

基于无人机自组网的空海一体化组网观测技术

闫朝星, 付林罡, 郑雪峰, 谌 明

(北京遥测技术研究所, 北京 100076)

摘要: 本文在分析海面无线通信信道特性与多径衰落参数的基础上, 综述了海面观测组网通信与无人机观测等海洋监测方法, 以及无线传感器网络与无线自组织网络协同作业观测技术。然后, 分析了无线 Mesh 网络协议架构与自组织网络路由协议, 以及适合于海上通信的 AODV 协议与 OLSR 协议, 为空海一体化机动组网观测应用设计提供参考。

关键词: 海上观测; 无人机通信; 自组织网络

中图分类号: TN929.5 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2018)01-0021-07

DOI: 10.11759/hyxx20171011021

中国拥有约 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$ 的管辖海域, 海洋里蕴藏的生物、矿产、化学、空间资源和能源非常丰富, 越来越多的人投身海洋渔业、运输业及勘探开发等海上生产活动。近年来, 海洋可持续发展面临着资源过度开采、环境污染恶化、作业船只监管混乱等突出问题。多年以来, 海上一直是移动通信网络的盲区, 短波通信仍然是海上近距离通信的重要手段, 但是在海上靠电离层反射传播, 受天气和气候影响较重, 传输稳定性差, 容量小、频率拥挤、噪声大、易被干扰且不适合长距离通信^[1]。各级渔业行政部门、企业及社会化服务单位在全国沿海不断投资兴建短波岸基站、高频电话台, 升级改造近海安全救助网岸站, 同时在作业船只上安装配备各种通信导航设备, 主要有无线电台、甚高频无线电话、船用雷达、GPS 全球卫星定位导航仪、彩色鱼控仪等一大批先进仪器, 为海洋渔业生产搭建了一个规模宏大的通信平台。虽然渔业通信平台建设初具规模、成效显著, 但近几年远洋作业的业务发展较为快速, 传统的通信手段渐渐地不能满足日益发展的海洋渔业生产要求^[2]。

最近, 随着国家一带一路战略的开展, 海上军事经济活动也越来越频繁, 对信息保障提出了越来越高的要求。近年来, 中国海洋监测技术的研究与应用已取得了巨大的进步, 逐步建立起海洋监测台站、浮标、调查船、卫星遥感及航空遥感等组成的海洋环境立体监测网络, 中国海洋大学采用低功耗 TelosB 节点研究无线传感器网络^[3]。美国海军在其舰船上部署一种基于 4G LTE 的无线广域网, 在美国海军的试验过程中遇到的最大的问题是系统内部和系统外部的干扰问题^[4]。全球海洋监测计划 ARGOS

是由美国海洋科学家倡导发起的用于对全球海洋监测的大型网络, 其主要目的在于收集全球范围内的海水温度、盐度和海流等海洋信息, 有效对各种自然灾害如飓风、洪涝灾害等提前预警^[3]。

无人机飞行自组织网络(FANET)是执行无人机集群任务的使能技术, 如 DARPA 小精灵项目、美军 LOCUST 项目、山鹑(Perdix)项目等。得益于逐渐增长的商用和政用市场, 高盛研究预测十三五期间无人机将有 1000 亿美元的市场机会, 已制定的无人机管理法规定绝大多数都有要求装配卫星导航与通信控制设备, 成为天地一体化网络工程建设的一环, 与天基物联网(IoT)应用服务完成紧密结合。采用基于无人机采集数据或中继节点的通信技术近年来研究呈现热门趋势。国外航空航天机构及大学等研究机构针对专用网络或移动通信标准网络, 研究了 FANET、MANET、VANET 自组网通信技术^[5-6]。国内参与无人机或自组网研究的单位主要有西工大、北航、南航等高校, 中国航天、中航工业、原总参六〇所等几个研究机构。中国航天科技集团九院七〇四所(北京遥测技术研究所)在近期完成了基于 COFDM 技术的一站多机低仰角抗多径干扰高速数据链技术工程化验证, 中国电子科技集团公司近年完成了中国无人机集群实验原型, 由 67 架无人机组成的无人机集群的原理验证^[7]。

