

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.04.024

基于标签伯努利滤波的无人机空中航摄视频传输方法

王泽, 姜潜基, 朱伟

(西安明德理工学院, 陕西 西安 710124)

摘要:在传输航摄视频时,相邻帧之间的冗余数据会提高传输错误率,影响视频传输的质量。为缓解这一问题,提出基于标签伯努利滤波的无人机空中航摄视频传输方法。根据无人机的飞行参数,计算航摄时所拍摄视频图像在相邻帧之间的重复区域,从而去除航摄视频中的重复帧。在失真代价约束下,确定压缩参数,以此对去除重复帧后的航摄视频进行压缩编码处理。引入标签伯努利滤波的方法,在无人机的可传输信道中选择出状态最优的信道,从而将压缩编码后的视频数据传输至接收端。实验结果表明:视频传输结果的误码率均值为 0.056%,峰值信噪比均值为 63.2 dB,视频传输质量较高,具有良好的实践应用前景。

关键词:视频传输;无人机信息传输;标签伯努利滤波;无人机通信;空中航摄视频;远程视频传输

中图分类号:TN929 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)04-0126-04

UAV Aerial Photography Video Transmission Method Based on Labeled Bernoulli Filter

Wang Ze, Jiang Qianji, Zhu Wei

(Xi'an Mingde Institute of Technology, Xi'an 710124, China)

Abstract: During the transmission of aerial photography video, redundant data between adjacent frames can increase the transmission error rate and affect video transmission quality. To alleviate this problem, this study proposes a UAV aerial photography video transmission method based on the labeled Bernoulli filter. Based on the UAV's flight parameters, the overlapping area between adjacent frames of the captured video images, thereby removing redundant frames from the aerial video. Under distortion cost constraints, compression parameters are determined to compress and encode the aerial video after redundant frame removal. The labeled Bernoulli filter method is introduced to select the channel with the optimal state among the UAV's available transmission channels, thereby transmitting the compressed and encoded video data to the receiving end. The experimental results show that the average bit error rate of the video transmission results of this method is 0.000 56, and the average peak signal-to-noise ratio is 63.2 dB, indicating high video transmission quality and promising practical application prospects.

Keywords: video transmission; UAV information transmission; labeled Bernoulli filter; UAV communication; aerial photography video; remote video transmission

0 引言

无人机高清摄像设备在环保监测、影视制作等多个领域中得到了广泛应用,在实际应用场景中,对无人机所拍摄的空中视频图像要求较高。为了实现实时图像拍摄和高质量的视频传输,对无人机在航摄过程中的视频传输方法展开研究^[1-2]。

卢为党等^[3]通过设计中继系统,在智能反射面辅助条件下,建立远程信息传输的非凸优化问题。通过泰勒展开求解,实现无人机信息的远程

传输。该方法能够解决传输信道被遮挡的问题。但智能反射面通过调整反射单元的相位来改变入射信号的传播方向;如果相移配置不准确会导致信息失真和衰减现象的出现,影响视频传输质量。张涛等^[4]根据无人机的实时飞行轨迹,调整出理想的相位参数。结合双深度 Q 网络,对信息传输过程进行能量感知,以此优化信息传输策略,提高信息传输的效率。但该方法为提高传输效率,对视频数据过度压缩,导致视频出现模糊、失真等问题。张宇明等^[5]以信息年龄为约束建立信息传输的优先级机制,并生成相应的信息传输虚拟队列。

基金项目:陕西省教育科学“十四五”规划课题项目(SGH22Y1738);西安明德理工学院科研课题项目(2023MDE04)

第一作者简介:王泽(1989—),男,陕西蒲城人,高级实验师,硕士,研究方向为机械、无人机应用技术,13468975171@163.com。

通信作者简介:朱伟(1986—),男,河南商丘人,副教授,硕士,研究方向为无人机应用技术,annhuzhuwei@163.com。

在 Lyapunov 优化理论下,对信息传输过程进行随机优化求解,实现信息的顺序传输。该方法能够保证信息传输的时效性。但实际应用中受到多种约束条件的限制,使得优化问题难以求解,难以保证视频的质量。

