

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2016.05.020

引用格式:钱国红,顾海燕.美军舰载机着舰数据链的发展与启示[J].电讯技术,2016,56(5):591-596. [QIAN Guohong, GU Haiyan. Development of US carrier aircraft landing datalink and its inspiration[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(5): 591-596.]

美军舰载机着舰数据链的发展与启示*

钱国红**¹, 顾海燕²

(1. 海军装备研究院 航空所, 上海 200436; 2. 中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘要:回顾了美国着舰引导系统及着舰数据链发展历程,分析了各着舰引导系统对信息传输需求的差异,总结了各着舰数据链的功能性能特征,描述了美国着舰数据链的发展趋势,探讨了新型着舰数据链的技术体制,最后指出了对我国着舰数据链技术及应用发展的启示。

关键词:舰载机;着舰数据链;发展趋势;发展启示

中图分类号:TN92 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2016)05-0591-06

Development of US Carrier Aircraft Landing
Datalink and Its Inspiration

QIAN Guohong¹, GU Haiyan²

(1. Institute of Aviation Equipment, Naval Academy of Armament, Shanghai 200436, China;
2. Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: This paper reviews the carrier aircraft landing guidance systems and landing datalink development history of US navy, analyzes the information transmission requirements of each landing guidance system and the functional performance characteristics of each landing datalink, describes the developing trend of US carrier aircraft landing datalink and explores the technologies of the new landing datalink. Finally, it makes some preliminary discussion on the development inspiration for China's landing datalink technology and application.

Key words: carrier aircraft; landing datalink; developing trend; development inspiration

1 引言

航空母舰是当今最具综合战斗力的海上作战体系核心,多年来在美、欧海军的军事行动中扮演了重要角色。舰载机作为航母编队的主战武器,可随舰队机动完成作战任务,是夺取、保持制空权和制海权的重要力量,对现代海战进程和结局产生越来越重大影响。

在航母编队整个作战链条中,舰载机着舰是最重要环节,也是事故率最高的环节。着舰数据链能力是影响舰载机着舰规模、密度和安全性的重要因素,对舰载机着舰安全性和航母效能发挥具有重要意义。

美国是世界上最早实现舰载机航母起降的国家,先后实现了舰载机人工目视着舰、半自动着舰和全自动着舰,期间积累了丰富的应用和研制经验。随着航母、舰载机及引导技术的发展,为满足其不同信息的传输需求,美国选用和改进了多种战术协同链作为着舰数据链,由原始的目视着舰不需要着舰通信链路发展至单向广播数据链,最后采用具有低时延、高安全性的战术目标瞄准网络技术(Tactical

* 收稿日期:2016-01-25;修回日期:2016-04-12 Received date:2016-01-25; Revised date:2016-04-12

** 通信作者:qghong@sh163.net Corresponding author:qghong@sh163.net

• 591 •

Targeting Network Technology, TTNT), 进一步增强了舰载机着舰引导的范围、容量以及引导的实时性、可靠性和安全性。

本文在分析美国海军着舰引导系统及数据链发展趋势的基础上, 总结和讨论了其最新着舰数据链 TTNT 的技术特征, 并指出对我国着舰数据链的发展启示。

2 美军着舰数据链发展概况

美国海军从 20 世纪 30 年代开始实现舰载机着舰, 从早期的人工目视着舰到仪表半自动着舰, 再到现在的全自动着舰, 历经信号灯、菲涅尔光学助降镜、仪表着舰、着舰引导雷达、卫星引导等多种引导体制^[1]。随着航母、舰载机及引导技术的发展, 美国海军采用的着舰数据链也随之更新换代, 其链路的带宽、通信方式、时延、抗干扰、组网能力逐步加强, 主要包括 4A 号数据链(Link-4A)、GMSK-25 数据链、TTNT 等。美国海军着舰引导体制及对应数据链的发展总结如表 1 所示。

