

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.05.020

引用格式: 芮锡. 无人作战飞机射频传感器系统隐身技术发展思考[J]. 电讯技术, 2015, 55(5): 580-584. [RUI Xi. Stealth Technology for RF Sensor System of UCAV: Development and Thought[J]. Telecommunication Engineering, 2015, 55(5): 580-584.]

无人作战飞机射频传感器系统隐身技术发展思考^{*}

芮 锡^{**}

(中国西南电子技术研究所, 成都 610036)

摘 要: 从无人作战飞机的发展和国外无人作战飞机的隐身技术发展出发, 分析了国外典型无人作战飞机射频传感器系统综合隐身特点, 讨论了射频传感器系统的雷达隐身、辐射隐身及有源对消技术的内涵, 总结了其关键技术特点, 最后, 给出了技术发展趋势。相关内容可供无人作战飞机射频传感器顶层隐身设计参考。

关键词: 无人作战飞机; 射频传感器系统; 雷达隐身; 辐射隐身; 有源对消

中图分类号: TN011 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2015)05-0580-05

Stealth Technology for RF Sensor System of UCAV:
Development and Thought

RUI Xi

(Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China)

Abstract: Starting with the development of Unmanned Combat Aerial Vehicle (UCAV) and the stealth technology of foreign UCAVs, this paper analyzes the stealth characters of Radio Frequency (RF) sensor system of foreign UCAVs, discusses the concepts of different stealth technologies, summarizes the key points and gives the development trends. The research in this paper can provide a reference for the top level design of RF sensor stealth problem of UCAV.

Key words: unmanned combat aerial vehicle; RF sensor system; radar stealth; radiation stealth; active cancellation

1 引 言

随着技术的发展及军事任务需求的拓展, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)广泛应用于军事领域, 被赋予的功能越来越多, 并且逐步开始携带武器, 执行作战攻击任务, 由此产生了无人作战飞机(Unmanned Combat Aircraft Vehicle, UCAV)^[1]。2001 年 6 月, 美军给“捕食者”无人机加装了“地狱火”导弹, 使其具有侦察攻击双重功能, 并于 2001 年 10 月 17 日在阿富汗首次实施了“捕食者”的直接对地打击, 开创了无人机直接进行作战的先河。正是无人机在近几次局部战争中的广泛使用与优异表现, 掀起了世界范围内无人作战飞机的研究热潮。

无人作战飞机装备快速发展的同时, 面临的预警、探测、干扰及拦截威胁也越来越严峻, 生存能力和作战能力受到了严重影响。这些威胁在空间上分布于空中、地面/海面, 在预警及探测手段上有预警雷达、火控雷达、电子支援措施、光电探测器等, 在干扰手段上有有源干扰、无源干扰、伪装诱骗等, 在拦截手段上有反辐射导弹、空空导弹等。为提高无人机的生存能力和作战能力, 无人作战飞机的综合隐身能力得到了高度重视和快速发展。目前, 世界上拥有无人机的国家和地区已超过 32 个, 但这些无人机的隐身能

^{*} 收稿日期: 2014-09-28; 修回日期: 2015-04-24 Received date: 2014-09-28; Revised date: 2015-04-24

^{**} 通讯作者: 654944155@qq.com Corresponding author: 654944155@qq.com

力参差不齐,真正具有高隐身水平的还是以美国为代表的无人机,欧洲国家也正在不断研制^[2]。

本文对国外无人作战飞机隐身技术的发展进行介绍,并分析其综合射频隐身的特点及关键技术,以期为该领域研究人员提供参考。

2 国外 UCAV 隐身技术的发展

无人作战飞机的核心隐身能力主要有雷达隐身、辐射隐身。飞行器平台自身的隐身能力已经被广泛研究和报道。随着无人机功能的扩展,无人机的传感器系统功能越来越强大,其性能成为无人机综合性能的重要组成部分,尤其是 UCAV 的通信链路、导航链路、探测侦察等任务载荷对无人机的综合隐身有极重要的影响。本文重点论述 UCAV 射频传感器系统的综合隐身技术,主要从传感器系统的雷达隐身、辐射隐身、有源对消分别展开,分析综合隐身的技术措施内涵、技术发展特点以及技术展望,可供 UCAV 综合隐身设计时参考。

