文章编号:1005-6122(2022)05-0015-07 DOI:10.14183/j.cnki.1005-6122.202205003

特邀文章

空基平台一体化阵列天线技术综述*

胡明春[1,2]

(1. 天线与微波技术重点实验室,南京 210039; 2. 中国电子科技集团公司第十四研究所,南京 210039)

摘 要: 随着全空域内通讯探测需求的不断拓展,各式空基传感器载体平台纷纷涌现,对阵列天线在载体平台的集成技术提出了前所未有的挑战。为最大限度利用载体平台资源,提升平台整体效能,天线与平台的设计逐渐深度耦合,最终形成了“载荷平台一体化阵列天线”的技术概念。文章全面梳理了载荷平台一体化天线的技术需求、演进路线,并从新体制阵列设计与验证、天线设计与集成、材料工艺体系,以及系统鲁棒性优化等方面详细论述了关键技术与发展方向。希望对载荷平台一体化天线技术的发展与工程化应用起到推动作用。

关键词: 空基载荷平台,阵列天线,平台一体化

A Review of Platform-Adapting Array Antennas for Air-Based Applications

HU Ming-chun[1,2]

(1. *Science and Technology on Antenna and Microwave Laboratory*, *Nanjing* 210039, *China*;
2. *The* 14*th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation*, *Nanjing* 210039, *China*)

Abstract: The demand for full space communication and detecting leads to the booming of variety of air-based carrier platforms, which challenges the integrating technologies of array antennas and carrier platforms. In order to fully use the aperture resources of the carrier platforms for property improvement, antenna and carrier platform should be designed deeply interactively, leading to the forming of the concept of the technology of platform-adapting array antenna. This paper introduces the origin and development of the platform-adapting array antenna for air-based applications, and then gives a discussion and related outlook on the key techniques such as array synthesis, antenna design and integration, manufacturing, and system robustness. This paper aims at promoting the development of the technology of platform-adapting array antenna.

Key words: air-based carrier platform, array antenna, platform adapting

引 言

随着人们对互联探测需求的不断提升,无线技术在海陆空天全方位渗透(如图 1 所示),一个立体的高密度的智能化网络逐渐形成。然而,目前的立体空间内,所需填补的无线平台的“生态位”对载体平台的外形、重量、环境适应性,以及可靠性等都提出了严峻的挑战,致使平台载荷设计面临极大困难。平台载荷的无线系统中,天线承担着电磁信号在自由空间与设备内部的场路转换的功能,是无线系统最前端的关键部件。天线的物理功能使其成为了系统内外的联系“窗口”,在结构上必然处于平台与外部环境的分界面,因此,天线与平台在结构外形上紧密耦合,天线的设计也必须兼顾电磁性能与结构承载能力。载荷平台天线一体化技术旨在将天线设计与平台载体设计深度融合,在全面整合平台资源的前提下寻求系统最大得益。优秀的载荷平台一体化天线设计将有助于全面提升无线平台的电磁与结构性能,在该技术领域的持续探索将会为无线探测系统带来更多可能性,为军用及民用市场提供更加灵活的解决方案。

1 技术演进

对于早期载荷中的无线系统,天线往往作为独立部件安装于平台上,其外形突出载体外壳,如图 2 中所示机载的杆状天线[1]。此类天线尽管能够完

* 收稿日期:2022-08-16

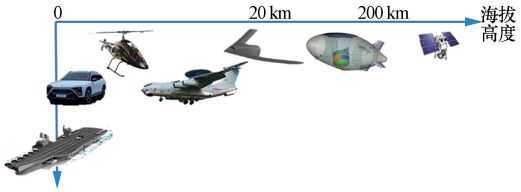


图 1 全空间无线平台分布



图 2 外悬式天线系统

成相应的电磁功能,但会在一定程度上影响载体平台的气动外形,对于载荷有限的载体平台而言,系统的机动性与续航能力会受到较大限制。

随着系统对波束的要求不断提升,载体平台需搭载大规模的天线阵列。与单个天线相比,阵列天线,尤其是相控阵天线,具有灵活的波束合成能力(窄波束与多波束)、高增益辐射以及快速扫描等优势[2]。但由于阵列天线口径巨大,往往需要外罩流形天线罩以减小对载体平台气动性能的影响。然而,流形天线罩的结构实现代价、气动性能损失仍然非常可观。图 3 给出了我国与其他几个国家典型的预警平台。