收稿日期: 2017-10-11; 修回日期: 2017-12-25

作者简介: 闫朝星(1985-), 山东临沂人, 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为测控通信系统, 电话: 010-88524232, E-mail: chaoxing-yan@foxmail.com

1 海上无线通信信道与数据链

1.1 海上无线通信信道

无线自组网络被引入海上通信,并逐渐成为近年来海上通信领域研究的热点。在海上通信过程中,常常会遇到较恶劣的天气情况,当浪高达到一定高度时,很可能会阻塞无线通信链路,这种现象叫做波闭塞^[8]。同时考虑地球表面的曲率,如图1所示。图中纵轴 H_t 、 H_r 表示收发天线高度,横轴 L 、 d 则表示海浪、无线接收天线之间的相对距离, Δ 决定了无线通信链路和浪高之间的关系。同时考虑地球表面的曲率后根据数据建模,可以确定波闭塞的时间。

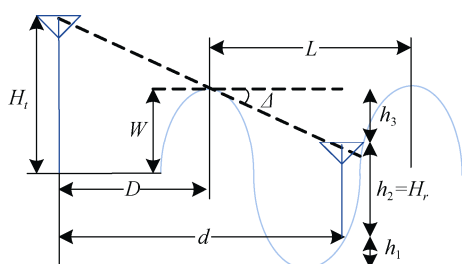


图1 海上通信链路模型

Fig. 1 Sea communication link model

Meng 等^[9]通过飞行测试研究了新加坡附近海域 C 波段海面低空平台宽带海空信道特性,一般的将该信道视为 3 径或 2 径多径信道,其测试环境与信

道响应如表 1 所示。

表 1 无人机海面飞行多径发生概率^[9]

Tab. 1 Probability of multipath occurrence of sea surface flight of an UAV^[9]

高度/ km	概率/%				
	1 径	2 径	3 径	4 径	5 径
1.83	56	38.2	5.7		
0.91	75.9	20.8	2.98	0.32	
0.37	62.4	23.5	8.5	3.34	1.67

Lei 等^[10]研究了海面 8 GHz 多径信道,时延量约为 10~60 ns,如图 2 所示给出了粗糙海面时多径分量组成与其特性。Matolak 等^[11]通过实验分析了海空信道 L 波段 970 MHz 与 C 波段 5GHz 的海空信道,结果如表 2 所示。

1.2 海洋观测与无人机数据链

下面分析海洋观测中使用的无人机平台及其数据链产品。美国海军的 Coyote 无人机平台配有海面温度、湿度、风速采集设备^[12],如图 3 所示。挪威大学在 X8 无人机上载荷试验平台试验其数据链路^[13],如图 4 所示。Palmer 等^[14]考察了 802.15 标准在无人机与海面传感器,以及传感器之间组网通信的性能。Zeng 等^[15]研究了无人机通信中的覆盖、中继与分发采集,如图 5 所示为无人机数据采集分发以及无线传感器网络之间共享的过程。

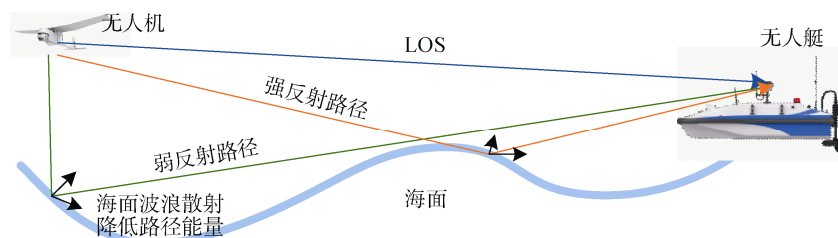


图2 粗糙海面多径信道组成分析

Fig. 2 The analysis of the multipath channel composition of a rough sea surface

表 2 海空无人机多径信道测试参数^[11]