无人机的综合隐身主要包括了雷达隐身、辐射隐身、红外隐身,而射频传感器系统主要参与了雷达隐身及辐射隐身。为了提高 UCAV 的综合隐身性能,国外投入了很多的资源,对其射频传感器系统进行隐身设计。

美国诺·格公司正在研究的“X-47”无人机是一款高水平的隐身作战无人机,目前正在研发的主要有“X-47A”及“X-47B”两款 UCAV,其配备的航空电子设备均属高度保密,据报道 X-47B 上下各采用了 8 副天线实现全空域覆盖。从外观上看,X-47 系列的飞机机体表面光滑,没有任何凸起,与传统的无人机相比,其天线实现了共形隐身设计。并且美军已经对其传感器辐射特性做了相应的链路隐身设计,降低了平台自身被探测和截获的概率。

美军除了研制新型的隐身 UCAV 之外,对现有的 UCAV 也做了隐身的升级,最具代表性的就是“捕食者”C 型无人机。“捕食者”系列的 UCAV 是美军装备最多的 UCAV 之一,从 A 型到 B 型,并没有强调隐身性能,但是从 C 型开始,从平台自身的外形及其天线的共形设计、传感器辐射隐身的专门设计,都表明该 UCAV 具备了相当高的综合隐身水平。

欧洲几个国家也联合开发了“神经元”UCAV 技术验证机,从该机型的外形看,和 X-47 无人机很类似,机身表面没有任何凸起物,天线都进行了共形隐身设计,其传感器系统辐射的隐身设计未见报道,但是可以肯定的是该无人机具备很高的隐身性能。

目前国外很多先进的隐身无人机其传感器天线

具体隐身技术尚未公开,但从现役的 F-22、F-35 等机载天线来看^[3-4],国外无人机天线的隐身技术的技术成熟度至少达 8 级以上,主要的隐身技术措施有天线孔径综合设计技术、共形天线技术^[5-7]、频率选择表面(Frequency Selective Surface, FSS)技术和低截获概率(Low Probability of Interception, LPI)技术^[8-9]。

总之,国外无人作战飞机传感器系统隐身技术从理论研究、仿真分析、试验验证到工程应用等方面均处于领先地位,目前已经大量应用于各型无人作战飞机上^[10-12],其技术优势主要体现在以下几个方面:

- (1)隐身技术全面平衡发展,没有隐身短板存在;
- (2)隐身技术成熟度高,隐身材料等种类多,应用广泛,设计能力出众;
- (3)具有较好的测试评估体系及测试评估条件。

3 UCAV 传感器系统综合隐身技术

未来多维的信息化战场上,空间军事卫星、空中预警机、地面预警系统不断完善,雷达探测威胁和无源探测威胁愈加严重,战场环境愈加透明,不具备隐身能力的 UCAV 将无法生存和完成作战任务。威胁类型的多样性导致了隐身需要多元发展,目前的隐身技术主要以射频隐身技术为主,包括雷达隐身技术、辐射隐身技术、有源对消技术。在雷达隐身方面,无人机的雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)主要由平台自身的 RCS 和机载天线 RCS 两部分组成。为实现飞机高水平的雷达隐身,对无人机的雷达隐身和各种天线的雷达隐身都提出了严格隐身要求;同时在辐射隐身方面,无人机的主动辐射信号也成为了敌方无源探测系统的侦察对象,利用无人机辐射的信号可以对无人机进行发现、跟踪和攻击等,因此需要采用低截获的辐射隐身技术,提高辐射信号的隐身能力。

3.1 雷达隐身技术

威胁方雷达主动发射电磁波,照射到 UCAV 后的散射控制技术,也就是通常所说的雷达隐身技术。缩减 UCAV 威胁角域的 RCS 是雷达隐身的重要目标,单站雷达(接收天线和发射天线为一体)是目前最重要也是最主要的探测 UCAV 的传感器,也是目前 UCAV 面临的最主要的威胁^[13-14]。