表 1 着舰数据链发展概况

Tab. 1 Development progress of landing datalinks

时间	体制	基本特点	采用数据链
1950 年前	信号灯 + 信号旗	靠驾驶员经验, 风险大	无
1952 年起	菲涅尔光学助降镜	作用距离短 (3 n mile)、易受风雨浓雾影响	无
20 世纪 80 年代末	ACLS: 着舰雷达 + 仪表着舰 + 塔康 + 菲涅尔光学助降镜 + 测速测距雷达	进近阶段需人工辅助、引导架数有限 2 架、引导距离有限 (10 n mile)、设备安装复杂、引导精度较低 m 级	着舰雷达需数据链单向 UHF 数据链 (Link-4A)
2014 年 (形成作战能力)	JPALS (卫星差分) + 测速测距雷达 + 费涅尔光学助降镜	引导范围广 (200 n mile)、不受恶劣天气影响、可引导多架 > 6 架、安装简易、引导精度高 dm 级	JPALS 需数据链先: 双向 U/V 数据 (ARC - 210) 后: 双向 L 频段数据链 (TTNT)

2.1 Link-4A 数据链

20 世纪 80 年代开始, 美国海军开始装备基于

雷达的全天候航母着舰系统 (All-Weather Carrier Landing System, AWCLS), 实现舰载机半自动着舰。该系统采用 Link-4A 数据链, 并专门开发了 V. 6 上行格式报文, 为航母提供雷达引导控制信息的单向广播^[2]。Link-4A 是一种舰空、空空数字通信的复合多功能数据链路, 主要用于提供空中交通管制 (Air Traffic Control, ATC)、空中拦截控制 (Air Intercept Control, AIC)、攻击控制、地面控制轰炸系统 (Ground Control Bombing System, GCBS)、母舰惯性导航系统 (Carrier Aircraft Inertial Navigation System, CAINS) 等应用, 兼顾自动舰载机着舰系统 (Automatic Carrier Landing System, ACLS) 应用, 主要装备于 F-4、F/A-18、E-2C 等平台。Link-4A 主要信号特征: 频率 225 ~ 399. 975 MHz; 频率间隔 25 kHz、100 kHz; 速率 5 kb/s; 调制方式为 2FSK; 工作方式时分多址 (Time Division Multiple Access, TDMA)。

Link-4A 用于 ACLS 时, 频率范围为 300 ~ 325 MHz, 频率间隔为 100 kHz, 采用单向通信方式, 仅上行传输自动着舰系统控制报文, 可同时控制两架飞机着舰。但由于技术体制所限, 其实时性、安全性、通信带宽、引导容量等不满足后续全自动着舰引导需求, 仅在 ACLS 系统中使用。

2.2 GMSK 数据链

为适应全军、多国联合等新的作战需求, 美军于 20 世纪 90 年代末提出发展具备全天候、易部署、高精度引导能力的联合精确进近着舰系统 (Joint Precision Approach and Landing System, JPALS)。其中海基的 SB-JPALS 可为舰载机提供广域大规模的通信、导航、监视和空管能力^[3], 应用概念如图 1 所示。该系统相对于 AWCLS 其引导距离、精度和部署便捷性等方面均有提升, 且在原有单一的进近引导能力基础上, 增加了远距归航引导、空中管制、舰/机编队状态监视等功能。相对 AWCLS, SB-JPALS 对数据链的通信距离、通信对象及规模、通信业务类型等也提出了更高的要求。十余年来, 美国海军已多次开展针对 F-18、F-35 等舰载有人机的 SB-JPALS 的机载/舰载集成设计或试飞验证, 主要采用 GMSK-25 数据链进行信息传输^[4]。舰载机从百公里以外发现航母确认着舰装置状态, 与附近其他舰载机交互飞行状态, 并跟随时刻变动的引导航线和理想下滑航线, 在不断摇晃的着舰甲板上安稳着舰。整个过程中, 着舰

