

不同隐蔽通信管控策略下的任务性能分析

高鹏程

(中国电子科技集团公司第十研究所,四川 成都 610036)

摘要: 针对隐蔽通信的任务性能评估问题,首先提出隐蔽通信下的任务性能评估指标,然后比较了通断管控、功率管控以及功率和速率联合管控3种不同策略下的隐蔽通信任务性能,最后通过仿真验证了不同管控策略的效果。仿真结果表明,功率和速率联合管控策略的通信时长为通断管控策略的2.24倍,为功率管控策略的1.57倍,大大提高了隐蔽通信的可通时间,任务性能最佳。

关键词: 隐蔽通信; 管控策略; 任务性能

中图分类号: TN925

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.201198

中文引用格式: 高鹏程. 不同隐蔽通信管控策略下的任务性能分析[J]. 电子技术应用, 2021, 47(7): 64–68.

英文引用格式: Gao Pengcheng. Task performance analysis under different covert communication control strategies[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(7): 64–68.

Task performance analysis under different covert communication control strategies

Gao Pengcheng

(The 10th Research Institute of CETC, Chengdu 610036, China)

Abstract: To evaluate the task performance of covert communication, this paper firstly proposes the task performance evaluation index under covert communication, and the performance of covert communication under three different strategies of on-off control, power control and combined power and rate control are compared. Finally, the effects of different control strategies are verified through simulation. The simulation results show that the communication duration of the combined power and rate control strategy is 2.24 times that of the on-off control strategy and 1.57 times that of the power control strategy, which greatly improves the communication time of covert communication and the task performance is the best.

Key words: covert communication; control strategy; task performance

0 引言

目前飞行器上的全向通信系统为了保证自身的通信性能,一般以最大功率辐射,对自身辐射信号不必要的外泄缺乏充分考虑,造成飞行器平台在较远距离下被敌方侦察机截获,进而被定位攻击^[1-2]。因此,机载平台全向通信系统的低截获(Low Probability of Intercept, LPI)措施(即隐蔽通信措施)尤为关键^[3-5],一般隐蔽通信措施包括4类:(1)LPI波形设计^[6-8];(2)功率控制^[9-11];(3)天线调零^[12-13];(4)定向通信^[14-15]。对于全向通信系统而言,可采用LPI波形设计和功率控制来实现隐蔽通信。LPI波形是由通信系统波形设计实现,而功率控制则涉及通信系统的使用、管控。根据已有文献,目前隐蔽通信的研究主要侧重于实现方法和低截获效果的评估,如文献[7]评估了直接序列扩频信号的低截获性能,文献[9]提出了基于混沌粒子群优化的低截获编队通信方法,而少有评估隐蔽通信管控策略下的通信系统任务性能。本文主要针对机载全向通信系统在不同隐蔽通信管控策略下的任务性能进行分析评估。

1 隐蔽通信的任务性能

隐蔽通信是指通信在保证不被敌方无源探测系统截获的前提下,最大程度地维持其任务性能。通信的任务性能包括作用距离、通信速率、误码率、通信时长等。

不考虑大气、雨、雾等衰减和极化失配,通信链路传播公式为:

$$\frac{P_t G_t G_r}{(4\pi R_D/\lambda)^2 L_t L_r} = P_{minC} \quad (1)$$

转化为dB的形式,有:

$$P_t + G_t - L_t - 20\lg R_D - 20\lg f - 32.44 + G_r - L_r = P_{minC} \quad (2)$$

式中, P_t 为发射功率, G_t 为发射天线增益, G_r 为接收天线增益, R_D 为作用距离, λ 为工作波长, L_t 为发射损耗, L_r 为接收损耗, P_{minC} 表示通信接收机灵敏度, f 为工作频率。

通信接收机灵敏度和通信速率的关系为:

$$P_{minC} = N_F + k T_0 + 10 \lg R_b + \frac{E_b}{N_0} \quad (3)$$

式中, N_F 为噪声系数; k 是波耳兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K); T_0 为标准室温,一般取290 K; R_b 为通信速率; E_b 为每