(a) 美国 E-3 (b) 以色列 Phalcon

(c) 瑞典 S-100B (d) 我国 KJ-2000

图 3 搭载保形罩覆盖的相控阵的机载预警平台

天线的共形化设计是目前载体平台发展的主流趋势。如图 4 所示,将天线阵列共形排布于载体平台的流形表面(如机头、机翼等区域),可以最大程度地保留平台原有的气动性能,提高机动性与续航能力。

美国军方早在上世纪 80 年代就提出了共形可承载天线技术的研究需求,力求在车载、舰载、机载领域实现天线的共形集成,即天线外形上融入载体蒙皮,结构上亦具有承载能力[3]。这样的天线系统也被称为“智能蒙皮”。目前智能蒙皮天线领域已

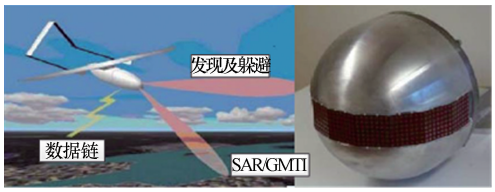


图 4 机载共形阵列

取得较大进展,多型可承载蒙皮天线已见诸报道[3-5]。然而,目前的智能蒙皮天线大多为单天线设计,阵列规模的蒙皮天线技术问题仍亟待解决。

随着探测需求对天线性能指标的逐步提高,载体平台对低频率(如 P 波段、UHF 波段)、大口径阵列天线的共形集成需求愈加迫切。由于天线尺寸与工作波长正相关,低频段天线阵列在尺寸上已与部分载体平台可比拟,蒙皮层级的集成已无法解决载荷的技术实现困难。在此条件下,载荷中的天线阵列与平台需要在结构设计上采取更深层次的耦合,即载荷平台一体化设计。在技术内涵上,载荷平台一体化阵列天线技术是智能蒙皮技术的演进方向,即天线不光“可承载”,而且必要时也是载体平台核心承力部件。载荷平台一体化阵列天线技术核心为“复用”,这既指天线本身兼具电磁与结构的双重功能,也指平台自身结构件兼顾天线实现与平台可靠性。如今,载荷平台一体化阵列天线技术方兴未艾,在充满机遇的同时也存在着大量挑战。

2 技术路线

不同的载体平台载荷能力不同,对载荷与载体平台的耦合程度要求也因之不同。因此,可以将载荷平台一体化天线技术分成如下三条技术路线:(1)结构轻度耦合路线;(2)结构深度耦合路线;(3)混合型技术路线。每种技术路线都有其最适合的阵列构架、布局,应结合具体探测需求(波束扫描范围、波束宽度以及增益等指标要求)合理选取。

2.1 结构轻度耦合路线

在该类技术路线中,天线尽管同时承担着电磁与结构双重功能,但天线与平台其他构件存在着较为清晰明确的结构边界。当天线与平台剩余结构接口确定后,天线仅需考虑自身性能在轻量化条件下的可实现性。较为典型的示例如图 5 所示,图中,机翼上下蒙皮均有一体化阵列天线,但天线与机翼结构骨架边界明确,各一体化天线分别独立集成加工后,可总装于机翼骨架上。又如美国高空长航时无人机,如图 6 所示,无人机载体平台主要为大翼展机翼,机翼上表面覆盖太阳能电池以满足续航要求,针

对该载体结构,天线主要集成于机翼前缘与下蒙皮,分别完成前向及对地的探测[6]。

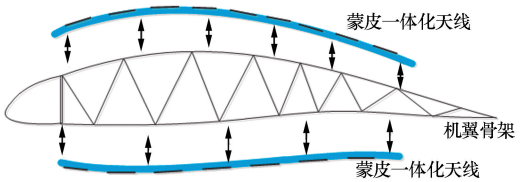


图 5　结构轻度耦合一体化天线示意

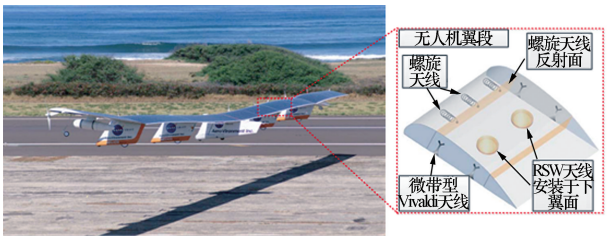


图 6　美国高空长航时无人机天线布局示意

从平台级设计角度而言,天线与平台在结构上轻度耦合,表明天线与平台在物理结构上复用率低,因此在飞艇等物理尺寸巨大、结构裕量大的浮空平台以及无需严格考虑气动外形设计的卫星平台等都可以采用该技术路线设计并集成天线阵列。