为解决上述问题,本研究提出基于标签伯努利滤波的无人机空中航摄视频传输方法。

1 无人机空中航摄视频传输方法设计

1.1 去除无人机运动下的视频重复帧

无人机通过安装机载摄像机来实现空中航摄。因无人机飞行速度较快,为了使传输的视频能够达到更高的压缩比和视频图像质量,本研究设计了基于无人机运动估计的视频压缩步骤。

根据无人机的飞行参数,确定空中航摄的视频拍摄范围 η ,如式(1)所示^[6]

$$\eta = 2H^2 \left(\tan \frac{\alpha}{2} \right) \quad (1)$$

式中: H 为空中高度; α 为视场角。

将较短时间内无人机飞行过程视为直线运动状态,并且在垂直方向上不发生运动。在此飞行状态下,计算出航摄时所拍摄视频图像在相邻帧之间的重复区域 Δs

$$\Delta s = \left[L - \eta \left(\frac{v \cdot t}{d} \right) \right] \cdot H \quad (2)$$

式中: L 为拍摄长度; v 为无人机的飞行速度; t 为时间; d 为视频图像的分辨率。无人机的空中航摄视频的相邻帧之间将存在一定的图像区域堆叠情况^[7]。基于视频帧相关性,通过连接较短时间内航摄视频的首尾帧,去除中间段的重复帧,降低视频传输的工作量。

1.2 航摄视频的压缩编码

处理重复帧后,本研究对处理后的视频数据信息进行了压缩编码处理,降低对无人机传输带宽的需求,保障航摄视频的传输效率^[8-9]。

通过建立无人机空中运动参数,确定航摄视频帧序列压缩的率失真代价约束,如式(3)、式(4)所示^[10]

$$v = \frac{1}{z} (v_p - (v_p^T k) \tilde{m}) \quad (3)$$

$$\beta = D + \lambda R (v^w - \Delta s) \quad (4)$$

式中: z 为空中航摄的视频深度; v_p 为无人机飞行过程的三维速度场; k 为一个指向深度的单位向量; $\tilde{m}$ 为视频图像在三维速度场中的对应点; β 为

率失真代价约束; D 为当前视频压缩的失真; λ 为拉格朗日因子; R 为码率; w 为加权因子。

在该约束下,逼近最小率失真代价约束值,得到视频压缩的最优压缩参数^[11]。由此对无人机的空中航摄视频进行去除重复帧的压缩处理,如式(5)所示

$$L(t_1, t_2) = \min \beta \sum_{i=1}^n (x_{t_1} + x_{t_2} - b)^2 \quad (5)$$

式中: L 为航摄视频压缩文件; t_1 和 t_2 分别为压缩的起始时间和终止时间; x_{t_1} 和 x_{t_2} 分别为相应时间的视频帧; i 为航摄视频帧的序列; n 为压缩过程包含的视频帧数量; b 为虚拟参考帧。

在此基础上,建立视频压缩编码的分层框架,如图1所示。

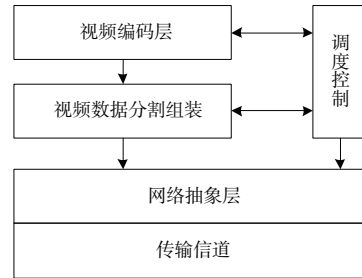


图1 视频压缩编码分层架构

本研究将压缩视频文件的每一帧均划分为色度块和亮度块,以此作为一个编码单元输入到无人机系统的视频编码层中^[12]。通过分片处理,在网络抽象层(NAL)中定义视频的压缩编码结构,如图2所示^[13-14]。