比特码元能量, N_0 为噪声单边功率谱密度, 对于最小频移键控(Minimum Shift Keying, MSK)信号, 其误码率

$$P_e = 2P_{el}(1-P_{el}), P_{el} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right), \operatorname{erfc} \text{ 为互补误差函数。}$$

综上, 含通信速率、误码率、作用距离的通信链路传播公式为:

$$\begin{aligned} P_t + G_t - L_t - 20\lg R_D - 20\lg f - 32.44 + G_r - L_r \\ = N_F + kT_0 + 10\lg R_b + [\operatorname{erfc}^{-1}(1 - \sqrt{1 - 2P_e})]^2 \end{aligned} \quad (4)$$

对于全向通信系统, 不考虑大气、雨、雾等衰减及极化失配, 截获链路传播公式为:

$$P_t + G_d - L_t - 20\lg R_t - 20\lg f - 32.44 = P_{min} \quad (5)$$

式中, G_d 为截获接收机方向的发射天线增益, R_t 为截获距离, P_t 为发射功率, P_{min} 为截获接收机系统(含天线)灵敏度。

对于给定的敌方探测系统, 其与我方通信载机距离为 d , 限定我方通信载机不被截获, 有:

$$P_t < P_{min} + 20\lg d + 20\lg f + 32.44 - G_d + L_t \quad (6)$$

记 P_{ti} 为满足隐蔽通信要求的最大输出功率, 有 $P_{ti} = P_{min} + 20\lg d + 20\lg f + 32.44 - G_d + L_t$, 则隐蔽通信对功能传感器的发射功率要求为 $P_t < P_{ti}$ 。

同时, 为了满足通信速率、误码率、通信距离的要求, 发射功率必须满足 $P_t > P_{tc}$, 其中, P_{tc} 为满足通信要求的最小输出功率:

$$\begin{aligned} P_{tc} = N_F + kT_0 + 10\lg R_b + [\operatorname{erfc}^{-1}(1 - \sqrt{1 - 2P_e})]^2 + \\ 20\lg R_D + 20\lg f + 32.44 - G_r - G_t + L_r + L_t \end{aligned} \quad (7)$$

(1) 当 $P_{tc} \leq P_{ti}$ 时, 任务性能和隐蔽通信不存在冲突, 通信系统以发射功率 P_{ti} 进行辐射。

(2) 当 $P_{tc} > P_{ti}$ 时, 为了满足隐蔽通信要求, 通信系统的任务性能必须降级。按照任务性能丧失的严重程度, 有 3 种降级方式: ①降低通信速率; ②增加误码率; ③断网。

2 隐蔽通信管控策略下的任务性能分析

不同的隐蔽通信管控策略允许不同的任务性能降级, 因此隐蔽通信的任务性能与隐蔽通信管控策略的选择息息相关。本文分别比较了通断管控、功率管控以及功率和速率联合管控 3 种不同策略下的通任务性能。

2.1 通断管控策略下的任务性能分析

通断管控是指机载通信系统辐射信号有无的管控。“通”是指机载通信系统工作于正常收发或“非静默”的状态, “断”是指机载通信系统工作于只收不发或“静默”的状态。隐蔽通信下的通断管控是指对于给定的敌方侦察机截获灵敏度, 当通信载机与截获接收机的距离大于通信载机被敌方侦察机截获距离时, 使机载通信系统处于“通”的状态; 当通信载机与截获接收机的距离小于或等于通信载机被敌方侦察机截获距离时, 使机载通信系统处于“断”的状态。

通断管控策略如图 1 所示。

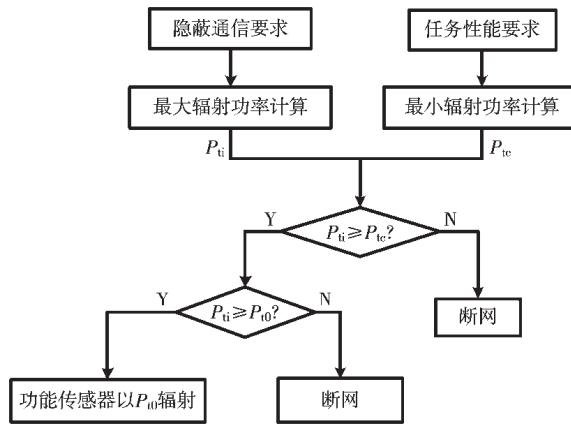


图 1 通断管控策略

其管控步骤如下:

- (1) 根据隐蔽通信要求, 如截获距离、截获接收机灵敏度, 计算功能传感器最大辐射功率 P_{ti} ;
- (2) 根据任务性能要求, 如通信距离、通信速率和误码率限制, 计算功能传感器最小辐射功率 P_{tc} ;
- (3) 若 $P_{ti} \geq P_{tc}$, 比较 P_{ti} 与功能传感器最大辐射功率 P_{t0} 的大小, 若 $P_{ti} \geq P_{t0}$, 此时功能传感器以 P_{t0} 辐射, 否则, 功能传感器断网;
- (4) 若 $P_{ti} < P_{tc}$, 功能传感器断网。

2.2 功率管控策略下的任务性能分析

功率管控是指机载通信系统辐射信号功率大小的管控。低截获性能优先下的功率管控是指根据敌方位置、灵敏度等参数, 调整我方通信系统辐射功率, 以保证我方通信系统不被敌方侦察系统截获; 辐射功率的降低会影响链路的通信质量, 导致误码率升高, 通信系统会实时监测通信链路的误码率, 当误码率超过事先设定的门限时, 断开通信链路。功率管控策略如图 2 所示。

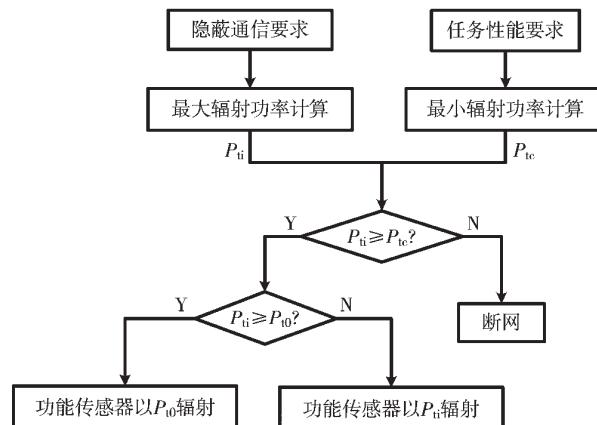


图 2 功率管控策略

其管控步骤如下:

- (1) 根据隐蔽通信要求, 如截获距离、截获接收机灵敏度, 计算功能传感器最大辐射功率 P_{ti} ;
- (2) 根据任务性能要求, 如通信距离、通信速率和误

码率限制,计算功能传感器最小辐射功率 P_{tc} ;

(3)若 $P_{ti} \geq P_{tc}$, 比较 P_{ti} 与功能传感器最大辐射功率 P_{t0} 的大小, 若 $P_{ti} \geq P_{t0}$, 此时功能传感器以 P_{t0} 辐射, 否则, 功能传感器以 P_{ti} 辐射;

(4)若 $P_{ti} < P_{tc}$, 功能传感器断网。

2.3 功率和速率联合管控策略下的任务性能分析

功率和速率联合管控是指对机载通信系统的辐射信号功率和通信速率的联合管控。低截获性能优先下的联合管控是指通信系统以不被截获的最大功率辐射, 初始状态通信速率为最高挡, 当误码率高于门限时, 降低一挡速率, 当通信速率为最低挡且误码率超过门限时断开通信链路。基于功率和速率的联合控制方案如图 3 所示。

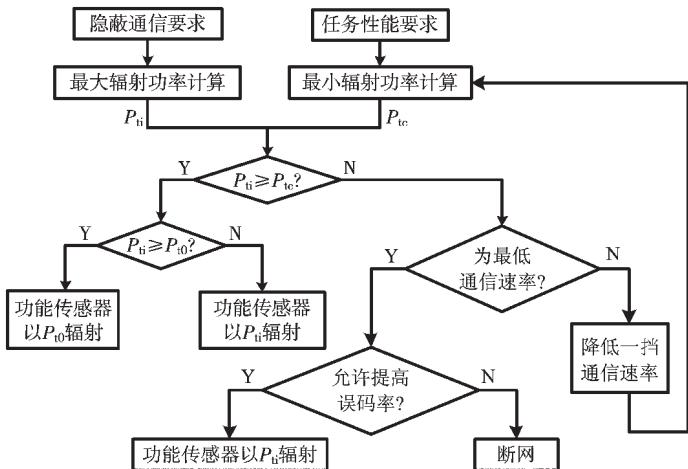


图 3 功率和速率的联合管控策略

其管控步骤如下:

(1)根据隐蔽通信要求, 如截获距离、截获接收机灵敏度, 计算功能传感器最大辐射功率 P_{ti} ;

(2)根据任务性能要求, 如通信距离、通信速率和误码率限制, 计算功能传感器最小辐射功率 P_{tc} ;

(3)若 $P_{ti} \geq P_{tc}$, 比较 P_{ti} 与功能传感器最大辐射功率 P_{t0} 的大小, 若 $P_{ti} \geq P_{t0}$, 此时功能传感器以 P_{t0} 辐射, 否则, 功能传感器以 P_{ti} 辐射;

(4)若 $P_{ti} < P_{tc}$, 判断当前通信速率是否为最低挡;

(5)若当前通信速率为最低档, 则判断可否允许提高通信误码率, 若允许, 则功能传感器以 P_{ti} 辐射, 否则, 关闭功能传感器;

(6)若当前通信速率不是最低挡, 则降低一挡通信速率, 重复步骤(2)~步骤(5)。

3 仿真验证

仿真场景如图 4 所示。



图 4 仿真场景

我机编队保持间距 400 km, 突前通信载机 1 与敌方侦察机初始间距 500 km, 相向飞行, 速度均为 1 马赫。在通信载机 1 与敌方侦察机间距 [500 km, 100 km] 的区间内, 分别仿真功能传感器做通断管控、功率管控和联合管控 3 种策略的情况。3 种策略下均保证我方通信载机不被截获, 以通信时长作为任务性能度量指标, 通信时间越长则任务性能越好。仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

参数	取值
发射功率 P_t/W	50
发射损耗 L_t/dB	2
发射天线增益 G_t/dBi	-4
接收损耗 L_r/dB	2
接收天线增益 G_r/dBi	-4
调制方式	MSK
通信速率/(kb/s)	100/50/25
通信误码率门限	10^{-5}
通信距离/km	400
截获接收机系统灵敏度/dBm	-80