某卫星平台的天线阵列以薄膜的形式实现,如图 7 所示,辐射贴片及馈电网络均贴覆于 50 μm 厚的聚酰亚胺薄膜,易于折叠、展开,与平台边界清晰[7]。

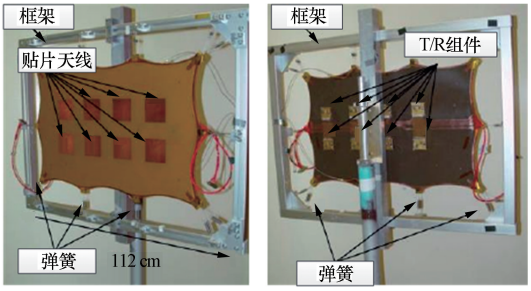


图 7　薄膜型相控阵

又如应用于临近空间的飞艇(美国防部先进项目研究局(DARPA)的 ISIS 项目),如图 8 所示,天线阵列位于飞艇中部,阵列本身具有柔性结构,可充气,能够为飞艇平台提供浮空的动力;天线阵列相对独立,与飞艇的其余部件界面清晰;天线可实现 360°范围内的全向波束扫描,采取 UHF 与 X 波段共口径设计;天线口径大、功耗低、轻量化;天线面密度仅为 2 kg/m^2[8]。

2.2　结构深度耦合路线

对于气动、续航时长等要求苛刻的载体平台,如

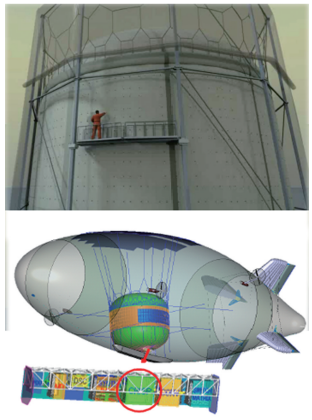


图 8　搭载相控阵的飞艇

战斗机、无人机等,天线与载体平台必须在结构上深度耦合,通过提高平台结构复用率,将载荷造成的气动性能损失与重量代价降至最低。特别地,为满足探测需求,天线工作频段较低,天线阵列尺寸已与机翼或机身可比拟,单独的机翼蒙皮天线或前缘天线已无法实现目标电磁功能,充分利用全部机翼结构实现天线集成势在必行。图 9 给出了低频天线与机翼在结构上深度耦合的示意方案,充分利用机翼骨架的筋、梁等结构部件,将其复用为天线的馈源、反射器及引向器,在适宜的金属化与非金属化处理下,机翼整体即为天线。在该种深度耦合的技术路线下,天线与平台无法简单拆分为独立模块,设计与仿真、测量与评估,以及制造与维护难度都较大。

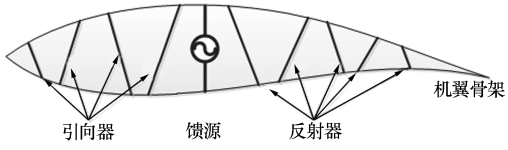


图 9　天线与平台深度耦合技术路线示意

在深度耦合的结构约束下,天线阵列的阵元将出现分布特异化、结构材料复杂化的特点,天线设计难度将急剧提升。但该技术路线下,天线阵列构架与排布将更加灵活,获得更加令人期待的探测效果。然而,由于技术难度较大,符合该技术路线的整机平台至今未见详细报道。

2.3　混合技术路线

混合技术路线指在同一载体平台内,对不同区域采取相应的最适宜的天线集成方式,以实现最佳系统得益。以美国的全球鹰无人机为例,机身机翼不同区域搭载了不同类型的天线,包括卫星通信天线、GPS 天线以及 SAR 天线等,如图 10 所示[9],不同区域的天线与机体集成方式不同,探测方式与范围也有所侧重,位于机头的天线为机械扫描式天线,

