

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2014.08.001

引用格式:何庆强,王秉中,何海丹.智能蒙皮天线的体系构架与关键技术[J].电讯技术,2014,54(8):1039-1045.[HE Qing-qiang,WANG Bing-zhong,HE Hai-dan.System Structure and Key Techniques of Smart Skin Antennas[J].Telecommunication Engineering,2014,54(8):1039-1045.]

智能蒙皮天线的体系构架与关键技术*

何庆强^{1,**},王秉中²,何海丹¹

(1.中国西南电子技术研究所,成都 610036;2.电子科技大学 物理电子学院,成都 610054)

摘要:区别于传统天线设计方法,提出了一种新的智能蒙皮天线设计架构,探讨了实现智能蒙皮天线的关键技术。通过在射频功能层采用可重构技术和在后端采用信号处理的方法,实现了智能蒙皮天线的波束自适应,解决了传统天线仅仅依靠信号处理方式来实现天线波束自适应的局限。分析了智能蒙皮天线的封装功能层、射频功能层以及控制与信号处理功能层的实现措施。最后针对新一代航空平台的应用需求,进一步探讨了智能蒙皮天线的关键技术和实现方法。

关键词:智能蒙皮天线;体系构架;可重构;射频隐身;健康检测;功能维护

中图分类号:TN82 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2014)08-1039-07

System Structure and Key Techniques of Smart Skin Antennas

HE Qing-qiang¹,WANG Bing-zhong²,HE Hai-dan¹

(1.Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China;2.School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China,Chengdu 610054,China)

Abstract: Different from traditional antenna design methods, the new system structure of smart skin antennas is proposed, and the key technique realizations of smart skin antennas are discussed. The beam self-adapting of smart skin antennas is realized based on the reconfiguration technique in RF-layer and signal processing method in back-end, and the limit of traditional antenna by using only signal processing method is overcome. And then, the realizing methods of packaging layer, RF-layer, and controlling and signal processing layer are analyzed in detail. Finally, according to the application requirements for future aircraft, the key techniques and design methods of smart skin antennas are presented.

Key words: smart skin antenna; system structure; reconfiguration; RF-stealth; health monitoring; function maintenance

1 引言

当前,欧美等军事强国不断推出新概念武器平台研究计划,如变形飞机、智能战车、仿生潜艇等。由此可见,新概念武器平台的发展趋势就是智能化、无人化、隐身化以及仿生化。这对天馈系统提出了很大挑战,不但要求未来天馈系统设备功能和物理

构架实现更高水平的集成,而且要求未来天馈系统设备能更好地融合于武器平台。传统天线由于大量凸显于机载平台表面,严重影响了飞机的气动/隐身性能;额外增加的天线支撑结构和辅助设施,使飞机的重量、复杂性、成本以及占用空间大幅度提升;天线的独立安装模式和在飞机蒙皮上开孔导致机体更

* 收稿日期:2014-05-20;修回日期:2014-07-21 Received date:2014-05-20;Revised date:2014-07-21

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目;国家重点基础研究发展计划(973计划)项目

Foundation Item:The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program);The National Program on Key Basic Research Project (973 Program)

** 通讯作者:heqingqiang518@126.com Corresponding author:heqingqiang518@126.com

大、空中待命时间更短、生存力降低、增加了机体结构修理与维护成本。因此,传统天线的设计方式很难再适应新一代飞机作战模式和功能的需求。最近兴起的共形承载天线(Conformal Load-bearing Antenna Structure, CLAS)能很好地解决机载平台气动/隐身的问题^[1]。然而,这种 CLAS 仅仅考虑了与飞机蒙皮的共形设计和气动力学特征,在性能方面没有涉及天线的智能化。

自 20 世纪 80 年代美国空军提出“智能蒙皮”这项具有创新意识的新技术构想之后,美国空军、海军等科研机构都投入大量人力和物力进行可行性预研。在此基础上,Baratault 和 Josefsson 等人提出了未来“智能蒙皮”天线的设想^[2-3],在继承相控阵天线技术的基础上,通过设备后端的控制与信号处理单元来实现天线波束的自适应,然而这种仅仅靠信号处理的方式来实现天线智能化是有限的。

本文提出了一个新的设计架构:天线的自适应不仅可以依靠设备后端的控制与信号处理单元来完成,而且可以在射频功能层实现辐射/散射特性动态可重构,即在射频功能层增加一维自由度。与传统天线不一样的是它不仅能实现系统和天线结构的高度融合,而且能实现射频功能层的电磁特性动态调控,拓展了相控阵天线波束自适应能力。本文从新一代战机的军事需求入手,详细地论证了智能蒙皮天线的体系构架和关键技术,可为后期进一步研究智能蒙皮天线奠定技术基础。