不同隐蔽通信管控策略下的传感器状态变化如图 5~图 7 所示。

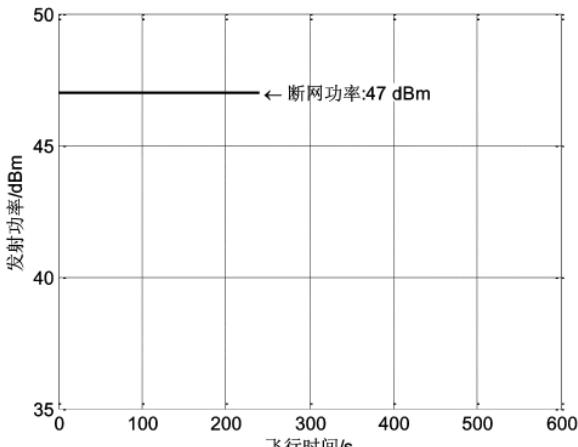


图 5 通断管控下的传感器状态变化

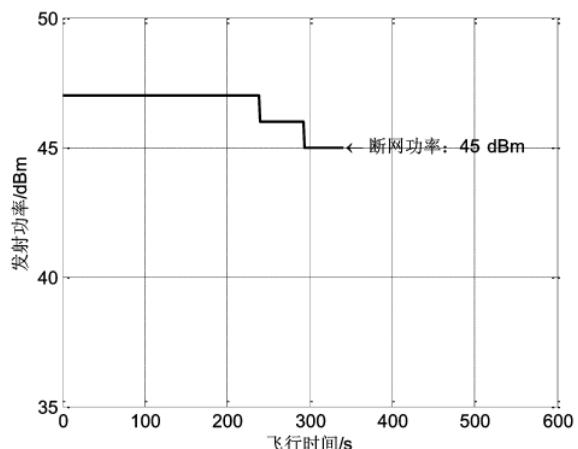


图 6 功率管控下的传感器状态变化

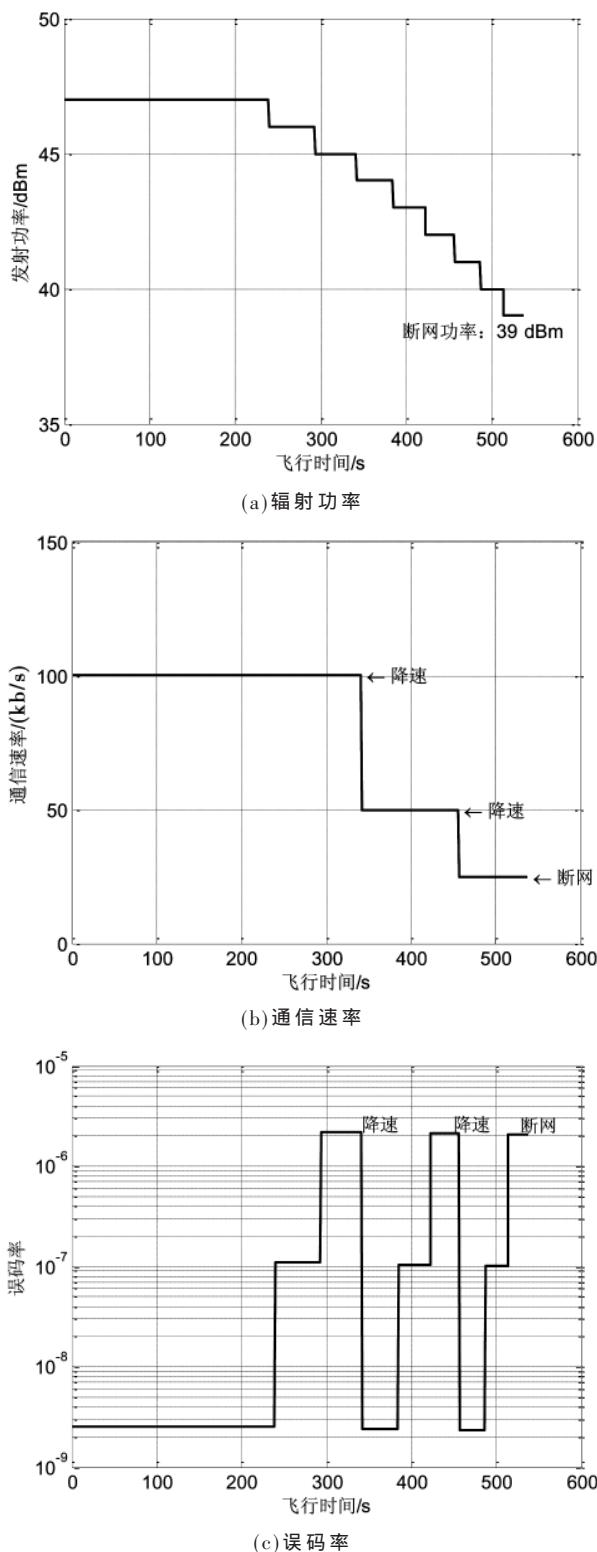


图 7 联合管控下的传感器状态变化

由图 5~图 7 可以看出,通断管控在飞行过程中传感器以最大功率/最高挡位速率辐射,保证飞行过程中的低可截获状态,在被截获前一个时间截断网;功率管控在飞行过程中,传感器以不被截获的最大功率辐射,通信速率固定为最高挡,当误码率超过门限时断开;功