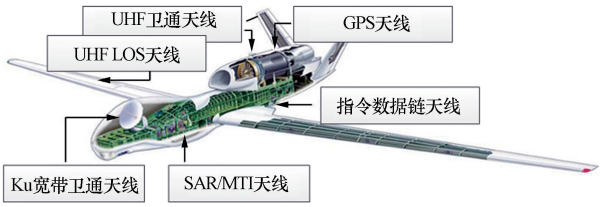


图 10 美国全球鹰无人机天线布局示意

一体化程度较低,而机翼天线则在结构上与平台深度耦合。

目前,无人机平台正由平直翼型向飞翼型及联合翼型演进[10-11],如图 11 所示。对于平直翼型无人机,可在机身、机头以及机翼分别集成阵列天线,各阵列天线负责不同扇区扫描,整体系统可实现全空域探测。需要指出的是,机身天线与机头天线均可采用常见的侧射阵,即辐射方向主要为阵面法向附近的阵列,与常规天线的区别仅在于与平台一体化的设计实现形式;而对于机翼天线而言,主辐射方向基本与阵面(机翼蒙皮所在面)平行,应采用端射阵。

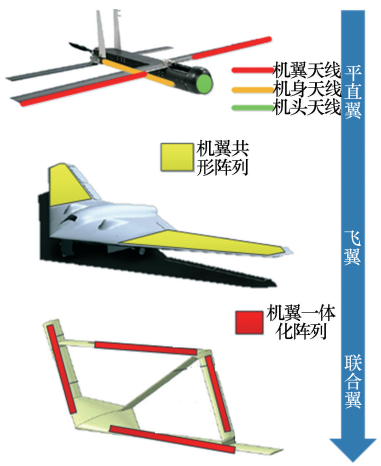


图 11 无人机构型演进

对于飞翼型无人机,机身已融入机翼中,无有效口径,故整个平台只能依赖机翼共形阵列。依据天线理论,只要天线单元具有较好的全向性,则阵列在理论上能够实现全向波束扫描。然而,端射阵列整体效率较低,这使得飞翼型无人机平台的一体化天线面临较大的技术挑战。

对于联合翼型无人机,联合翼特殊的构型可以搭载多个天线阵列,合理分区后,可使平台具有全向波束扫描能力。如美国空军所提出的传感器飞机概念[12],如图 12 所示。

可见,对于不同的载体平台,需采取不同的技术路线,因地制宜地引入一体化设计的天线阵列,针对

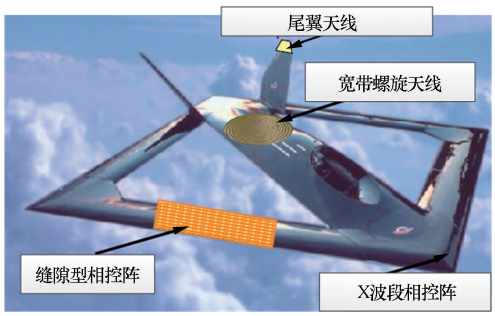


图 12 传感器飞机

一体化设计环境选取不同工作机理的天线原型,结合阵列优化实现目标能力。

3 关键技术与挑战

载荷平台一体化天线系统的设计与实现依赖多层次、多维度的持续攻关。目前,该领域在平台级的阵列分析与综合、一体化天线设计与集成、材料与工艺体系,以及平台鲁棒性等多个方面的关键技术探索中已取得明显进步,但在工程化的推动中也仍然面临着巨大挑战。

3.1 新体制阵列设计与原位验证技术

在气动、续航等平台级性能要求下,载荷平台的结构外形日趋多样化,对一体化天线阵列设计不断提出新挑战。

首先,一体化天线逐步由传统成熟的侧射阵向低剖面共形端射阵演进。常见的机翼蒙皮共形阵列与传统共形阵列相比,除了要考虑极化、互耦等因素外,还需关注由于平台曲率分布差异化明显而造成的天线单元性能区域化差异,如翼型曲率变化引起的场分布差异以及单元形变造成的匹配及辐射性能差异[12-14]。平台一体化设计条件下高效、高质量的波束合成对系统性能、研制效率有决定性影响。此外,不同形式的一体化天线的组合也对阵列综合技术提出了新的要求,需在有效快速的阵列合成技术的支持下获得平台整体得益。

其次,为取得最佳气动性能,载体平台外形逐渐向双曲面演进,对于阵列级设计而言,需解决不可展开曲面共形阵准确建模、等效评估等技术问题,力求在有限的计算资源条件下,实现高效精准的阵列综合与设计。