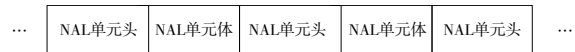


图2 视频压缩编码的码流单元组成

根据图2的结构,将压缩后的视频编码为带宽需求较低的格式。

1.3 基于标签伯努利滤波的最优信道选择传输

在上述步骤的处理下,得到多时间段的航摄视频压缩编码文件。为实现压缩编码文件的高质量传输的目的,本研究将无人机的通信链路中每个传输信道对应一个伯努利元组,生成标签伯努利集合^[15]。通过预测更新的滤波处理,选择出最优的信道,以此对压缩编码的航摄视频信息进行传输^[16-17]。

建立无人机信息传输信道的标签伯努利集合 S ,如式(6)所示^[18-20]。

$$S = \{r_j, p_j, l_j\}_{j=1}^J \quad (6)$$

式中: J 为无人机当前可接入的传输信道总数; j 为信道索引序号, 用于逐一标识不同的传输信道; r_j 为第 j 个信道对应伯努利元组的存在概率, 即该信道处于有效可传输状态的概率; p_j 为第 j 个信道状态对应的概率密度函数, 用于刻画信道传输性能的分布规律; l_j 为第 j 个信道的专属标签, 是标签伯努利滤波的核心标识, 用于在滤波迭代过程中区分不同信道的状态分量。

对该集合进行初始化处理, 并预测传输信道伯努利元组在集合中的先验分布情况, 得到信道状态的多目标概率分布。再量化出集合内每个压缩视频的先验分布。基于此, 选择出状态最优的传输信道 $\rho(n)^{[21]}$ 。目标函数如式(7)所示

$$P = (1 - r_0) \times \delta_\phi(S) + \sum_{j=1}^J r_j \times p_j \times \delta_{l_j}(S) \quad (7)$$

式中: P 表示预测步骤后得到的信道状态先验概率分布; $\delta_\phi(S)$ 为空标签指示函数, 当标签集合为空(无有效信道)时取值为 1, 否则为 0; r_0 为无有效信道的概率; $\delta_{l_j}(S)$ 为标签匹配指示函数, 当标签集合 S 中包含第 j 个信道的标签 l_j 时取值为 1, 否则为 0。

考虑到无人机的传输信道在实际应用中, 其状态不断变化。因此, 本研究通过对伯努利元组的状态进行滤波更新^[22], 以此确保寻优的传输信道为当前最优。这一过程如式(8)所示

$$F(j) = r_j \times C_j \quad (8)$$

式中: $F(j)$ 为第 j 个传输信道的综合质量目标函数, 用于量化评价信道的传输能力; C_j 为第 j 个信道的理论传输容量, 由信道带宽、信噪比等状态参数计算得到。

将滤波更新后参数重新代入到信道状态的多目标概率分布的表达式中, 并在定义的目标函数下, 对压缩编码后的空中航摄视频进行最优信道的传输, 如式(9)所示^[23-24]

$$\psi_j(x_i) = \min \rho(p(j) | x_i)^\kappa \quad (9)$$

式中: $\psi_j(x_i)$ 为压缩编码视频在最优信道中的传输; κ 为泊松分布。

2 应用实验

2.1 测试设备选型

为了检验本文方法的实践应用需求, 本次实验选用 D690S 型号无人机搭载 MS600 Pro 型号的

摄像设备作为实验对象。该无人机能够自主规划飞行路径, 实现长时间段的续航飞行。摄像设备体型小巧, 对无人机的飞行过程影响较小, 搭载完成后对空中航摄视频进行传输测试。

2.2 实验场景

根据无人机的飞行管制要求, 本次实验在某可飞行的区域进行空中航摄, 并对所拍摄的视频数据进行传输。本次实验的测试场景如图 3 所示。



图 3 某帧空中航摄视频

基于该实验场景, 开展本次无人机空中航摄视频传输的应用实验。

2.3 空中航摄视频传输算例

在选定的实验场景中, 利用搭载的无人机空中航摄设备获取本次实验中的航摄视频数据信息。在此基础上, 以某一时段内的空中航摄视频为传输对象, 对本文方法进行可行性测试。