数据链将众多舰载机和航母有机地连为一体,实现监视、导航数据及空管、引导指令的交互。

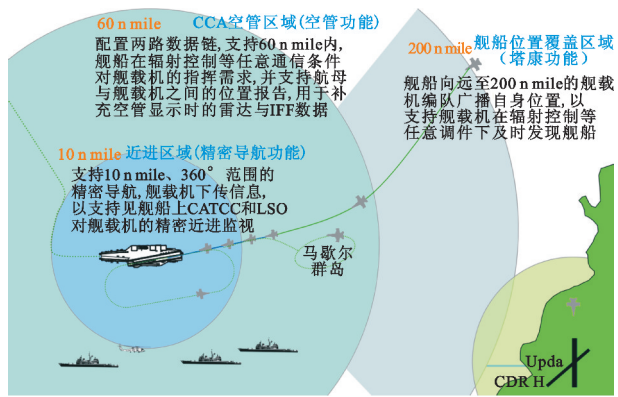


图 1 SB-JPALS 通信概念

Fig. 1 Communication concept of SB-JPALS

GMSK-25 数据链具备双向通信能力,波形功能嵌入现有的 ARC-231、ARC-210 等系列电台设备,外形如图 2 所示。GMSK-25 数据链主要信号特征:频率 225 ~ 399.975 MHz;频率间隔 1.2 MHz;通信速率 1 Mb/s;调制方式为 GMSK;通信方式为单向广播、点对点半双工等;组网协议为 TDMA。

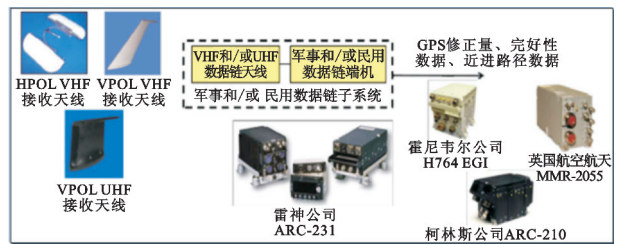


图 2 美国 GMSK-25 数据链天线及终端

Fig. 2 GMSK-25 datalink antenna and terminal

2.3 TTNT 数据链

美海军分别于 2011 年和 2013 年对 X-47B 舰载无人作战飞机进行了全自动着舰的陆基和海基验证,成功验证了舰载无人机 SB-JPALS 的精密进近着舰能力^[5]。

舰载无人机由于无人特性,为保障其着舰安全性,相对有人机,与航母的接口需求将新增或修改 60%。舰载无人机着舰通信需求的特殊性主要体现在^[6-8]:第一,有人机获取舰面引导信息后,主要依靠舰载机本机进行着舰状态控制和监视,而无人机

自动控制着舰后,需将载机平台、载荷及着舰状态反馈回舰面以实时进行必要干预,导致通信流程及通信内容增加,由此对着舰数据链的低时延和带宽要求更高;第二,为防止无人机编队内碰撞,舰载无人机着舰通信时,需实时获取本机/编队位置、规模及状态,由此要求舰载机同时具有点对点、广播及组网通信能力;第三,为保证广域范围内多成员入网的灵活性及无人机返航至着舰各阶段引导的平滑性,要求着舰数据链具有动态组网和远距通信能力;第四,美国新型航母上着舰指挥官、雷达引导控制室、空管控制中心等指挥机构间的内部通信网络,均采用基于 IP 的通信方式,若将舰载机作为 IP 节点,将使舰载无人机更有效地融入航母作战编队,由此着舰数据链最好具有支持 IP 的通信能力。此外,舰载无人机对着舰数据链的安全性、可靠性具有更高的要求,面临舰船上复杂的电磁环境,需具备更强的低截获/低探测及抗干扰能力。鉴于上述无人机着舰的特殊要求,柯林斯公司于 2011 年经基于 ARC-210 的 X-47B 着舰传输需求适应性分析,最终提出采用 TTNT 为 X-47B 着舰提供 SB-JPALS 信息传输。

TTNT 数据链主要信号特征^[9]:频段为 L 频段;体制为自组织组网;支持 IP 能力(基于 IP);低时延通信能力强;高吞吐量(全网 10 Mb/s);抗干扰能力强;具有低截获/低探测能力;支持高动态条件的可靠通信。

为提升舰载机着舰的安全性和便捷性,美国海军持续更新了航母着舰引导系统,且随着无人舰载机的加入,对着舰数据链的功能性能也逐步提升,先后选择了 Link-4 数据、GMSK 数据链、TTNT 数据链。图 3 对 3 种链路的主要功能性能进行了总结,对比发现:TTNT 数据链通信带宽达 2 Mb/s,可实时传输更多的业务量,且时延低至 2 ms,能更好地满足无人机着舰对实时性的高要求;采用 ad hoc 组网,可支持随遇入网,增强舰载机进入航母着舰网络的灵活性;且 TTNT 采用更新的通信技术体制,提升了抗干扰、安全性等,保障着舰数据链通信的可靠性。上述 TTNT 的功能性能特点使其成为舰载无人机着舰的优选数据链。此外,该数据链的上述特性也适用于作战飞机编队协同作战、空中加油等通信应用,美国海军、空军已安装并验证了该数据链的上述能力。