2 智能蒙皮天线的体系构架

2.1 总体构架

智能蒙皮是指在航天器、军舰或者潜艇的外壳中嵌入智能结构,其中包含天线、微处理系统和驱动元件,可用于监视、预警、隐身、通信、火控等。目前的研究方向主要是在航天器上的应用。智能蒙皮天线的内涵应包括两个特征——“蒙皮”和“智能”,“蒙皮”突出天线的共形和承载能力,“智能”突出天线的自适应性,能够根据外界的电磁环境产生所需要的辐射/散射特性。智能蒙皮天线要实现这些功能,就必须采用与载体表面共形的多层复合介电材料,在复合材料的预装阶段,在各层之间嵌入大量形状各异或周期性放置的金属贴片、传感器、微机电系统(Micro-electro-mechanical System, MEMS)、TR 电路、馈电网络、传动装置以及热控装置,形成结构复杂的多层共形阵列结构。

根据 Josefsson 等人对“智能蒙皮”的设想^[4],本文提出了智能蒙皮天线的总体构架^[5],并将其分为 3 个功能层:封装功能层、射频功能层、控制与信号处理功能层,如图 1 所示。封装功能层主要包括承载介质、隔热介质、绝缘介质以及外围封装结构;射频功能层主要包括天线阵列、TR 电路、热控装置以及馈电网络;控制与信号处理功能层主要由波控电路、DC 电源以及屏蔽挡板组成。整个智能蒙皮天线采用高密度集成设计技术和结构功能一体化成型制造技术^[6-7],撇去了传统天线设计制造与飞机设计制造分离的模式,即在飞机设计制造期间,就将机载天馈系统相对分离的结构、电磁独立功能组件高度集成并与飞机结构一体化成型,打破了传统天线在飞机蒙皮上开孔安装的局限,形成可与机载平台结构高度融合并直接承载环境载荷的一类新型天线^[8]。

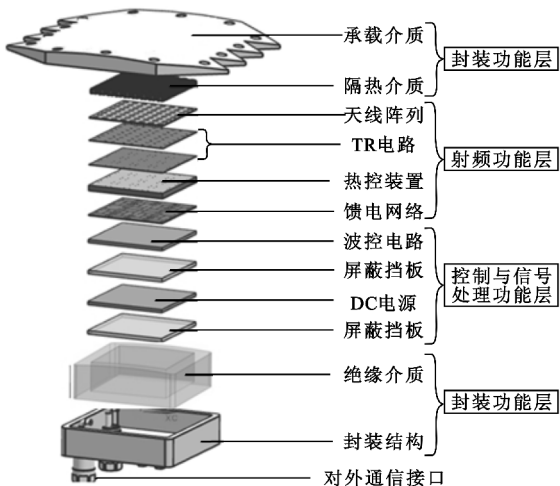


图 1 智能蒙皮天线体系构架
Fig. 1 The system structure of smart skin antennas

基于图 1 的总体构架设计,图 2 给出了智能蒙皮天线的电路组成和总体方案设计。在这儿,光纤传感器、驱动装置以及微处理器嵌入封装功能层的承载介质内,实现能够感知外界环境信息的智能化天线罩;可重构天线阵列、芯片化 TR 电路以及可重构馈电网络构成了射频功能层,实现电磁信号的动态调控;控制与功能维护单元、健康监测单元、波控计算单元以及驱动的 DC 电源构成了控制与信号处理功能层,能够实现波束自适应。在该总体方案设计中,所有的技术途径均是以我们先前的研究为基础^[5-7],实施方案具有可行性。

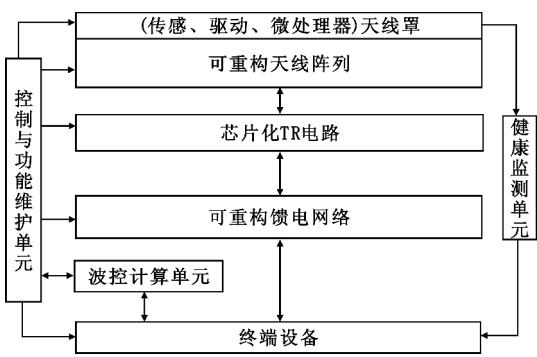


图 2 本文提出的智能蒙皮天线组成框图
Fig. 2 The block diagram of proposed smart skin antenna

2.2 封装功能层

封装功能层要实现四大功能:一是结构承载功能,以满足智能蒙皮天线在结构强度、空气动力学等方面的特殊要求,能起到防止氧化、衰减紫外线、防雨雪侵蚀、抵抗气动载荷的作用;二是信息感知功能^[9-10],封装功能层内层埋光纤/传感器还能探测疲劳损伤和攻击损伤,并可使蒙皮产生需要的变形,同时将获取的信息传送给终端设备;三是系统散热/隔热功能,以保证微波/毫米波集成电路正常工作;四是电磁防护功能,既包括对外来电磁攻击的防护,也包括对系统内部电磁干扰的防护。