Tab. 2 Test parameters for a multipath channel of sea and air UAV^[11]

波段	信号速率 (MHz)	最大时延 (μs)	最小 RMS-DS (ns)
L	5	204.6	140
C	50	20.46	10

由北京遥测技术研究所研制的超近程无人机小型化机载测控终端具有视距测控与数传功能^[16],如

图 6 所示。

该超近程无人机测控系统采用 TDD 模式 COFDM 体制,在低仰角复杂电磁环境中具有较强抗的多径干扰能力,可变速率数据传输达 10Mbps。在测试实验中,采用机载 1W 功放、全向天线;地面 1W 功放、平板定向天线,在无人机飞行高度 100 米时作用距离可达 15 km。该系统经型号批产,技术成熟稳定。该系统基于 TDD-TDMA 突发模式,核心技术完全自主知识产权,方便无人机自组网模式,形成无人机集群。

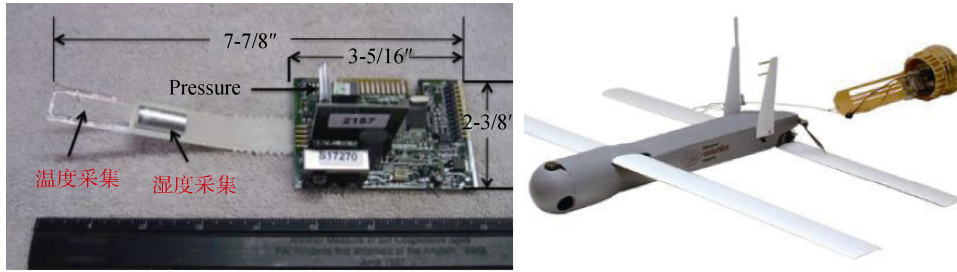


图 3 Coyote 无人机平台及观测设备
Fig. 3 Coyote UAV platform and observation equipment

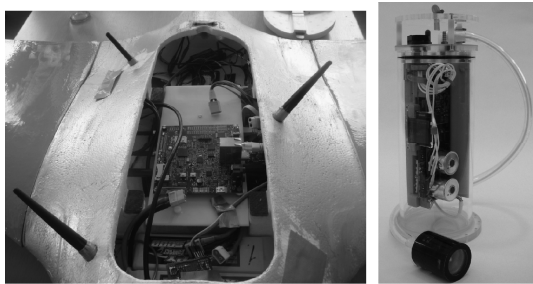
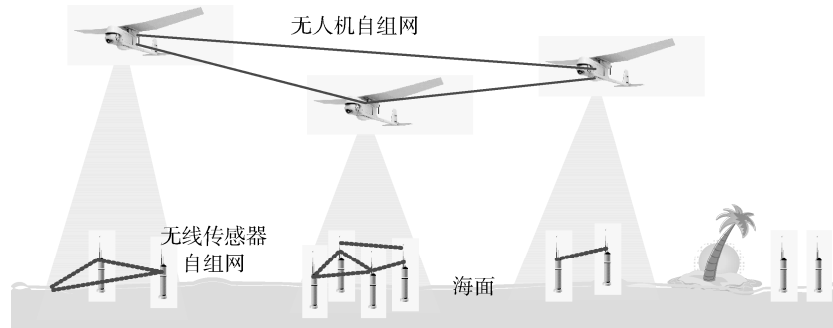


图 4 X8 无人机平台^[13]与 AquaNode 传感器^[14]
Fig. 4 The X8 unmanned aerial vehicle platform^[13] and AquaNode sensor^[14]