第三,由于载体平台结构外形日趋复杂化,一体化天线阵列不具有严格的周期性,小规模的阵列仿真与测量难以推演平台级全阵列的实际性能,且阵列环境影响复杂(如机翼、螺旋桨等遮挡),阵列原位性能测试度大,大规模一体化阵列急需高效准确的测量评

估方案,以确保平台级性能指标的精准实现。

3.2　一体化天线设计与集成技术

载荷平台一体化天线阵列技术的基础落脚点在于天线单元的设计集成。目前,载荷平台一体化天线设计与集成技术有以下几个方面:

(1)与载体外形蒙皮一体化设计与集成,即利用低剖面原型天线,结合柔性可承载材料技术实现天线与载荷平台的一体化集成。如聚酰亚胺基贴片阵列[7],以及印制于聚合物并折叠成型的 X 缝隙天线阵[8],如图 13 所示。

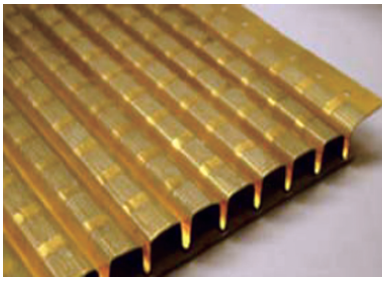


图 13　折叠成型缝隙阵列

此外,基于智能蒙皮构想的共形可承载天线技术也为载荷平台集成化设计提供了丰富的设计参考,如多层复材集成天线、金属化纤维编织天线、蜂窝加强天线等[4-5,15],如图 14 所示。

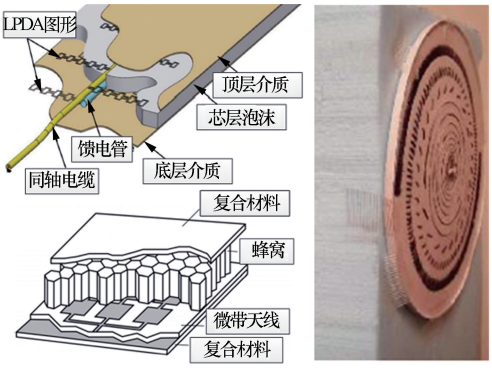


图 14　共形可承载天线

(2)与载体承载结构一体化设计与集成,即利用载体平台的腔体空间集成天线,复用腔体内的梁、筋、蒙皮等结构,形成天线电磁功能部件。例如,在机翼前缘内利用梁、筋、蒙皮等实现天线的馈电、辐射及引向等部件。如图 15 所示为几种可行的机翼前缘一体化天线[16-18]。机翼前缘天线的设计中,应尽可能扩展水平波束扫描范围并收窄俯仰波束宽度,以提高扫描探测范围并减少杂波干扰。

(3)与载体平台功能材料一体化设计与集成。由于载体平台尺寸有限,天线通常须与同为平台界面的其他系统争夺口径资源。例如美国的高空长航时无人机,翼面大面积铺设太阳能电池,极大地压缩了天线口径。为了使平台资源分配由各个系统之间的“零和博弈”转变为“正和博弈”,天线的多功能化设计势在必行。文献[19-20]中讨论了天线与太阳能电池板一体化设计的可行性,如图 16 所示,将太阳能电池板作为天线的反射面,天线的主辐射体采用镂空设计,可以实现天线与太阳能电池板的共口径集成,兼顾辐射与能源采集性能。

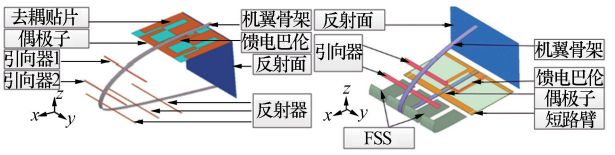


图 15　机翼前缘一体化天线

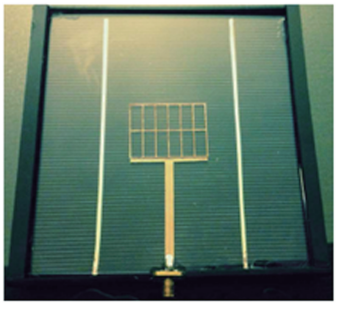


图 16　太阳能电池集成天线

另一方面,载体平台对天线的结构限制与平台功能需求形成了一对矛盾,急需天线设计方法的突破。例如,流形载体平台对于宽带、高效率、广角域扫描覆盖的低剖面天线具有较大需求。天线单元可以贴片型原型天线做适当改进,形成等效的低剖面单极子,在水平面内具有全向方向图,理论上可使共形阵列实现全向端射扫描。然而,对于低频段需求而言,机翼共形阵剖面高度电尺寸极小,天线带宽难以扩展,阵列辐射效率较低,限制了系统整体能力。