如图 1 所示,封装功能层的承载介质和隔热介质通常合称为天线罩。在天线罩中植入传感元件、驱动元件和微处理器,这些器件与飞行器执行系统相连,可实现对设备各处应力、应变、温度、裂纹、形变等诸多参量进行监控,达到结构健康检测、振动与噪声控制、共形承载天线保形等^[11]。在射频隐身方面,蒙皮天线罩具有可调谐性,可以随着机载天线频率的变化而改变其滤波特性,频率捷变提供了附加的目标识别优势,从而使敌方的电子战装备更难确定威胁的特征,极大地提高了设备系统的生存力^[12]。

封装功能层就像人的皮肤一样^[13],具有一定的自修复能力,能对破坏产生敏感和响应。人体皮肤中的血管可以根据来自神经网络的信号携带抵抗感染的抗体到受伤部位,封装功能层中的层埋光纤/传感器可以实时感知战斗和其他事故引起的损伤,并重新向损伤区传送信号,达到功能重组和天线智能化的目的。

2.3 射频功能层

射频功能层主要由可重构天线阵列、TR 电路以及可重构馈电网络组成,它集成了辐射单元、多功能

芯片、功分器、移相器、衰减器、混频器、电子控制元件、MEMS、功率源、滤波器、热控装置等元器件。射频功能层通常采用三维微波/毫米波集成电路、片式多芯片组件以及微机电控制技术,使其能够适应不同的曲面结构,将可重构天线单元、TR 电路、探测结构、驱动元件以及微处理器与基体材料相融合,形成多层共形阵列,具有识别、分析、判断、重组等功能^[14],可实现射频功能层电磁信号的辐射/散射特性可重构。

从图 1 可以看出,智能蒙皮天线在射频功能层能实现电磁信号辐射/散射可重构,从而完美地实现射频前端、信号处理终端以及平台一体化设计,达到电磁隐身、功能重构、结构仿生变形的自诊断、自修复、自适应的目的^[11]。智能蒙皮天线执行有源探测或通信时,对抗的主要对象是敌方的截获接收系统,必须巧妙控制智能蒙皮天线的辐射特性,使自身处于低截获概率(Low Probability of Intercept, LPI)状态;当执行无源探测时,对抗的主要对象是敌方的有源探测系统,必须控制智能蒙皮天线的散射特性,即减小雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS),使自身处于低可观测(Low Observable, LO)状态。从主动辐射方面来看,天线系统在发射和接收我方电磁波时应具有 LO,而有效的 LPI 的基础是对辐射电磁信号在时域、空域和频域上的有效管理。为了实现对辐射电磁信号在时域、空域和频域上的有效管理,要求智能蒙皮天线具备辐射特性动态调控的潜力,能够在可重构天线阵列、可重构馈电网络、控制与功能维护单元的配合下,按需实时地重构天线的时域/空域/频域辐射特性。从被动散射方面来看,为了对付来自敌方的电磁侦察,应降低智能蒙皮天线的 RCS。然而,要在全时域/全空域/全频域实现智能蒙皮天线的低 RCS 是不可能的。考虑到敌方电磁侦察在时域/空域/频域的多样性,要求智能蒙皮天线具有散射特性动态调控的潜力,能够感知战场电磁环境的变化,在可重构天线阵列、可重构馈电网络、控制与功能维护单元的配合下,按需实时地重构天线的时域/空域/频域散射特性,保持动态的低 RCS。

2.4 控制与信号处理功能层

智能蒙皮天线不仅能依靠后端信号处理来实现波束形成,还能在射频功能层采用可重构技术实现电磁特性的可重构,极大地增强了天线系统的智能化潜力,使天线系统能够根据外界的电磁环境自适

应调整,以满足多种军/民用的需求。

波控计算单元是智能蒙皮天线波束自适应的重要组成部分,它能够根据终端设备指令需求,计算出波束指向捷变与波束形状捷变的幅相控制码,并实时传送给控制与功能维护单元,使天线波束准确指向预定的空间方向,达到波束指向捷变与波束形状捷变的目的^[15]。