率和速率联合管控在飞行过程中,传感器以不被截获的最大功率辐射,初始时刻通信速率为最高挡,当误码率高于门限时,降低一挡速率。

3 种管控策略均能保证传感器在考核区间内不被敌方无源探测系统截获,但 3 种策略下的通信时长不同,仿真结果如图 8 所示。

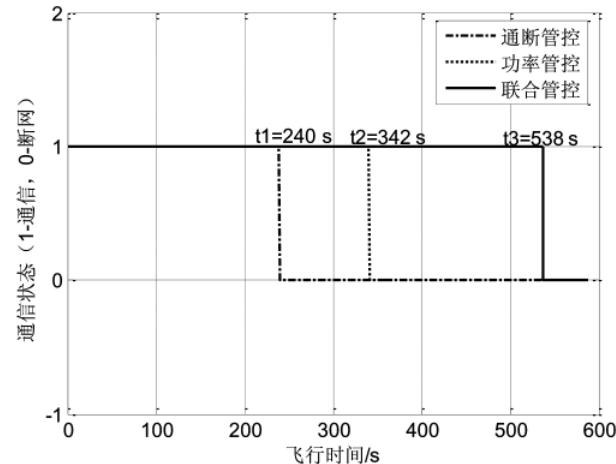


图 8 不同策略下的通信时长对比

由图 8 可以看出,通断管控策略的通信时长为 240 s,功率管控策略的通信时长为 342 s,功率和速率联合管控策略的通信时长为 538 s。功率和速率联合管控的通信时长最长,为通断管控策略的 2.24 倍,为功率管控策略的 1.57 倍,可以在保证不被敌方无源探测系统截获的前提下,通过先降低通信速率,再允许误码率增加,最后再断网,以任务性能逐步降低的方式,尽可能地维持通信,提高了通信时长。

4 结论

本文研究了机载全向通信系统在通断管控、功率管控、功率和速率联合管控 3 种管控策略下的任务性能,并针对典型作战场景进行了仿真,仿真结果表明功率和速率联合管控策略下的通信时间最长,任务性能最优。本文侧重于机载全向通信系统发射功率和通信速率的管控,下一步的工作重点为充分挖掘全向通信系统其他可管控参量,寻找最优的隐蔽通信管控策略。

参考文献

- [1] 桑建华,陈益邻.发展中的飞行器射频隐身技术[J].航空制造技术,2011(Z2):48~50.
- [2] LYNCHJR D.射频隐身导论[M].沈玉芳,译.西安:西北工业大学出版社,2009.
- [3] 熊健.隐蔽通信性能及措施分析[J].中国新通信,2012(9):73~77.
- [4] 王正海.战术数据链射频辐射特征控制技术[J].电讯技术,2014,54(5):668~673.
- [5] 朱银川,孙小冰,詹平,等.数据链系统抗截获、抗干扰方法研究[J].电讯技术,2007,42(2):75~78.

- [6] CHOI J, CHOE C, PARK D, et al. Practical LPI communication with noise-shaped signaling[C]. IEEE ICTC 2019, 2019: 332–337.

[7] 曾小东.直扩通信信号低截获性能分析[J].无线电工程, 2020, 50(11): 917–920.

[8] SHEN Y Y, WANG Y Q, YU X L, et al. Whole-region hybrid search algorithm for DSSS signal acquisition[J]. Wireless Personal Communications, 2017, 95(2): 1265–1284.

[9] 江波, 杜欣军, 杨宇晓. 基于混沌粒子群优化的低截获概率编队通信方法[J]. 计算机工程, 2017, 43(12): 93–97.

[10] 杨宇晓, 周建江, 徐川. 射频隐身数据链功率控制方法研究[J]. 现代雷达, 2013, 35(12): 80–84.

[11] 时晨光, 丁琳涛, 周建江. 基于 Stackelberg 博弈的有人机/无人机混合集群辐射功率控制算法[J]. 无人系统技术, 2020, 3(4): 29–41.

[12] 侯立志, 何晶, 傅玉鑫, 等. 自适应调零天线抗干扰性能影响因素研究[J]. 舰船电子工程, 2020, 40(1): 193–197.

[13] 曾浩, 方贝贝, 吉利霞, 等. 一种抗脉冲干扰的调零天线波束合成方法[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 27–32.

[14] 何召阳, 王谦喆, 祝寄徐, 等. 飞机高机动飞行双机通信性能优化研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(2): 119–122.

