



无人艇载雷达视频无线传输技术研究

摘要

雷达视频数据量大,更新频率高,传输带宽占用量大.无人艇(USV)岸艇数据传输带宽有限,传输信息种类多、数量大.在无人艇使用过程中,雷达视频是岸基操作人员安全航行保障、交战对象搜索确认等不可或缺的支持信息,然而岸艇数据互通带宽资源的紧缺和雷达视频的大信息传输需求之间的矛盾必然存在.本文根据雷达探测成像原理,对雷达视频进行数字化表示,经压缩、数据传输和复原显示,实现无人艇岸基控制站对艇载雷达视频的还原显示.该技术在某型USV控制系统中的应用结果表明:视频压缩比高、处理时延低、视频还原完整、容错性好.

关键词

无人艇;雷达视频;数字化;视频压缩;视频还原显示

中图分类号 TN957;E925

文献标志码 A

收稿日期 2020-04-05

资助项目 国防科技创新特区项目(19-163-11-ZT-002-003-01);装备预研船舶重工联合基金重大基金(6141B04070201-03)

作者简介

阴启玉,男,博士,研究方向为舰艇指控系统.qiyu_yin716@163.com

1 东南大学 网络空间安全学院,南京,211189

2 江苏自动化研究所,连云港,222061

3 连云港中等专业学校 机电工程系,连云港,222006

0 引言

无人艇(USV, Unmanned Surface Vehicles)的发展历史最早可追溯到1898年,当时著名的发明家尼古拉·特拉斯发明了名为“无线机器人”的遥控艇.它在二战时期首次被应用于实战,主要用以清除破浪带的水雷和障碍物.之后其应用模式不断拓展,被应用于取样、欺骗、评估、扫雷、自杀撞击等领域.因受限于技术水平发展,它们均采用遥控或预设航路的方式.美国海军从20世纪90年代开始研究无人水面艇^[1].2007年,美国海军发布《海军无人水面艇主计划》,为无人水面艇赋予了7项任务(反水雷战(MCM)、反潜作战(ASW)、海上安全(MS)、水面作战(SUW)、支持特种部队作战(SOF)、电子战(EW)、支持海上拦截作战(MIO)),同时还界定了无人水面艇的船型、尺寸和标准等要素,标志着美国无人水面艇的发展走上正规^[1].近年来,随着机器学习等人工智能技术的发展及在无人艇领域的应用,无人艇逐渐实现自主化和智能化,可以自主组织传感器进行周边态势感知、智能化态势分析和行动决策,自主任务执行和航行避碰,逐渐摆脱人的参与,能够长周期自主执行任务,从而为军事应用打开了广阔的前景.以色列的“保护者”是世界第一型察打一体无人艇,配备有机枪或舰炮、自动榴弹发射器和小型导弹.美国是无人艇装备类型和数量最多、技术最先进的国家,最近发布的“海上猎人”无人艇主要用于侦察和跟踪潜艇,能独立持续工作2~3个月.俄罗斯、日本、德国等国家投入了大量人力物力推进自主无人艇项目,我国也紧随其后,加快了无人艇的技术研究^[2].2017年7月,国务院发布《新一代人工智能发展规划》,将指挥决策、军事推演及装备研制的智能化统筹纳入军民融合建设格局,催生了智能无人作战系统.我国军用无人艇还处于起步阶段^[3].最近报道的我国JARI-USV多功能无人作战艇集成了最小的相控阵雷达,首次装备垂发导弹,具备对空、对海和反潜作战能力,它以其载荷模块化、决策智能化、控制自动化、航行自主化等特点令人瞩目.

雷达具有探测距离远、不受天气影响、探测精度高等特点,是现代作战舰艇必备传感器之一,是保障船舶航行安全,目标搜索、定位的重要设备^[4].随着雷达信号处理技术的发展,已能实现对目标的自动建航和跟踪,但高漏情和误警仍然是现代雷达无法避免的问题.因此,需向用户实时显示雷达原始视频,以便环境监视和信息处理过程干预.根据雷达视频,船舶驾驶员可以实时掌握本船周围的态势,作出

相应的决策,进而保障船舶航行安全,作战指挥员可以根据雷达视频发现并确认目标,人工或自动建立目标航迹,供武器打击使用.对无人作战艇而言,导航雷达视频具有同等重要性,如何将无人艇雷达载荷生成的视频信息通过通信系统完整、低时延地传输到岸基控制站并显示,是无人作战艇指挥控制系统必须解决的问题.