	LINK4A	GMSK-25	TTNT
通信频段	UHF:225~399.975	V/UHF:108~399.975	L:1350~1850
通信带宽	3.06 kb/s	1 Mb/s	2 Mb/s
时延	不详	200 ms	2 ms
协议	指令/响应	TDMA轮询	ADHOC自组网
调制方式	FSK	D8PSK/GMSK	GMSK
通信方式	单项广播	单项广播、点对多点/点对点半双工	单项广播、点对多点/点对点全双工
抗干扰	差	一般	强
高动态	差	一般	强
安全性	差	一般	强

性能逐渐增强

图3 美国主要着舰数据链能力总结

Fig. 3 Capability summarization of US main carrier aircraft landing datalinks

3 美军着舰数据链技术发展趋势

为提升舰载机着舰安全性和航母战斗力,美国海军不断研发更新着舰引导体制,增强了舰载机着舰的安全性、规模和频次,由此要求着舰数据链能兼顾多种机型、多种引导体制、多业务传输能力。此外,由于无人机舰载机的加入,对着舰数据链的通信距离、实时性、可靠性、抗干扰能力等提出了更高的要求,其通信方式也由单一的航母单向广播,增加为舰-机双向交互、舰-机编队组网、无人机群编队广播等多种方式。美军 X-47B 全自动着舰演示验证采用了 TTNT 数据链,该数据链在低时延、吞吐量、可靠性等方面表现出了显著优势,既能保障数十架舰载无人机着舰时所需的广域灵活组网、抗干扰、可靠性、多引导体制、多业务适应性等通信需求,还可兼容并提升现有舰载有人机着舰能力,极具代表性地说明了未来数据链的发展趋势。鉴于其广泛的应用潜力,研究其技术特征为后续我国着舰数据链发展,具有一定借鉴意义。

3.1 低时延传输技术

TTNT 波形设计集成了先进的码分、跳时和跳频多址技术^[10],支持网络多个用户并发数据,并且在本地进行数据接收的同时可以进行数据发送,可有效保障舰船对多架舰载机的实时同步引导。TTNT 信道接入协议采用基于优先权统计的方式^[11],对应用层的数据包进行优先级分类,产生一定时间窗口的信道占用统计,通过将信道占用率控制到预设的门限值,提供舰船姿态、复飞指令等高优先级业务的可靠、低时延传输保证,与传统的时分、码分系统相比,具有极低的排队等待时延。TTNT 建网时,

在网络发现、入网认证、建立路由阶段采用了专门的减少时延设计,实现快速组网^[12]。此外,TTNT 在硬件设计时,其节点采用多套独立的接收、发送处理装置^[13],收发信息在各自的相邻链路上进行传输,之间互不干扰,能够快速实现数据分发,保证舰-机引导、舰载机编队状态感知时所需的低时延多路同时接收和全双工工作能力。

3.2 多成员大容量通信技术

TTNT 采用 GMSK 高速调制/解调技术^[14],信号频谱紧凑,带外抑制能力强,具有优良的功率和频谱利用率,有利于扩展通信距离和提高通信带宽,可有效保障着舰归航引导远距通信能力和精密进近时的多体制、多业务、大容量通信需求;采用基于优先权统计的信道接入协议和收发工作优先级管理,可以最大化网络吞吐量和成员节点数,有效支持数十甚至上百架舰载机编队的返航、空管监视、导航引导的广域大规模引导需求。

3.3 抗干扰高可靠传输技术

TTNT 波形设计时采用最优化的二维时频序列,多用户脉冲在时频面上随机分布,并采用功率/速率动态调整技术^[15],可降低多用户间自干扰的同时,提高信道利用率,降低敌方截获概率,防止敌方释放有意干扰。此外,TTNT 采用改进的 Turbo 编解码方法,纠正突发错误能力强,编解码效率高,有效增强了传输可靠性。并采用先进的 ad hoc 无线网络结构和信道接入协议,对网络进行分布式无中心控制和资源分布式动态分配,使网络具有更强的自愈性和互联性。上述技术保障了飞行引导指令等关系飞行安全信息的高可靠传输,进一步增强了着舰安全性。