[15] 王明伟, 李立欣, 张会生, 等. 基于定向天线和最佳中继选择 AF 策略的协作通信系统[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(9): 87–93.

作者简介:

高鹏程(1990-),男,硕士,工程师,主要研究方向:航空电子、传感器管理。



扫码下载电子文档

(上接第 63 页)

表 2 资源消耗情况

资源名称	数量/个	总量/个	消耗占比/%
Slice Registers	165	407 600	<1
Slice LUTs	164	203 800	<1
Occupied Slices	62	50 950	<1
RAMB36E1/FIFO36E1s	2	445	<1
RAMB18E1/FIFO18E1s	1	890	<1
DSP48E1s	0	840	0

4 结论

本文介绍了一种基于 LUT 查表法和异或运算的滤波器设计方法,这种方法能有效降低 FPGA 资源消耗;同时介绍了一种特殊的滤波器系数计算方法,能将积分器和滤波器合二为一。采用以上两种设计方法制作的高斯低通滤波器能支持任意码率切换,对于设计通用型 GMSK 调制器具有重要意义。本文中对于设计方法进行了实现和仿真,并对具体的 FPGA 资源消耗情况进行分析,其设计模块单元已经在航天某院某遥测系统中获得了应用,使用效果良好,复用性强。

参考文献

- [1] 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.
 - [2] 李峰.一种 GMSK 调制器的简化设计[J].现代导航,2015(2):138–143.
 - [3] 游莎莎,刘胜利,罗雷刚,等.GMSK 调制技术及其在遥测中的应用分析[J].无线工程施工,2011,41(12):41–43.
 - [4] 樊宏伦.基于 FPGA 的 GMSK 调制器的设计实现[J].哈尔滨商业大学学报(自然科学版),2014,30(3):361–364,373.
 - [5] 赵伟,徐海川,张兰.GMSK 调制的两点注入算法实现[J].现代电子技术,2012,35(15):76–78.

- [6] 周三文, 卢满宏, 黄建国. 数字可变符号率调制器设计[J]. 遥测遥控, 2013, 34(3): 39–42.
 - [7] 白昊, 任泽宇. 一种改进的 GMSK 全数字正交调制算法[J]. 火控雷达技术, 2016, 45(3): 38–42.
 - [8] 万伟程, 李艳华, 周三文. 任意采样率变换数字重构滤波器设计[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(4): 360–365.
 - [9] 陈志堂, 唐博, 秦开宇. 新型 GMSK 调制实现算法研究与设计[J]. 电子测量技术, 2010, 33(11): 41–45.
 - [10] DEVI M D. Ber performance of GMSK using MATLAB[J]. International Journal of Advanced Research in Computer Engineering and Technology, 2013, 2(4): 1389–1392.
 - [11] 赵彦惠. 基于相位累加实现 GMSK 调制的技术分析[J]. 无线电工程, 2013, 43(3): 20–23.
 - [12] 唐智灵, 李铖, 李思敏. 任意信息速率的 GMSK 信号调制解调方法[J]. 电讯技术, 2019, 59(11): 1299–1305.
 - [13] 韩喆, 陈赵, 戚磊. 基于开源软件无线电的 GMSK 调制器设计[J]. 自动化应用, 2015(12): 26–27.
 - [14] 陈敬乔, 尚春杰, 王力男, 等. 一种新的 GMSK 调制器的设计与实现方法[J]. 无线电工程, 2014, 44(7): 79–82.
 - [15] 李汉桥, 陈海腾, 姚亚峰. GMSK 调制器电路设计与 FPGA 实现[J]. 电讯技术, 2011, 51(1): 31–34.
 - [16] 钱者凤, 刘明, 杨文举. 基于数字正交方式实现的一种 GMSK 调制[J]. 信息技术, 2014(11): 171–174.

作者简介

王仁智(1984-),男,硕士,工程师,主要研究方向:遥测遥控 单脉冲跟踪接收 无线通信 信号处理

孔雅(1988-),男,硕士,工程师,主要研究方向:无线通信、自组网通信、遥测遥控。

张春泽(1978-),男,硕士,研究员,主要研究方向:信息传输与处理、卫星导航与应用。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所