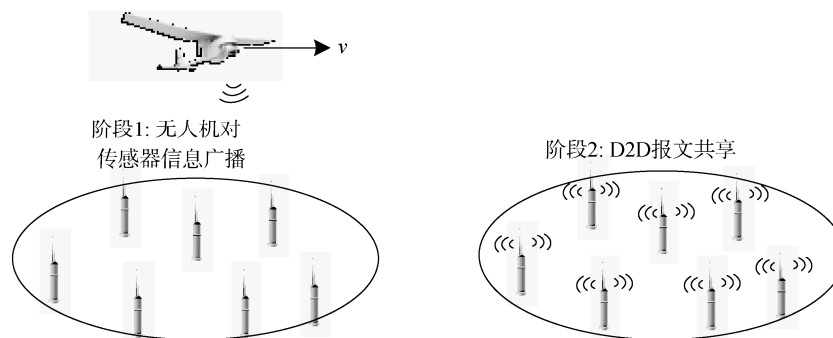
2 海上自组网传输技术

2.1 自组网架构

基于 COFDM 自组网的无线视频传输系统设备由发射机和接收机组成, 设备集成了图像压缩编码、流复用/解复用、数字加密/解密以及信道解码等技术。采用全向收发天线, 无需寻找通视路由, 无需配置复杂昂贵的伺服稳定系统即可装配在车船等运动载体上等优点^[16]。COFDM 技术具有以下优势:



(a) 无人机自组网与无线传感器自组网



(b) 无人机信息分发

图 5 无人机信息分发与数据采集

Fig. 5 UAV information distribution and data acquisition

- (1) 系统频谱效率高;
- (2) 具有绕射能力, 适合在城区、建筑物内等非
- 通视的环境中进行图像和语音传输;
- (3) 在非视距范围内可以提供稳定可靠的图像传输;

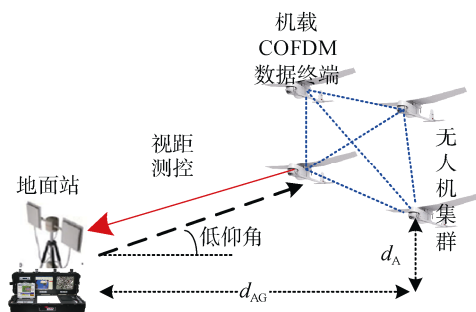


图6 无人机组网测控与数传终端

Fig. 6 Measurement and control and transmission terminal of an unmanned aerial network

(4) 对高速数据流进行 A/D 转换, 使得各子载波上的数据符号持续长度相对增加, 大大减少无线信道时间扩散所带来的码间干扰;

(5) 具有较好的抗多径衰落性能。

海上机动试验通信系统协议在架构上划分为 4 个层次^[17], 即物理层 L1、链路层 L2、网络层 L3 和业务承载层。根据无线 Mesh 网络和军事网络的特征, 刘显静等^[18]参照 OSI 的 7 层协议栈模型, 也将 WMN 的协议栈分为 4 层, 如图 7 所示。

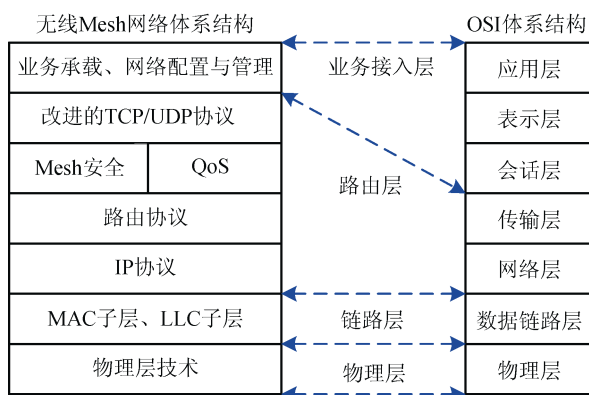


图7 网络协议体系

Fig. 7 Network protocol system

物理层 L1 完成无线信号的调制解调、发送和接收等任务。该层采用 OFDMA 传输技术, 易于与高效调制和编码等先进技术结合, 提供符号、子载波二维的多用户信息承载平台; 支持 QPSK、16QAM 和 64QAM 等各种调制方式与 Turbo /LDPC 编码相结合, 具有较高的传输效率。