3.2 辐射隐身技术

威胁方的无源雷达探测器接收 UCAV 平台的发射或者辐射的射频特征信号的控制技术,即通常

所说的辐射隐身技术。控制UCAV平台上的机载电子设备(雷达、数据链、通信、导航等)辐射信号被无源探测系统截获(探测、跟踪、识别)是辐射隐身的重要目标。更确切地说,就是在保证UCAV电子设备完成相应功能的前提下最大限度地降低辐射信号被截获的概率^[15]。

3.3 有源对消技术

有源对消技术是指机载有源射频发射装置,根据照射到UCAV上的电磁波频率、极化、入射方向、飞行姿态及UCAV产生的散射回波特性,主动地发射与散射回波幅度几乎一致但是相位相反的电磁波,从而与散射回波对消,实现理论上的“零散射”^[16],从而大大降低UCAV的等效RCS技术。要实现UCAV的主动有源对消,UCAV必须装载完备的目标散射回波特性数据库,同时侦收系统必须实时获取威胁雷达的发射雷达波的频谱、极化、入射方向等特性参量。根据分析可知,整个对消系统所涉及到的关键参数必须具备高度的精确性、实时性,才能达到隐身的目的,否则达不到目的,甚至还会恶化目标的隐身性能。

4 射频传感器系统综合隐身关键技术分析

4.1 雷达隐身技术

UCAV由于其自身的作战使命,需要具备隐身突防、隐蔽接敌的能力。随着雷达的技术发展,其探测能力及抗干扰能力都在不断的发展,主要体现在:

- (1)雷达阵面规模及探测功率越来越大,使得对相同的目标,其探测距离变远,对于固定的探测距离,其探测目标的RCS也越来越小;
- (2)雷达的抗干扰能力加强,使得传统的电子压制效能降低,对UCAV的威胁加大;
- (3)雷达的工作频段多样,尤其是在传统的C频段以上的雷达基础上,大量的低频段先进雷达不断涌现,使得UCAV的低频隐身短板暴露,成为UCAV雷达隐身的软肋;
- (4)雷达工作模式的变化,目前的雷达很少是单机工作,基本都处于联网状态,这就大大增强了雷达网络对隐身目标的探测能力。

因此,要发展UCAV,其雷达隐身依然是亟待解决的一个难点之一。UCAV的天线作为射频传感器系统的重要部分,其安装破坏了无人机光滑的机身表面,增强了飞机的散射回波。UCAV上有很多强散射源,射频传感器系统的天线作为一类散射源,其隐身水平不能完全决定UCAV的雷达隐身性能,但是不对

天线进行隐身设计,会恶化UCAV的隐身性能。

通过对X-47B无人机建模,仿真其在某频点上的全向RCS可知,UCAV在各个方向的RCS不一样,并不是在所有的角域都具备隐身性能。低RCS区域主要集中在低俯仰角区域,并且前向与后向的RCS比例向要好一些,而这些低RCS特性和UCAV的典型应用场景下的隐身需求是一致的。雷达隐身的重点考察区域如图1所示,方位面全向,俯仰面大约为 $\pm 10^\circ$ 。

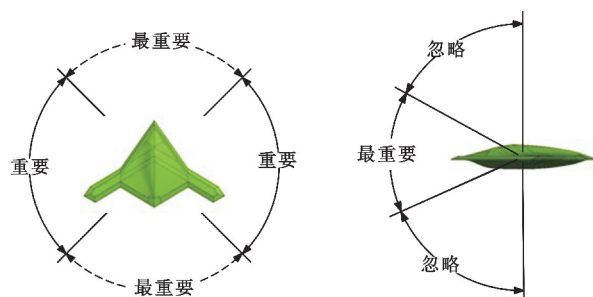


图1 UCAV方位面与俯仰面的雷达隐身需求
Fig.1 The radar stealth requirement of UCAV in azimuth plane and pitch plane