本文方法对无人机所拍摄的视频进行了重复帧的去除处理。在不同的视频大小中, 在去除了重复帧后的视频压缩后编码过程所需的时间均有着显著的降低。本文方法能够大幅度减小视频数据的大小, 有效降低压缩编码过程的工作量。

经过压缩编码后, 本文方法在标签伯努利滤波的预测更新下, 选择出最优信道对空中航摄视频数据进行了传输。在相同的环境下对本文方法、文献[1]、文献[2]、文献[3]的无人机和参数方法进行传输测试, 在接收端对传输的视频数据进行解码, 得到相应的传输结果, 如图 4 所示。

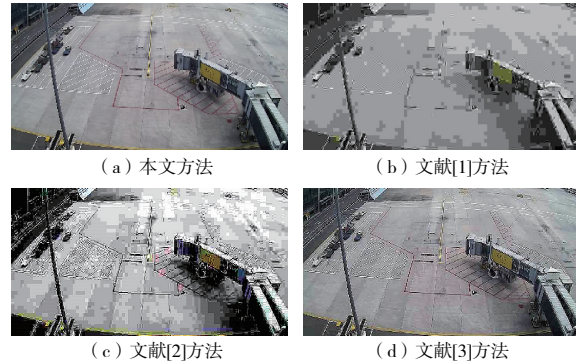


图 4 各方法传输结果对比

从图4可以看出,本文方法传输得到的视频结果明显有着更高的质量,且清晰度和对比度等参数均与原始的视频数据相差较小。而其他方法的传输结果则出现了不同程度的失真,视频质量显著下降。

2.4 性能分析

为进一步检验本文方法的实践应用性能,本次实验从误码率和峰值信噪比两个维度对各方法的视频传输质量进行了多实验轮次的对比分析。

经过结果统计,分别得到如图5、图6所示的视频传输对比结果。

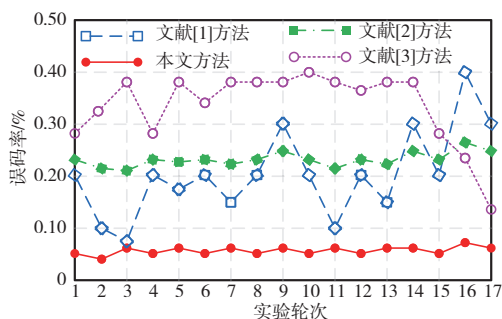


图5 无人机视频传输的误码率结果对比

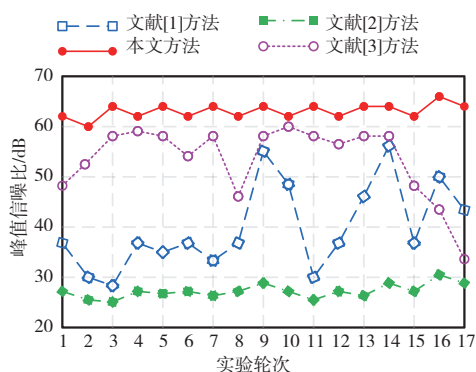


图6 无人机视频传输的峰值信噪比结果对比

由图5—图6可以看出,本文方法在多个实验轮次的测试中,表现出了更低的误码率和更高的峰值信噪比,均值分别为0.056%和63.2 dB,它有着较高的视频传输质量,失真程度较小。这一优势主要得益于本文方法有效地去除了视频数据中的重复帧,减少了数据冗余,从而降低了数据误码的可能性。同时,通过选择出了最优的传输信道,使得视频数据能够稳定地传输,减少了因网络拥塞导致的信号失真问题的发生,有效提高了视频的峰值信噪比。

3 结语

本研究设计了基于标签伯努利滤波的无人机空中航摄视频传输方法。该方法能够有效提高视

频传输的整体质量,使得接收端能够解码出与原始视频差距较小的视频数据,得到更加准确的视频信息。本文方法的应用,能够为地理测绘等多个领域提供有效的数据支持,从而显著提高无人机技术的实践应用水平。