无人艇雷达载荷为有源探测传感器,主动发射电磁波,接收目标散射或反射的电磁波,进行信号处理后输出该方位目标回波信息,一个天线周期输出 2 048 线视频信息,数据量约 4 MB.若不加处理直接传输,将极大地占用岸艇无线信道资源,影响其他重要信息的传输^[5].为减少雷达视频对带宽的持续占用,降低视频数据传输时延,本文设计了雷达视频数据传输流程.如图 1 所示,其中视频编码压缩模块主要提取视频有效数据进行重新编码,岸端处理主要接收视频编码数据进行视频可视化绘制^[6].本文主要针对无人艇雷达载荷构建了雷达视频数字化表示方法、编码压缩算法和解析显示算法.

1 视频压缩方法

视频压缩可分为有损压缩和无损压缩.一般而言,有损压缩通过牺牲图像细节而提升压缩比,通常得到原始数据的近似数据;而无损压缩则注重数据的可复原性,压缩率一般较低.无人艇雷达视频是提供岸基操作人员对自动建航、自主跟踪时的虚情、漏情的补充处理和确认,需在尽可能小时延的情况下完整复原无人艇雷达视频细节,从而需要选用无损压缩算法.

从国内外无损压缩技术研究看,无损压缩大致可分为基于变换的方法和基于预测的方法,主要有 JBIG^[7]、JPEG-LS^[8] 中基于 MED 预测的 LOCO-I 算

法、基于小波变换的 JPEG2000^[9]、基于上下文预测编码 CALIC^[10] 和微软的 JPEG-XR^[11] 等.通过分析上述压缩算法,图像压缩基本可分为三个步骤,即去相关、量化、熵编码,三步相互联系又互相制约,进而构成不同压缩方法达到不同的压缩效果^[12-13].本项目雷达采用边探测边发送回波的模式,图像数据是离散发送,如果采用上述压缩算法,需先缓存一个天线周期的图像数据,再构建图像,进而压缩处理,该方式势必增加处理时间和等待时间,增加图像时延.本文主要构建一种边接收边处理的压缩编码算法,满足无人艇雷达视频图像完整、低带宽占用、低时延的传输和显示需求.

2 雷达视频数字化

雷达回波是由雷达波照射到物体表面反射到雷达接收机,经信号处理后得到的信息.通过回波,可以得到目标相对于本艇的方位、距离信息.回波点的灰度值表示回波的强弱.受雷达探测原理的启发,雷达视频可视作由致密射线组成,进而实现雷达视频的去相关、数字化、离散化.雷达探测时,接收到回波信号后,进行恒虚警和去噪等预处理后立即向外部系统输出方位区间内的回波信息,较有人值守雷达节约了雷达图像构建与显示处理时间.故雷达视频数字化可采用以本艇为中心的射线表示某个方位的视频数据,即第 i 个方位的视频 V_i 表示为

$$V_i = (A_i, H_i, P_{i0}, P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{in}),$$

其中 i 表示视频方位编号, $A_i = \delta \times i$ 为雷达方位分辨率与方位编号的乘积, H_i 为实时航向, P_{ij} 表示 i 方位上第 j 处的回波强度,用 4 bit 表示回波强度,范围为 $[0, 15]$, 15 表示回波最强, n 为方位采样点数.因此一个回波射线数据长度为: $(n/2 + 4)$ B.