链路层 L2 完成媒体接入控制、数据传送、同步、纠错以及流量控制等。该层采用自组网互联技术, 载波侦听多址接入/冲突避免(CSMA/CA)和时分多址接入(TDMA)方式完成通信设备节点的发现、无线链路的建

立、拓扑的维护, 最终完成所有通信节点的互联接入。

网络层 L3 完成邻居发现、分组路由、网络互联功能, 邻居发现用于收集网络拓扑信息, 路由协议负责发现和维护源节点与目的节点的路由。该层充分考虑海上编队通信应用和业务传输需求、无线网络拓扑动态变化、链路复杂等特性, 采用基于权值的自适应跨层协同路由技术, 满足海上编队组网对路由的要求。

2.2 无线 Mesh 网

海上自组织网络为一种多跳、具有自组织和自治特点的无线网络结构, 即一种高容量、高速率的分布式网络^[1]。刘旭^[19]基于 AIS(船舶自动识别系统)的海上无线数据通信网络, 借助 AIS 提供的船舶标识和认证功能, 实现了较为简单和有效的位置发现及通信路由功能, 解决了海上无线自组网的有效寻路问题, 宫宇等^[20]在 Ad hoc 的思想下设计了应用平台, 平台实现了 DSR、CSMA/CA 等协议, 经测试该平台可以通过自组织的方法实现基本的语音和数据通信。

无线网状网络由 Ad hoc 网络发展而来, 与无线自组网类似, 网状网络具有良好的伸缩性和可实现性^[21]。然而其与 Ad hoc 网络的不同之处在于网状网络适用于对移动性要求不高的场景, 其终端节点通常是静止的或缓慢移动的, 拓扑变化并不剧烈。在海上通信环境中, 船舶之间相对的位置变化并不明显, 因而无线网络的拓扑变化并不剧烈, 因而基于 WiMAX 的网状网络能够较好适应海上通信环境。

罗文革等^[22]总结无线 Mesh 网络主要存在四种网络实体: 简单客户端(Simple Station, STA); Mesh 节点(Mesh Point, MP); 能够提供 STA 接入技术服务的特殊的 MP(Mesh Access Point, MAP); 可以作为 Mesh 网络出口的特殊的 MP(Mesh Point Portal, MPP)。无线 Mesh 网可以通过一些中间节点连接互相远离而不能直接连接的无线设备, 其组网方式高度灵活与自适应。在实际应用中无线 Mesh 网络具有诸多优点^[23]: (1)多信道协商; (2)信道分配; (3)网络发现; (4)路由转发。

无线 Mesh 组网也存在着不足之处。网络延迟, 在 Mesh 网络中数据通过中间节点进行多跳转发, 每一跳至少都会带来一些延迟, 随着无线 Mesh 网络规模的扩大, 跳接越多, 积累的总延迟就会越大。

3 Ad Hoc 组网路由

3.1 Ad Hoc 网络路由特点

现阶段, Ad Hoc 网络中路由协议面临着无线传

输带宽有限、存在单向信道、动态变化的网络拓扑及无线移动终端存在局限性等问题。Ad Hoc 网络路由协议可以根据角度分为不同的类型。当角度为所处理的网络逻辑视图时, Ad Hoc 网络路由协议可以分为平面路由协议和分级路由协议。分级结构是按照不同的算法将整体分成不同的群, 其中节点包括普通节点和簇头节点, 分别代表不同的功能^[23]。

路由协议属于网络层, 其主要作用是将分组从信源选定的路由传输到信宿节点。Ad Hoc 网络的路由协议采用的是多跳机制, 设计时着重考虑算法和

数据结构^[23]。具体的内容有:

- (1) 正确性、稳健性和高效性等指标;
- (2) 其评估标准采用的是跳数、时延和费用等;
- (3) 固定式路由选择、泛洪、自适应路由选择和随机路由选择等选择策略。