与有人机相比,为了保证无人机能同有人机相比拟,无人机平台上需要安装更多的获取信息态势的设备,UCAV可供安装载荷的空间相对狭窄,导致了UCAV机载天线的隐身面临的挑战比有人机更大。同时,UCAV天线数量多,隐身要求高,因此合理地分配指标,降低天线数量尤为重要。综上所述,无人机的天线隐身需要重点解决以下问题:

- (1)孔径综合化设计,降低孔径数目;
- (2)采用先进修形及材料技术,降低天线RCS^[6-7];
- (3)采用频率选择表面等技术,降低天线RCS^[17-18];
- (4)天线合理布局,使UCAV天线系统整体的辐射与散射特性达到最优化设计;
- (5)天线系统中的各个天线隐身指标合理分配,避免过高的隐身要求,过度提高天线设计难度和设计成本;
- (6)对UCAV机载传感器高性能要求导致了天线的辐射与散射平衡设计矛盾变得更加突出,需要重点解决,既要保证传感器功能,又要保证UCAV隐身性能。

4.2 辐射隐身技术

UCAV平台的辐射隐身性能基本由传感器系统的辐射性能决定,辐射性能的好坏直接决定UCAV

辐射隐身的好坏。此外,就隐身特征来说,不仅要求平台具有良好的雷达隐身,还要求其具备良好的辐射隐身能力,即要求UCAV的机载射频传感器在保证其自身任务性能的前提下尽量辐射低的射频能量和随机化的辐射特征,提高其辐射隐身能力,从而提高生存能力和作战能力。这就要求对射频传感器进行充分的辐射隐身设计,并通过有效的资源调度管理、模式控制,实现优良的辐射隐身能力。辐射隐身技术措施包括对空域、时域、频域和能量域的处理,提高辐射隐身性能^[13,15,19],分别简述如下:

(1)空域上,通过减少接收的空域范围获得隐身性能,如通过波束赋形处理、低主瓣宽带、抑制旁瓣等措施;

(2)时域上,通过增加发射的随机性或减少发射时间来获得隐身性能,如采用跳时抖动、压缩猝发等措施;

(3)频域上,通过载波频率的随机、不规则变化来获得隐身性能,如高速跳频使载波频率快速变化,变速跳频使跳频驻留时间随机变化;

(4)能量域上,通过降低发射信号的功率谱密度来获得低被截获性能,如采用功率控制,降低发送总功率;采用直接序列扩频来展宽发射频谱,降低频谱密度;

(5)传感器系统辐射隐身,UCAV单平台有很多射频传感器,平台内部、平台之间射频传感器可以通过统一的协调管理,使得对外辐射信号特征被截获概率最小,因此研究UCAV系统级的辐射隐身十分有意义,也十分重要。

4.3 有源对消技术

飞行器的隐身遇到的一个共同问题是:目标在低频段雷达隐身需求越来越强烈,单飞行器的低频段雷达隐身设计难度大。主要原因是飞行器在低频段处于谐振频段范围,适合高频的隐身外形设计方法在低频失效,吸波材料在低频段范围内几乎没有吸波效果。目前具备很高可行性的是采用有源对消技术,通过降低威胁方雷达接收的回波能量降低目标RCS。

如图2和图3所示,对于某典型UCAV,可以看到其UCAV的低频与高频RCS曲线具备以下特征:

(1)方位面RCS只在局部角域比较低,在部分角域RCS在10 dBsm以上;

(2)RCS峰值角域宽度相对比较宽,在10°左右,与高频时RCS不同(如图3所示),峰值区RCS在雷达隐身中不可忽视;