进而雷达视频可数字化表示为

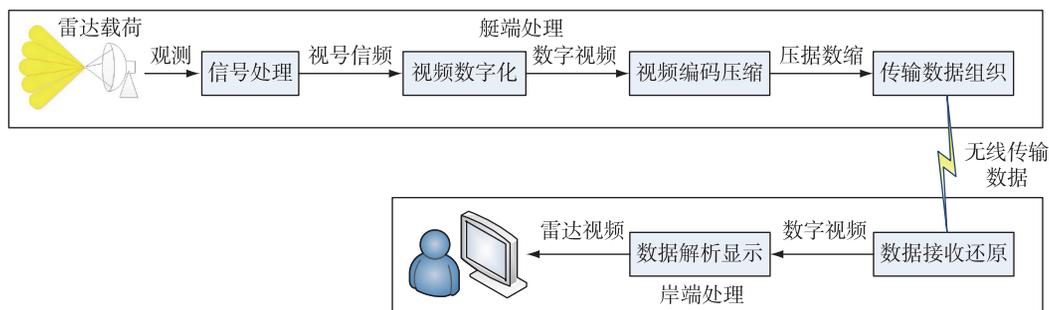


图 1 雷达视频数据传输流程

Fig. 1 Flow chart of radar video transmission

发送条件设置为

$$L = \sum_{i=j}^n l(V'_i), V'_i \neq \phi,$$

其中, L 为有效数据长度. 当 $L + l(V'_i) \geq \psi$ 或 $i = m$ 时, 发送数据 $[V'_j, V'_{j+1}, \dots, V'_m]$, 其中 $V'_i \neq \phi$. ψ 与无线通信系统特性有关, 为可发送单包数据最大长度.

4 视频绘制显示

在无人艇岸基控制站, 雷达视频采用相对位置的方式在 1024×1024 区域进行绘制, 视频中心为 (x, y) , 定义每个回波为一个控件: $I_i = [x_i, y_i, g_i]$, 其中 x_i, y_i 表示回波点相对于中心点的位置, g_i 表示回波强度.

当前探测量程为 R , 显示量程为 R' , 则:

$$x_i = \frac{512jR\cos(C_i)}{nR'},$$

$$y_i = \frac{512jR\sin(C_i)}{nR'},$$

$$g_i = \frac{1}{t} \sum_{j=-t}^0 g_j,$$

g_i 为 t 个更新周期的回波强度平均值, t 可调.

视频绘制时, 用 x_i, y_i 定位回波位置, g_i 为该位置回波点的亮度, 通过该方式绘制的回波不连续, 由离散点组成, 在视觉效果上不够美观, 对目标回波显示也不够明显, 需要进一步修正绘制要素, 根据回波点与中心点的偏离值, 设置回波点膨胀系数, 如图 5 所示.

$$\theta_i = \left[\sqrt{x_i^2 + y_i^2} \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \right].$$

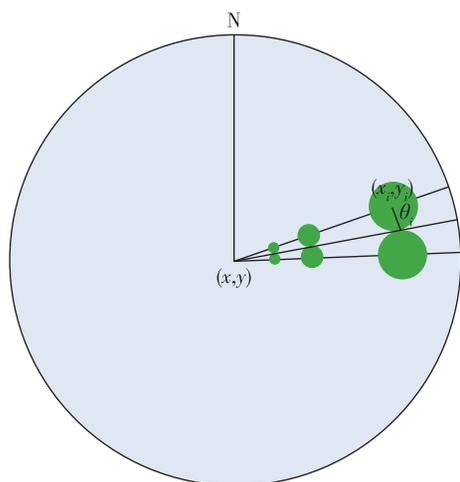


图 5 带膨胀系数的回波绘制示意图

Fig. 5 Schematic diagram of echo wave with expansion coefficient

在绘制回波点时, 采用半径为 θ 个像素的填充圆标示, 增强了回波的连续性, 提升了显示效果.

5 应用效果

该技术已应用于某型无人艇控制系统中, 用于传输导航雷达、相控阵雷达和声纳等视频信息至岸基控制站并显示, 取 $\delta=0$, 数字编码后图像原始数据为 1 MB. 本文定义回波占比为有效数据占原始数据的百分比, 定义压缩比为压缩前后的数据量比值, 压缩比越大, 效果越好. 通过调节雷达杂波抑制, 控制回波占比, 测试压缩比. 时延主要由两部分组成, 分别是艇端的收集、编码、压缩处理时延和岸端的解码显示时延, 其中处理时延为一个天线周期处理耗时总和, 不含等待时间, 显示时延为一帧图像解码并转换为显示数据的处理耗时总和, 不含等待时间, 显示刷新采用周期刷新的模式. 测试结果如表 1 所示.