从路由发现的策略角度来看, Ad Hoc 网络路由协议可以分为主动、被动和混合路由协议 3 种。如果从有无 GPS 辅助角度看, Ad Hoc 网络路由协议又可以分为基于位置的网络拓扑结构或者基于网络拓扑的路由协议^[7, 23], 如图 8 所示。

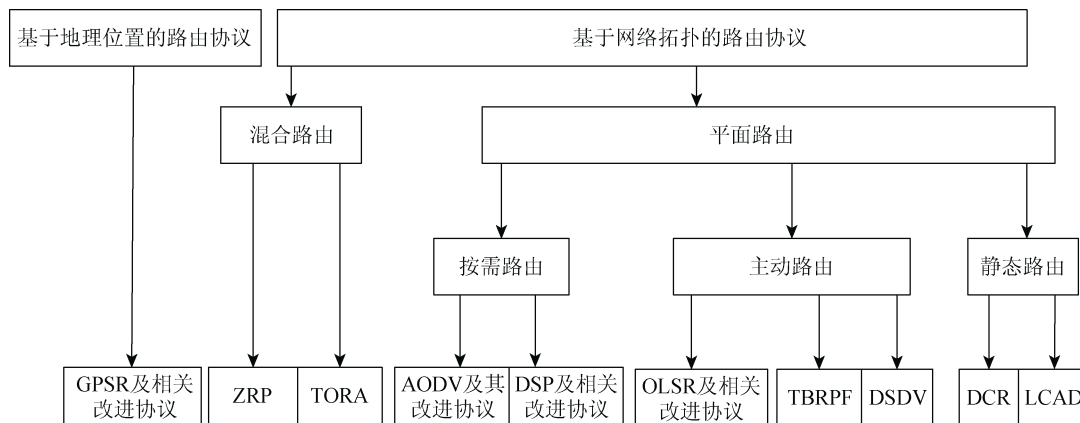


图 8 无人机自组网路由算法树状分类

Fig. 8 Tree classification of an unmanned aerial vehicle routing algorithm

3.2 路由协议分析

目前几种典型的路由协议有^[22]: DSDV(目的序列距离矢量路由协议)、TORA(临时按序路由算法)、DSR(动态源路由协议)、OLSR(最优链路状态路由协议)和 AODV(Ad-hoc 按需距离矢量路由协议)等。分别从时延、投递率和吞吐量进行对比分析, 在经典协议中, AODV 协议更适合应用于海上通信。罗尚平^[8]分析了一种修改的 AODV 协议实现路由, 协议的步骤描述如下:

- (1) 首先, 源节点向周边节点发送路由请求;
- (2) 周边接收到请求之后, 将自动形成虚节点, 在这一过程中, 可能不止一个节点收到请求, 这些收到请求的节点均属于统一虚节点;
- (3) 虚节点继续发送路由请求, 若无法到达最终的目的节点, 则仍然会有若干节点收到该请求, 这些节点组成另一个虚节点;
- (4) 递归地进行步骤 3, 直到某些节点能够将消息交付目的节点, 这些节点组成最后一个虚节点, 此时, 各个虚节点之间的路由已经确定;

(5) 此时, 从源节点发送数据到第 1 个虚节点, 此时第 1 个虚节点内的所有节点收到消息, 并分别向第 2 个虚节点中的每个节点分发消息, 递归地进行该过程, 直到最后一个虚节点将消息发送给目的节点。

蒋清健^[24]基于遗传算法的路由方法, 不仅能够得到源端到目的端的可行路径, 同时能够根据链路的通信资源找出最优路径, 获得链路的平均资源比 AODV 多 20%左右。刘显静等^[18]采用基于 OLSR 协议实现基于权值的自适应跨层协同路由技术, 该协议选择算法将信号质量、频谱状态、物理层带宽、资源分配等加权值作为判据, 选择单位业务传输权值最小的路径作为最佳路由; 当上述几个参数发生变化时, 重新进行协议交互和路由选择, 自动更新网络路由, 保障业务传输质量、系统吞吐量、端到端传输时延。