参考文献:

- [1] 肖霄. 无人机航拍在新闻摄影中的应用研究[J]. 旅游与摄影, 2022(19): 161-163.
- [2] 葛鹏. 无人机倾斜摄影技术在矿山测绘中的应用[J]. 世界有色金属, 2023(23): 124-126.
- [3] 卢为党, 曹明锋, 高原, 等. 基于智能反射面辅助的无人机中继系统安全通信方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2273-2280.
- [4] 张涛, 张迁, 朱颖雯, 等. 基于能量感知的智能反射面辅助无人机时效数据收集策略[J]. 电子与信息学报, 2025, 47(2): 427-438.
- [5] 张宇明, 徐连明, 印思源, 等. 面向信息年龄的应急无人机网络低能耗信息采集和传输调度机制[J]. 通信学报, 2023, 44(7): 1-13.
- [6] 陈万里. 基于毫米波通信技术的超高清视频传输方法研究[J]. 激光杂志, 2024, 45(5): 170-175.
- [7] 王超, 马驰, 刘荣, 等. 基于NBVTH算法的军用窄带信道视频传输研究[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(1): 139-143, 150.
- [8] 刘璐宁. 面向高清视频传输的图像通信中多模态编码技术研究[实现][J]. 无线互联科技, 2025, 22(8): 6-9.
- [9] 张松刚, 高峰, 杨富磊, 等. 基于压缩算法的无人机视频压缩的研究[J]. 集成电路应用, 2019, 36(4): 39-40.
- [10] 张盛峰, 肖傲, 黄胜. 基于率失真代价的SCC帧间快速算法[J]. 计算机工程, 2019, 45(8): 236-240.
- [11] 郭红伟, 朱策, 刘宇洋. 视频编码率失真优化技术研究综述[J]. 电子学报, 2020, 48(5): 1018-1029.
- [12] 公衍超, 王子琳, 杨楷芳, 等. 色度域亮度域信息融合的监控视频重压缩取证[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(5): 46-55.
- [13] 郭强亮, 李辉, 闫晓宇, 等. 面向铁路5G-R宽带集群通信的视频传输控制方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(5): 2026-2035.
- [14] 杨吉花, 杨华, 贾维丁. 双路信道视频传输无损失真压缩算法仿真[J]. 计算机仿真, 2023, 40(11): 181-184, 397.
- [15] 蒋凌云, 杨金龙. 检测优化的标签多伯努利视频多目标跟踪算法[J]. 计算机科学与探索, 2023, 17(6): 1343-1358.
- [16] 罗雪. 基于深度学习的视频编码技术研究[J]. 信息与电脑(理论版), 2022, 34(23): 194-196.

(下转第138页)

在表2中可以看出,复合载荷条件为拉伸-扭转-弯曲组合时,本文方法的预测总损伤量为0.952,机器学习方法的预测总损伤量为0.900,损伤力学方法的预测总损伤量为0.880,实验总损伤量为0.923,本文方法的误差率为3.05%,机器学习方法的误差率为-2.56%,损伤力学方法的误差率为-4.89%;复合载荷条件为扭转-弯曲(高频率)-无拉伸组合时,本文方法的预测总损伤量为1.050,机器学习方法的预测总损伤量为1.000,损伤力学方法的预测总损伤量为0.950,实验总损伤量为1.018,本文方法的误差率为3.05%,机器学习方法的误差率为-1.80%,损伤力学方法的误差率为-7.16%;复合载荷条件为拉伸-弯曲(大变形)-无扭转组合时,本文方法的预测总损伤量为0.920,机器学习方法的预测总损伤量为0.880,损伤力学方法的预测总损伤量为0.840,实验总损伤量为0.895,本文方法的误差率为2.72%,机器学习方法的误差率为-1.70%,损伤力学方法的误差率为-6.55%;上述结果可知,本文方法的误差率最低。总体分析可知,在所有3种复合载荷条件下,本文方法预测的损伤量与实验测得的损伤量之间的误差率均在3%左右的可接受范围内,表明本文方法能够较为准确地预测航空发动机转子在复合载荷作用下的疲劳损伤情况。机器学习方法在预测损伤量时,其预测值普遍略低于实验值,但误差率相对较小,表明机器学习方法虽然具有一定的预测能力,但在本实验中的预测精度略低于本文方法。损伤力学方法在预测损伤量时,其预测值普遍明显低于实验值,误差率相对较大,表明在本实验的条件下,损伤力学方法的预测精度较低,无法准确反映航空发动机转子在复合载荷作用下的疲劳损伤情况。