表 1 不同回波占比情况下的压缩比及时延测试结果

Table 1 Test results of compression ratio and time delay under different radar echo wave ratios

回波占比/ %	压缩后单帧 数据量/kB	压缩比	时延/ms	
			处理时延	显示时延
1.21	27.82	36.81	0.4	0.5
3.57	65.76	15.57	0.4	0.6
12.06	223.25	4.59	0.5	0.9
25.42	450.45	2.27	0.6	1.3
45.32	780.12	1.31	1.0	1.8
52.14	846.87	1.21	1.2	2.2
75.01	1 210.38	0.84	1.3	2.8

从表 1 数据可以发现, 当回波占比达到约 75% 时, 编码压缩输出数据开始膨胀. 为保证压缩效果, 当压缩比低于 2 时, 通过改变 δ , 过滤低灰度值数据, 可有效避免数据膨胀现象. 在压缩比大于 2 时, 可保证对视频编码压缩和解码转换显示时延在 2 ms 以内. 排除通信系统误码影响, 算法可保证视频数据还原率 100%. 在无人艇控制系统实际显示效果如图 6 所示, 可有效复原艇载雷达回波, 支持操作人员在岸基控制站完成无人艇航行监视和目标确认.

6 结束语

本文针对无人艇雷达载荷视频传输需求, 设计了一种数据编码压缩算法和显示方法. 该算法通过阈值控制视频压缩比, 采用移动平均消除无线传输丢包对显示效果的影响, 保证了雷达视频数据的低

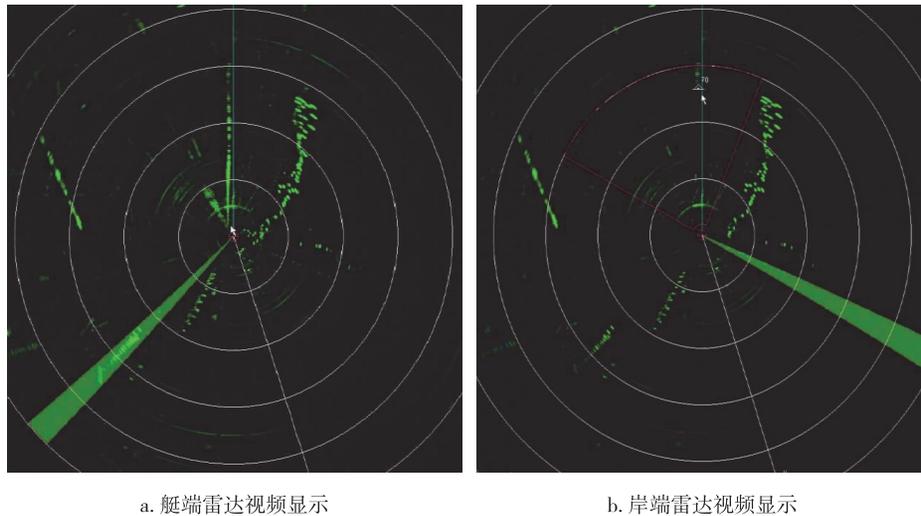


图6 实际显示效果

Fig. 6 Actual video display on (a) USV radar and (b) shore-based radar

时延无损压缩,有效降低了雷达视频传输对无线链路带宽的占用.使用效果表明,无人艇岸基控制站雷达视频显示完整、刷新流畅,能够支持岸基控制站操作人员基于雷达视频的操作和应用.