4 结束语

作为未来自组织网络通信的发展方向, 无人机自组网与无线传感器网络协同组网具有广阔的研究

和应用前景,除了物理层检测技术与天线功放等射频单元,上层的MAC协议和路由协议的设计将会是空海一体化自组网应用面临的巨大挑战。MAC层所面临的问题包括突发业务高速率和低时延传输、多优先级支持、信道高效利用和差错控制等;FANET网络层设计的重点在于高动态变化拓扑、完全分布式、高效可靠的路由协议。海上无线传感器网络与无人机自组网一体化优化设计的最终目标是依据不同应用建立异质通信设施之间实现可靠、高效通信。

参考文献:

- [1] 王燕,李长德,徐梁,等.卫星通信与Mesh网络组网在海洋渔业中的融合应用[J].卫星应用,2017,5: 54-57.
Wang Yan, Li Changde, Xu Liang, et al. Integrating application of satellite communication and mesh networking in ocean fishing[J]. Satellite Application, 2017, 5: 54-57.
- [2] 王杰.海上快速组网实现方式及应用前景分析[J].数字通信世界,2015,12: 53-55.
Wang Jie. Implementation and Application Prospect of Maritime Fast Networking [J]. Digital Communication World, 2015, 12: 53-55.
- [3] 罗汉江.海洋监测传感器网络关键技术研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.
Luo Hanjiang, Research of Marine Monitoring Sensor Networks on Key Technologies[D]. Ocean University of China, 2010.
- [4] 余金磊. TD-LTE 海上组网与干扰抑制技术研究[J].计算机与网络,2016,8: 65-68.
Yu Jinlei. Research on Marine Networking and Interference Rejection of TD-LTE[J]. Computer and Networking, 2016, 8: 65-68.
- [5] Bekmezci İ, Sahingoz O K, Temel Ş. Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A survey[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(3): 1254-1270.
- [6] Kumar R, Dave M. A comparative study of Various Routing Protocols in VANET[J]. International Journal of Computer Science Issues, 2011.
- [7] 张国峰.无人机自组网路由协议研究[M].沈阳:沈阳工业大学出版社,2017.
Zhang Guofeng. Research on Routing Protocol for Unmanned Aerial Vehicle Ad Hoc Network[M]. Shenyang University of Technology Press, 2017.
- [8] 罗尚平,刘才铭,黄陈英.海上多跳无线自组网路由协议仿真研究[J].舰船科学技术,2015,01: 186-190.
Luo Shangping, Liu Caiming, Huang Chenying. The research and simulation on marine multi-hop ad hoc network routing protocol[J]. Ship Science and Technology, 2015, 01: 186-190.
- [9] Meng Y S, Lee Y H. Measurements and characterizations of air-to-ground channel over sea surface at C-band with low airborne altitudes[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1943-1948.
- [10] Lei Q, Rice M. Multipath Channel Model for Over-Water Aeronautical Telemetry[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009, 45(2): 735-742.
- [11] Matolak D W, Sun R. Air-Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems - Part I: Methods, Measurements, and Models for Over-Water Settings[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(1): 26-44.
- [12] Patterson M C L, Osbrink D, Brescia A, et al. Atmospheric and ocean boundary layer profiling with unmanned air platforms[C]//Proc 2014 Oceans - St John's, 2014: 1-7.
- [13] Barbatei R, Skavhaug A, Johansen T A. Acquisition and relaying of data from a floating wireless sensor node using an unmanned aerial vehicle[C]//2015 IEEE International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2015: 677-686.
- [14] Palmer J, Yuen N, Ore J P C. et al. On air-to-water radio communication between UAVs and water sensor networks[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2015: 5311-5317.
- [15] Zeng Y, Zhang R, Lim T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [16] 闫朝星,付林罡,朱至天,等.天基测控中无人机集群的高效随机接入技术[C]//中国通信学会卫星通信委员会.第十四届卫星通信学术年会,2018.
Yan Chaoping, Fu Lingang, Zhu Zhitian, et al. Efficient Random Access Techniques of UAV Swarm in Space-Based TT&C [C]// Satellite Communications Commission of the China Communications Society. The 14th Annual Conference on Satellite Communication, 2018.
- [17] 李燕,徐珩,韩晓东.海上机动试验通信系统设计[J].信息通信,2016,4: 213-214.
Li Yan, Xu Heng, Han Xiaodong. Design of Over-Sea Flexible Testing Communication System [J]. Information Communication, 2016, 4: 213-214.
- [18] 刘显静,吴学智,沈钊.基于Mesh结构的海上无线局域网组网性能研究[J].计算机技术与发展,2013,6: 162-165.
Liu Xianjing, Wu Xuezhi, Shen Zhao. Research on Performance of Maritime Wireless LAN Networking Based on Mesh Structure[J]. Computer Technology and Development, 2013, 6: 162-165.