(3)RCS幅度变化较高频RCS缓慢很多。

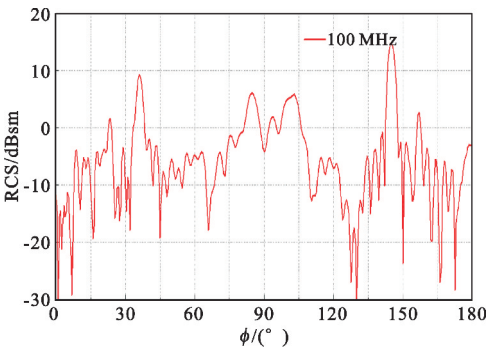


图2 典型UCAV雷达隐身特性曲线(VHF频段)
Fig.2 The radar stealth character of typical UCAV (VHF band)

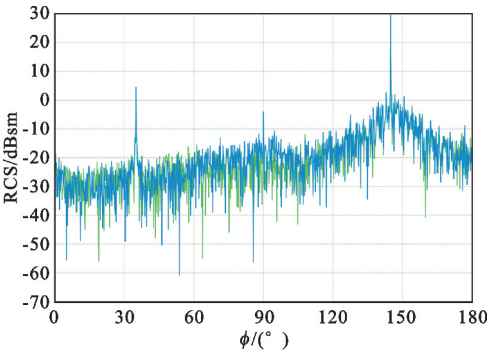


图3 典型UCAV雷达隐身特性曲线(X频段)
Fig.3 The radar stealth character of typical UCAV (X band)

鉴于上述特点以及传统雷达隐身技术在低频段失效,可以采用有源对消技术,减弱低频段UCAV的RCS。

有源对消技术关键技术主要涉及雷达来波信号参数的实时/精确测定:主要包括雷达波的频率、相位、幅度、波形、极化、雷达方位这些参数;UCAV的回波特性数据库:就是飞行器的RCS数据库,针对不同来波频率、极化、主要威胁角域、精确的飞行器的RCS数据库;高性能实时处理:由于雷达波是光速传播,因此要求整个有源对消系统需要具备高速处理能力,具备高实时性;对消场的精确控制:有源对消系统需要精确控制欺骗回波,例如当欺骗回波信号相对幅度较弱或者幅度相位变化比较快的时候,精度影响对隐身性能影响更显著。

5 UCAV 射频传感器隐身技术发展趋势

5.1 UCAV 传感器系统综合隐身需平衡发展

由于威胁种类多,敌方的反隐身只需要突破某一种,就可以阻击UCAV。因此,UCAV的隐身需要综合平衡发展,防止出现隐身技术不全面,出现所谓的“短板效应”。综合平衡发展主要体现在两个方面:一是UCAV目前重点考虑雷达隐身和辐射隐身,两种隐身性能大致相当,偏向某一种隐身会造成

UCAV 综合隐身性能降低;二是为了保证 UCAV 的雷达隐身性能和辐射隐身性能,需要折衷考虑、平衡发展,例如天线的辐射与散射平衡设计等。

5.2 UCAV 传感器系统综合隐身未来发展趋势

UCAV 综合射频传感器系统作为射频信号的发送和接收者,其雷达隐身和辐射水平对 UCAV 平台的综合隐身能力影响巨大,亟待开展相关研究,提高其综合隐身性能,进而提升 UCAV 的隐身性能。目前,无论是在役的 UCAV 还是未来的 UCAV,其传感器系统的综合隐身一直是发展的热点和重点。未来 UCAV 的发展,隐身依然是最重要的考虑要素,具体体现在:

- (1)隐身类型要求更多(声隐身、可见光隐身、双站、多站隐身等);
- (2)隐身水平要求更高(隐身范围、量值、频段等);
- (3)隐身的综合平衡性要求更高(多种隐身技术综合平衡发展);
- (4)隐身性能与其他性能(传感器功能性能、气动性能、体积、重量、功耗、成本、可靠性等)矛盾更加突出,需要综合考虑,平衡发展。

参考文献:

- [1] Cheng S W. Rapid Deployment UAV[C]//Proceedings of 2008 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2008:1-8.
- [2] 郭莎莎. 无人作战飞机[J]. 航空电子技术,2011,42(4):50-55.
GUO Shasha. Unmanned combat aircraft[J]. Avionics Technology,2011,42(4):50-55. (in Chinese)
- [3] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京:航空工业出版社,2013.
SANG Jianhua. Low - Observable Technologies of Aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press,2013. (in Chinese)
- [4] 罗巧云. 美军 F-22 的先进航空电子系统[J]. 电讯技术,2006,46(6):7-12.
LUO Qiaoyun. The Advanced Avionics System of F-22 [J]. Telecommunication Engineering, 2006, 46 (6) : 7 - 12. (in Chinese)
- [5] Josefsson L, Persson P. Conformal Array Antenna Theory and Design[M]. Hoboken, New Jersey:IEEE,2006.
- [6] Pan W B, Huang C, Chen P, et al. A Low-RCS and High-Gain Partially Reflecting Surface Antenna [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2014,62(2):945-949.
- [7] Genovesi S, Costa F, Monorchio A. Wideband Radar Cross Section Reduction of Slot Antennas Arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2014,62(1):163-167.
- [8] Govoni M A, Li H B, Kosinski J A. Low Probability of Interception of an Advanced Noise Radar Waveform with Linear-FM[J]. IEEE Transactions on Aerospace and E-

- lectronic Systems,2013,49(2):1351-1356.
- [9] Nguyen L K, Blanco M A, Sparace L J. On the Sensitivity of Wideband Radiometric Detection for Low Probability of Intercept and Probability of Detection (LPI/LPD) in Frequency Hopped Systems[C]//Proceedings of 2013 IEEE Military Communications Conference. San Diego, CA: IEEE,2013:817-822.
- [10] 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(3):209-214.
SANG Jianhua, CHEN Yilin. Air Vehicle RF Stealth Technology in Evolution[J]. Aeronautical Manufacturing Technology,2011(3):209-214. (in Chinese)
- [11] 朱良成,张丽星,张红霞. 飞行器射频隐身技术的发展与应用[J]. 航空科学技术,2010(3):209-214.
ZHU Liangcheng, ZHANG Lixing, ZHANG Hongxia. Application and Development on RF Stealth of Aircraft[J]. Aeronautical Science and Technology, 2010 (3) : 209 - 214. (in Chinese)
- [12] David B. In Valleys of shadow II-The Black World of Stealth[J]. Air International,1995(S1):148.
- [13] David L J. Introduction to RF Stealth[M]. North Carolina: SciTech Publishing Inc. ,2004
- [14] Knott E F, Shaeffer J F, Tuley M T. Radar Cross Section [M]. Raleigh, NC, USA: SciTech Publish,2004.
- [15] Forest J R. Technique for low probability of LPI radar signal[M]. Asheville, NC: MAST,1983.
- [16] 梁百川. 有源隐身技术研究[J]. 舰船电子对抗, 2004,27(1):3-6,16.
LIANG Baichuan. Study on Active Stealth Techniques [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2004, 27 (1) :3-6,16. (in Chinese)
- [17] 刘斌,刘晓春,孙世宁,等. 基于频率选择表面(FSS)技术的微小卫星隐身天线罩设计[J]. 宇航学报, 2011(9):2009-2014.
LIU Bin, LIU Xiaochun, SUN Shining, et al. Radome Design Using Frequency - Selective - Surface (FSS) Technique for Radar-Stealth Minisatellite[J]. Journal of Astronautics,2011(9):2009-2014. (in Chinese)
- [18] Turpin J P, Sieber P E, Werner D H. Absorbing FSS ground plane for reduced-Radar Cross Section of conformal antennas[C]//Proceedings of 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Orlando, FL: IEEE,2013:464-465.
- [19] Simon M K, et al. Spread Spectrum Communications Handbook[M]. New York: McGraw Hill,1994.

作者简介:



芮 锡(1983—),男,江苏溧阳人,博士,高级工程师,主要研究方向为航空电子、辐射与散射、天线系统。

RUI Xi was born in Liyang, Jiangsu Province, in 1983. He is now a senior engineer with the Ph. D. degree. His research concerns avionics, radiation and scattering, antenna system.

Email:654944155@qq.com