3.4 基于 IP 的多业务传输技术

TTNT 采用 IP 协议体系结构,具有路由概念,数据传输方式灵活,网络中信息流向不确定,使用户能够灵活快速共享网内信息,有利于舰载有人机、舰载无人机等多类舰载机编队有效融入航母指挥引导系统。而常规数据链业务流向确定,信息共享只针对特定用户。此外,TTNT 支持 IP 协议报文传输,相对常规数据链应用比较单一,只能针对特定的应用,传输特定含义的格式化信息的局限性,可以承载任何种类的信息格式和应用,有利于着舰时指令、视频、图像、数据、语音等多业务数据的传输。

3.5 动态自适应组网技术

TTNT采用ad hoc无线网络结构、网络快速建立与入网、自组织路由等技术^[16],实现多平台动态快速建网。网络没有严格的控制中心,网络结构扁平化,用户终端兼具路由器和主机两种功能,节点关系对等,覆盖面大,应用扩展性强。各节点通过广播自组织路由协议,实现快速发现邻节点、入网和退网,不用预先设计网络。网络采用加密、入网认证、防重放、篡改、网络攻击感知、密钥分离等多种方式确保网络安全。上述技术使得归航舰载机编队入网灵活,可保障其在机动性强、运动速度快、网络拓扑变化快等情况下稳定有效地融入着舰引导网络。

4 发展启示

为保障舰载机着舰的安全性、便捷性和高效性,未来舰载机着舰将朝着引导控制自动化、编队规模扩大化、引导距离扩展化、引导手段多体制化等方向发展,其着舰通信能力也将由单一雷达引导信息传输发展为卫星、视觉、雷达等多体制引导信息、空管信息、监视信息、指挥机构引导指令等多业务传输,传输距离也将由着舰引导覆盖范围扩展到归航、空中管制、复飞等区域,通信成员也将由2~3个扩大到数十甚至上百架,通信方式也将由单一舰船单向广播扩展到舰-机间、机-机间的双向交互及组网通信,且随着无人舰载机的加入,着舰数据链的通信时延、可靠性、抗干扰能力等需求进一步提升。因此,后续重点关注和研究的方向主要包括以下三个方面。

(1) 加强需求分析,完善舰-机通信系统架构

基于当前及未来舰载有人机/无人机着舰需求,充分分解舰载机着舰流程,全面梳理舰载机与舰面指挥控制系统、引导系统的交互关系,提出新型着舰数据链需求,并结合现有通信数据链能力,构建完善的基于多链的舰载机-航母通信架构。

(2) 重视着舰数据链技术开发,提升舰载机着舰通信功能及性能

基于舰载有人机/无人机着舰通信需求,根据航母及海面电磁环境及信道特性,开展着舰数据链低时延、可靠性增强、抗干扰、动态快速组网等技术研究,以确保舰载机实时有效融入航母作战网络。

(3) 开展平台接口设计,制定消息标准

着舰数据链作为舰载机-航母间、舰载机编队

间的传输通道,需分别与航母、舰载机开展平台接口设计。机上交联单元与载机平台类型有关,主要包括任务计算机、飞控、导航传感器等;航母平台交联单元多关系复杂,舰载机需通过着舰数据链端机与航母指挥控制单元、引导单元、空管机构完成数据和指令交互。此外,为实现对上述多类业务的传输,需制定标准化的消息传输格式,规范消息传输结构、优先级、刷新率、时延等,保障各类信息实时可靠到达。

5 结束语

在使用需求和技术发展的双重驱使下,未来舰载机大规模应用全自动着舰技术的趋势日益显现,且随着各类无人舰载机装备的应用和发展,将在有人机基础上引入更多的着舰通信需求,涉及的引导体制、舰机接口及技术攻关问题均有待进一步深入研究。现有相关领域论文主要对单个着舰引导体制或数据链技术进行研究,本文结合着舰引导及应用需求的发展,提出了着舰数据链的发展趋势,并分析了满足上述新型着舰通信需求,数据链体制的设计思路及解决方法,对我国着舰数据链体制及应用发展具有一定的实际参考价值。