3.3　一体化天线材料与工艺体系

由于需要兼顾结构强度与刚度、天线电讯性能,以及集成难度与可靠性,载荷平台一体化天线对结构、材料与工艺体系提出了极高的要求。天线结构应综合考虑平台的梁、筋、蒙皮等部件的复用性。随着碳纤维等复合材料技术成熟度的提高,先进材料也应不断纳入一体化天线的材料体系内[21]。由于载荷平台一体化天线设计与实现难度都较大,加工工艺技术应不断吸收诸如 3D 打印、喷墨打印等适用于共形阵列生产的新一代工艺技术[22]。图 17 所示为 3D 打印技术加工的共形阵列。

需要指出的是,复杂的材料也增加了天线设计

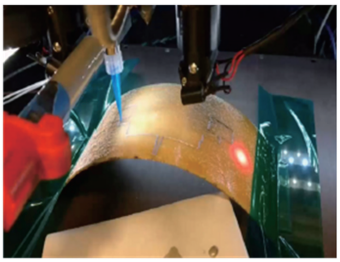


图 17 3D 打印技术加工共形阵列

的难度与复杂度。材料与工艺体系的建设也必须越来越多地考虑电磁性能。材料的微波频段电磁参数设计与验证、等效建模方法、导电化实现形式都是多学科深入交叉下必须解决的问题[21]。

3.4 平台级鲁棒性优化

相比于陆基、海基等大型平台,空基平台结构刚度较弱,飞机的机翼等部件在强烈的气流作用下会发生明显形变,如图 18 所示。这些形变对于一体化天线阵列而言具有不可忽视的影响,为提高平台性能的鲁棒性,需要全方位实时监测平台状态。目前,平台的动态形变监测领域已有一定的研究基础[23-24],针对平台形变的监测结果可对阵列做出最优补偿[25]。对于载荷平台一体化天线,动态补偿需充分考虑天线单元关于布局位置的分布差异,对数据存储规模、优化算法速度等都提出了较大挑战。



图 18 载体平台形变示意

需要指出的是,阵列构架与布局的精确设计需要平台级电磁仿真的支持,计算消耗资源与计算准确度之间的矛盾需要通过等效方法的不断优化逐步解决[26]。

4 结束语

载荷平台一体化天线技术是无线探测向立体空间不断发展的必然需求,是平台资源与天线系统性能关系最优化的最终实现方式。本文介绍了载荷平台一体化天线技术的需求与发展路线,并从新体制阵列分析与综合、天线设计与集成、材料工艺体系,以及系统鲁棒性设计等方面论述关键技术与面临的挑战。相信在全产业链的共同努力下,载荷平台一体化天线技术会在今后持续快速发展成熟,为军/民用市场带来深度变革。

参 考 文 献

[1] Paters M E, Blankenship D D, Carter S P, et al. Along-track focusing of airborne radar sounding data from west antarctica for improving basal reflection analysis and layer detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(9): 2725-2736

[2] 张光义. 相控阵雷达的技术特点及关键技术[J]. 电子科技导报, 1996, 7: 2-4
Zhang G Y. Technical characteristics and key technologies of phased array radar[J]. Electronic Science and Technology Review, 1996, 7: 2-4

[3] Lockyer A, Alt K, Kudva J, et al. Conformal load-bearing antenna structures (CLAS): initiative for multiple military and commercial applications[A]. Proceedings of SPIE 3046, Smart Structures and Materials 1997: Smart Electronics and MEMS[C], San Diego, USA, 1997

[4] Bishop N A, Miller J, Zeppettella D, et al. A broadband high-gain bi-layer LPDA for UHF conformal load-bearing antenna structures (CLASs) applications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(5): 2356-2364

[5] You C, Tentzeris M M, Hwang W. Multilayer effects on microstrip antennas for their integration with mechanical structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagatin, 2007, 55(4): 1051-1058