3 结语

本文提出一种航空发动机转子疲劳寿命自动预测方法,并对IN718高温合金转子进行了系统的疲劳寿命预测的实验,结果表明预测寿命与实验寿命之间的相对误差均小于10%。在设置3种不同的复合载荷条件下,本文方法预测的损伤量与实验测得的损伤量之间的误差率均在3%左右,这一结果进一步验证了本文方法在复杂工况下的预测能力。

参考文献:

- [1] 刘建勋,翟旭升,谢岩甫,等. 基于状态辨识的航空发动机转子叶片剩余寿命模型[J]. 燃气涡轮试验与研究,2022,35(1):1-5.
- [2] 于磊,钟易成,李丽. 航空发动机转子动力学计算软件开发[J]. 机械制造与自动化,2023,52(4):128-131,143.
- [3] 付悍巍,张绍田. 航空发动机轴承钢滚动接触疲劳模拟及寿命预测[J]. 航空材料学报,2024,44(5):129-138.
- [4] 石炜,钱泓江,黄志勇,等. 基于机器学习的TC17合金超高周疲劳寿命预测[J]. 燃气涡轮试验与研究,2024,37(1):49-54.
- [5] 崔宝龙,张宏建,温卫东,等. 钛合金燕尾榫高温低周微动疲劳寿命预测[J]. 航空发动机,2022,48(4):88-92.
- [6] 洪海铭,詹志新,王佳莹. 基于损伤力学的增材制造金属材料疲劳寿命预测[J]. 北京航空航天大学学报,2022,48(6):950-956.
- [7] 史昱昆,王恭义,程凯,等. 一种采用遗传算法优化Chaboche模型的转子轮盘疲劳寿命预测方法[J]. 化工机械,2022,49(2):183-189,288.
- [8] 许鑫,刘国东. 发动机主轴疲劳寿命有限元预测方法仿真[J]. 计算机仿真,2023,40(5):187-191.
- [9] 郑万波,李磊. 移动边缘计算下矿山安全监控视频数据流自适应传输[J]. 现代电子技术,2024,47(2):74-78.
- [10] 王素,王嘉澳,单大国. 视频系统中运动目标检测与跟踪分析[J]. 广东公安科技,2022,30(1):39-42.
- [11] 万诗晴,仲伟志,何艺,等. 基于深度强化学习的可重构智能超表面辅助无人机通信联合波束成形与轨迹优化[J]. 电波科学学报,2024,39(4):722-731.
- [12] 李业,陈东虎,胡英东. 广域环境下的高能效无人机辅助通信方法研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版),2025,45(1):40-48.
- [13] 陈红梅,王海锋,叶文,等. 基于标签伯努利滤波技术的多机器人随机组网协同导航[J]. 仪器仪表学报,2024,45(7):165-175.
- [14] 郑成渝,夏靖雯,陈路遥,等. 基于多MEC协作的移动VR视频缓存和传输网络架构[J]. 电子科技大学学报,2023,52(5):765-772.
- [15] 朱志强,徐朝农,朱东辉. 多基站无线非正交多址接入的平滑视频流传输算法[J]. 计算机工程,2024,50(5):313-322.
- [16] 卢毛毛,刘春辉,董赞亮. 面向区域覆盖的多无人机动态通信资源分配方法[J]. 北京航空航天大学学报,2024,50(9):2939-2950.