参考文献:

- [1] PETERSON B R, PULLEN S, PERVAN B, et al. Investigation of common architectures for land- and sea-based JPALS[C]// Proceedings of the 18th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2005). Long Beach, CA: Institute of Navigation, 2005: 26-37.
- [2] 冉建华. 数据链与飞机着陆系统的历史和前景[J]. 舰船电子工程, 2009, 29(4): 39-42.
RAN Jianhua. Review and foreground of data link technology and aircraft landing system[J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(4): 39-42. (in Chinese)
- [3] EASLER B. Joint precision and approach landing system (JPALS) program overview[EB/OL]. [2015-12-20]. <http://www.docin.com/p-304206789.html>.
- [4] STEVENS J, PIERCE B. Land-based JPALS technical overview[C]// Proceedings of AFCEA CNS/ATM 2011. Orlando, FL: Naval Air Traffic Management Systems Program Office, 2011: 1-25.
- [5] COLBY G. Communications, navigation and air traffic control for unmanned combat aviation[M]. Washington DC: Navy UCAV Technical Support Team, 2011.
- [6] JOVAN D. An autonomous carrier landing system for un-

- manned aerial vehicles[C]//Proceedings of 2009 AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Chicago, Illinois; AIAA, 2009; 1-5.
- [7] CROSS R L. Method and apparatus for multiple input diversity decoding; USA, US6995693[P]. 2006-02-07.
- [8] 李桂花. 外军无人机数据链的发展现状与趋势[J]. 电讯技术, 2014, 54(6): 851-856.
- LI Guihua. Status and trend of foreign military data link for unmanned aerial vehicles[J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(6): 851-856. (in Chinese)
- [9] DAVIS G. "Future applications and missions for airborne early warning platforms" considering network-centric collaborative targeting[C]//Proceedings of 2009 AEW and Battle Management Conference. Amsterdam, NL; IEEE 2009; 1-5.
- [10] FRANK R J. Dynamic Socket Waveform; USA, US7733839[P]. 2010-06-08.
- [11] GHANADAN R, TUFANO P, HSU J, et al. Flexible access secure transfer (FAST) tactical communications waveform for airborne networking[C]//Proceedings of 2008 IEEE Military Communications Conference. Atlantic, NJ; IEEE, 2008; 1167-1173.
- [12] HERDER J C. Method and architecture For TTNT Symbol Rate Scaling Modes; USA, US7839900[P]. 2010-11-23.
- [13] United States Government Accountability Office. Spectrum management: better knowledge needed to take advantage of technologies that may improve spectrum efficiency[R]. Washington DC; US Government Accountability Office, 2004.
- [14] 冯彬. 一种新型 IP 数据链网络路由算法模型[J]. 电讯技术, 2012, 52(6): 992-996.
- FENG Bin. A new routing algorithm model for IP data link network[J]. Telecommunication Engineering, 2012, 52(6): 992-996. (in Chinese)
- [15] PIZZI S V. A routing architecture for the airborne network[C]// Proceedings of 2007 IEEE Military Communications Conference. Orlando, FL; IEEE, 2007; 1-7.
- [16] 张基晗. 基于 TTNT 的无人机机载通信系统仿真研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- ZHANG Jihan. Research and simulation of The UAV's onboard communication system based on TTNT[D]. Chengdu; University of Electronic Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)

作者简介:



钱国红(1968—),男,江苏吴江人,1992年获工学硕士学位,现为高级工程师,主要从事航空装备论证方面的工作;

QIAN Guohong was born in Wujiang, Jiangsu Province, in 1968. He received the M. S. degree in 1992. He is now a senior engineer. His research concerns aviation equipment demonstration.

Email: qghong@sh163.net

顾海燕(1985—),女,四川绵阳人,硕士,工程师,主要从事航空通信与导航方面的研究。

GU Haiyan was born in Mianyang, Sichuan Province, in 1985. She received the M. S. degree in 2011. She is now an engineer. Her research concerns aviation communication and navigation.