[6] Cravey R L, Vedeler E, Goins L Y, et al. Structurally Integrated Antenna Concepts for HALE UAVs[R]. Hampton: National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, 2006

[7] Judasz T J, Balsley B B. Improved theoretical and experimental models for the coaxial colinear antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1989, 37(3): 289-296

[8] Jang S, Lee Y, Kim M, et al. An adaptation of the side lobe blanking function in active array antenna[A]. 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)[C], Jeju, Korea, 2019. 980-982

[9] Baek S M, Ko M G, Kim M S, et al. Structural design of conformal load-bearing array antenna structure (CLAAS)[J]. Advanced Composite Materials, 2017, 26(S1): 29-42

[10] Özdemir T, Davis C N. Polarization-diversity conformal VHF antenna with near-perfect radiation efficiency for small UAVs[A]. 2019 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting[C], Atlanta, USA, 2019

〔11〕 He C, Jia Y, Ma D, et al. Integrated optimization approach for aerodynamic, structural, and embedded antenna design of joined-wing sensor craft[J]. IEEE Access, 2020, 8: 138999-139012

〔12〕 李建新, 徐慧, 胡明春, 等. 基于 FFT 的阵列方向图快速计算[J]. 微波学报, 2007, 23(1): 10-15
Li J X, Xu H, Hu M C, et al. Fast computation of array pattern based on FFT[J]. Journal of Microwaves, 2007, 23(1): 10-15

〔13〕 Steyskal H. Pattern synthesis for a conformal wing array [A]. Proceedings of IEEE Aerospace Conference[C], Big Sky, USA, 2002

〔14〕 Josefsson L, Persson P. Conformal array antenna: theory & design[M]. Canada: IEEE Press/Wiley, 2005

〔15〕 Chen X, Wu H, Fu G. Wideband VHF/UHF wing conformal vertical polarized omnidirectional antenna [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(5): 953-957

〔16〕 Peng J J, Qu S W, Xia M, et al. Wide-scanning conformal phased array antenna for UAV radar based on polyimide film[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2020, 9(9): 1581-1585

〔17〕 Zhang C, Qu S W. Wide-scanning conformal linear phased array[A]. 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) [C], Shanghai, China, 2020

〔18〕 Li A, Qu S W, Yang S. Conformal array antenna for applications in wide-scanning phased array antenna systems [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(9): 1762-1766

〔19〕 Vaccaro S, Mosig J R, Maagt P D. Two advanced solar antenna "SOLANT" designs for satellite and terrestrial communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(8): 2028-2034

〔20〕 Sheikh S, Shokooh-Saremi M. Rectangular meshed patch antenna integrated on silicon solar cell[A]. 2015 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE) [C], Tehran, Iran, 2015

〔21〕 Galehdar A, Callus P J, Rowe W S T, et al. Capacitively fed cavity-backed slot antenna in carbon-fiber composite panels[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2012, 11: 1028-1031

〔22〕 Biswas S, Mirotznik M. Additively manufactured conformal load-bearing antenna structure (CLAS)[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2020, Early Access, 3019220

〔23〕 Reichenbach E. Aeroservoelastic design and test validation of the joined wing Sensorcraft[A]. 26th AIAA Applied Aero Dynamics Conference[C], Honolulu, USA, 2008

〔24〕 段嘉晟. 机翼一体化天线变形重构与传感器布局优化[D]. 西安:西安电子科技大学, 2020
Duan J D. Deformation reconstruction and sensor layout optimization of wing integrated antenna[D]. Xi'an: Xidian University, 2020

〔25〕 Zhou J, Kang L, Tang B, et al. Adaptive compensation of flexible skin antenna with embedded fiber bragg grating [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(7): 4385-4396

〔26〕 李超峰. 电大平台和天线的一体化等效建模方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016
Li C F. Research on integrated equivalent modeling method of electrically large platform and antenna[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016



胡明春　男,1963 年生,研究员级高级工程师,中国电子科技集团有限公司首席科学家,享受国务院政府特贴专家,两化融合十大领军人物,江苏省"333 高层次人才工程"专家。长期从事雷达系统总体工程研发和天线理论研究,先后获得国家科技进步一等奖、二等奖,以及国防科工局等省部级科技进步奖等 20 余项。
E-mail:txywbjs@126.com