参考文献

References

- [1] 李家良.水面无人艇发展与应用[J].火力与指挥控制,2012,37(6):203-207
LI Jialiang. Development and application of unmanned surface vehicle [J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(6): 203-207
- [2] 李楠,陈练,庞衍鹏,等.无人艇装备技术发展与应用探析[J].舰船科学技术,2019,41(23):29-34
LI Nan, CHEN Lian, PANG Yanpeng, et al. Analysis on key technologies evolution and application of USV [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(23): 29-34
- [3] 王石,张建强,杨舒卉,等.国内外无人艇发展现状及典型作战应用研究[J].火力与指挥控制,2019,44(2):11-15
WANG Shi, ZHANG Jianqiang, YANG Shuhui, et al. Research on development status and combat applications of USVs in worldwide [J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(2): 11-15
- [4] 王旭升.无人艇雷达图像目标检测系统的研究[D].大连:大连海事大学,2016
WANG Xusheng. Research of USV radar image target detection system [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016
- [5] Yin Q Y, Lv Y. Multichannel adaptive deployment and reliable communication design for unmanned surface vessel [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2020, 17(1). DOI: 10.1177/172988141989158
- [6] 陈康先,程兴国,肖南峰.基于GPRS的视频图像传输系统设计与实现[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2011,3(1):72-77
CHEN Kangxian, CHENG Xingguo, XIAO Nanfeng. Design and implementation of GPRS-based video images transmission system [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 3(1): 72-77
- [7] 陈聪.基于FPGA的二值图像JBIG压缩算法研究与实现[D].西安:西安电子科技大学,2013
CHEN Cong. Research and implementation of JBIG compression for binary image based on FPGA [D]. Xi'an: Xidian University, 2013
- [8] Weinberger M J, Seroussi G, Sapiro G. LOCO-I: a low complexity, context-based, lossless image compression algorithm [C] // Proceedings of Data Compression Conference, 1996: 140-149
- [9] Narayanan B N, Hardie R C, Balster E J. Multiframe adaptive Wiener filter super-resolution with JPEG2000-compressed images [J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2014, 2014: 55
- [10] 延学萍.基于上下文的多维图像的无损/有损压缩技术[D].西安:西安电子科技大学,2012
YAN Xueping. Multidimensional image lossless and lossy compression based on the context [D]. Xi'an: Xidian University, 2012
- [11] Hua K L, Thi T H, Kathiravan S, et al. Reduction of artefacts in JPEG-XR compressed images [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(5). DOI: 10.3390/s19051214
- [12] 张燕,陈苏婷,沈晓东.基于码率控制的DMB预警信息预处理系统[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2014,6(1):41-46
ZHANG Yan, CHEN Suting, SHEN Xiaodong. Pre-processing system of DMB early warning information based on bit-rate control [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 6(1): 41-46
- [13] 张煜东,吴乐南,王水花,等.一种基于神经网络的遥

感图像压缩编码[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2009,1(1):82-88

ZHANG Yudong, WU Lenan, WANG Shuihua, et al. A neural network based compression coding for remote

sensing images[J].Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition),2009,1(1):82-88

Wireless transmission of USV radar video

YIN Qiyu^{1,2} HAN Yu³

1 School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189

2 Jiangsu Automation Research Institute of CSIC, Lianyungang 222061

3 Department of Mechanical and Electrical Engineering, LYG Specialized Secondary School, Lianyungang 222006

Abstract Radar videos are characterized by large data volume, high update frequency and large transmission bandwidth. While the data transmission bandwidth of USV (Unmanned Surface Vehicles) to shore is limited, and the transmission information is various and large in volume. In the use of USV, radar videos are indispensable support for shore-based operators to ensure safe navigation, quick search and accurate confirmation of belligerent objects. However, there is an inevitable contradiction between the shortage of bandwidth resources of shore-USV data intercommunication and the large information transmission demand of radar videos. Based on the principle of radar detection and imaging, this paper presents the digital representation of the radar videos, and realizes the restoration and display of radar video by the shore-based control station through video compression, data transmission and restoration display. The proposed wireless transmission method is applied to a USV control system, and results demonstrate that it is high in video compression ratio, low in processing delay, with complete video restoration and good fault tolerance.

Key words unmanned surface vehicles (USV); radar video; digitization; video compression; video restoration and display