):52-54. (in Chinese)
- [11] 徐杨. 调制系数在主字母体制中对误码率的影响[J]. 专题技术与工程应用, 2012, 42(9):54-56.  
XU YANG. BER affected by modulation index in high alphabet system[J]. Radio Engineering, 2012, 42(9):54-56. (in Chinese)
- [12] 左增宏,刘胜利,高京龙,等. 主字母体制符号同步方法研究[J]. 无线电工程, 2007, 37(5):26-29.  
ZUO ZENGHONG, LIU SHENGLI, GAO JINGLONG, et al. Symbol synchronization methods for high alphabet systems[J]. Radio Engineering, 2007, 37(5):26-29. (in Chinese)
- [13] 孙雪峰,王志有,宋锐,等. 新型航天遥测信号调制解调技术[J]. 测试技术学报, 2016, 30(1):34-39.  
SUN XUEFENG, WANG ZHIYOU, SONG RUI, et al. New modulation and demodulation techniques of spacecraft telemetry signal[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2016, 30(1):34-39. (in Chinese)
- [14] 章生平,郭晶晶,叶晖,等. 自适应遥测信道速率的分包遥测调度方案[J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(4):316-322.  
ZHANG SHENGPING, GUO JINGJING, YE HUI, et al. A packet telemetry scheduling method with an adaptive telemetry channel rate[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2016, 35(4):316-322. (in Chinese)
- [15] 徐杨. 预加重技术在主字母体制中的应用[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(1):66-69.  
XU YANG. Implementation of pre-emphasis in high alphabet systems[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(1):66-69. (in Chinese)
- [16] 成亚勇. 系统非线性对主字母安控性能影响分析[J]. 飞行器测控学报, 2016, 35(2):106-111.  
CHENG YAYONG. Impact of system nonlinearity on performance of high alphabet safety telecommand[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2016, 35(2):106-111. (in Chinese)
- [17] 李亮. 基于Simulink的软件无线电硬件协同仿真技术[D]. 成都:电子科技大学, 2013.  
LI LIANG. Simulink-based software radio hardware co-simulation technology[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)