- [19] 刘旭. 基于 AIS 的海上无线数据通信网络研究与仿真[J]. 舰船科学技术, 2014, 12, 144-147.
Liu Xu. Research and simulation of AIS-based maritime wireless data communication network[J]. Ship Science and Technology, 2014, 12, 144-147.
- [20] 宫宇, 王旭东, 庞福文. 无线 Ad hoc 船舶通信系统设计与实现[J]. 舰船科学技术, 2010, 4: 69-72.
Gong Yu, Wang Xudong, Pang Fuwen. Wireless Ad hoc shipping communications system design and apply[J]. Ship Science and Technology, 2010, 04: 69-72.
- [21] 朱佳. 基于 WiMAX 网状网络的海上通信系统构建与应用[J]. 舰船科学技术, 2014, 12: 161-165.
Zhu Jia. Implementation and practice of the communication system based on WiMAX mesh network on maritime[J]. Ship Science and Technology, 2014, 12: 161-165.
- [22] 罗文革, 高仲峰. 基于 OPNET 的海上无线 Mesh 网络路由协议的研究与仿真[J]. 无线通信技术, 2014, 1: 24-27.
Luo Wenge, Gao Zhongfeng. Study and Simulation of Routing Protocol for Maritime Wireless Mesh Networks Based on OPNET[J]. Wireless Communication Technology, 2014, 1: 24-27.
- [23] 冷令, 吴伟斌. 无线 Ad Hoc 网络路由协议在船舶海上通信中的应用[J]. 舰船科学技术, 2017, 4: 97-99.
Leng Ling, Wu Weibin. The application of routing protocols for wireless Ad Hoc networks in the maritime communication of ships[J]. Ship Science and Technology, 2017, 4: 97-99.
- [24] 蒋清健. 海上战术移动自组网路由技术研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 2: 136-138.
Jiang Qingjian. Research on marine tactical mobile ad-hoc networks routing technology[J]. Ship Science and Technology, 2016, 2: 136-138.

Air-sea integrating network for over-sea observation systems based on ad hoc networking using an UAV

YAN Chao-xing, FU Lin-gang, ZHENG Xue-feng, CHEN Ming

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Received: Oct. 11, 2017

Key words: Observation over sea; UAV communication; Ad hoc networking

Abstract: Based on an analysis of the over-sea wireless communication channel profiles and the multipath fading parameters, we surveyed the over-sea wireless sensor network used for observation and the observation task systems for wireless ad hoc network cooperation by utilizing the networking communication equipment, an unmanned aerial vehicle observation system, and all of the ocean observation products in use. Then, we analyzed the architecture of the wireless mesh network protocol and ad hoc network routing protocols, specifically the AODV and OLSR protocols that are suitable for over-sea communications. This reviewing work would be a reference for the design of future over-sea mobile networking systems.

(本文编辑: 梁德海)