控制与功能维护单元是对智能蒙皮天线的传感器、驱动装置、检测元件、MEMS、DC 电源等进行控制,使天线系统能够正常运作起来。控制与功能维护单元通过对智能蒙皮天线的 MEMS 进行控制,可使辐射单元具有电磁特性可重构的能力,从而完成射频功能层的电磁动态调控^[16]。此外,控制与功能维护单元还能对电子设备的振动噪声进行控制,从而降低设备产生疲劳裂纹、结构破坏,防止酿成重大事故^[11]。

健康监测单元是指通过实时监测嵌入在智能蒙皮天线内的光纤/传感器来判定天线系统是否正常工作^[17],同时对战斗损伤作出判断、评估,把信息传递给波控计算单元、控制与功能维护单元,进行剩余资源的重新计算、分配、组合,完成蒙皮天线的电磁性能可重构,实现智能化。

3 关键技术实现方法

3.1 智能蒙皮天线的总体设计

智能蒙皮天线是一个复杂的系统工程,它融合了电磁学、机械学、热力学、阵列信号处理、光电子技术、自动控制等多学科知识,是一个多物理场的联合设计,必须同时兼顾电、力、热的性能指标的平衡。因此,总体设计是一个平衡电性能指标、结构优化设计、热设计的一个综合迭代过程,必须从全局上细化各个功能层的设计以及电气线路互连问题。在智能蒙皮天线总体性能评估方面,可采用笔者先前提出的“一种相控阵天线系统模块级误差分析控制方法”来实现^[18],该方法考虑了阵列单元失效、阵元互耦影响、模块设计误差以及射频互连失配等因素,具有很好的工程适用性,可实现智能蒙皮天线的总体设计。

在蒙皮阵列计算方面,运用现有的电磁仿真和优化方法对蒙皮阵列进行电磁特性分析和综合时,将会遇到很多困难,急需在计算方法上进行创新。在蒙皮天线与机载平台一体化的电磁分析方面,由

于机载平台-可重构蒙皮天线的联合仿真既是宏观尺寸很大的电大电磁问题(机载平台环境),又是微观结构非常精细的电磁问题(天线单元、馈电网络),可采用3种方式进行分析。第一种方式是采用渐进技术的一些算法,如多层快速多极子方法、一致性几何绕射理论等。第二种方式是采用数值计算方法,如有限元法、时域有限差分法等。第三种方式是采用笔者先前提出的任意三维共形阵列方向图综合方法^[19],将阵中单元划分为中间单元、邻边单元以及边缘单元,运用远场叠加原理,将一个大的阵列计算问题划分成各类简单的子阵问题的叠加,可极大地降低计算负担,解决由于计算机硬件条件的限制而不能计算的问题。对于任意不规则曲面下的天线组阵方案,可采用柔性共形天线进行设计^[20],并借助文献[19]提出的综合方法,可以完成不规则曲面下的智能蒙皮天线的设计,而在自适应波束形成算法方面,完全可以沿用传统智能天线的方法。

3.2 垂直互联技术

研究智能蒙皮天线的垂直互联设计,并解决弯曲结构状态下互联一致性的制造成型问题极为关键。智能蒙皮天线是由射频介质材料、低频电路介质材料、填充材料等多种材质组成的一种复合结构,垂直互联问题极为复杂。

从辐射单元来看,常见的设计方法有耦合馈电方式和探针馈电方式,天线基板材料可选择为低温共烧陶瓷(Low Temperature Cofired Ceramic, LTCC)和印制电路板,常用的垂直互联方式有槽-带状线转换、微带-微带转换以及同轴方式等。

TR 组件是智能蒙皮天线的核心部件,可分为砖块式和瓦片式结构。砖块式 TR 组件设计和制造工艺要求较低,该组件集成密度较低,散热能力差,很难在智能蒙皮天线上得到应用。瓦片式 TR 组件具有优良的散热能力,子阵集成度高,在降低 TR 组件成本、减小体积尺寸、减轻设备重量方面具有优势,易于实现大规模共形多层阵列。瓦片式 TR 组件设计采用分层结构,将多个通道相同功能的芯片或电路集成在数个平行放置的瓦片上,芯片之间通过金属过孔和焊球互联,并采用倒装芯片的封装方式实现^[21]。此外,还可采用异型波导、类同轴线、平面传输线、平面线耦合器来进行高密度集成 TR 组件电路的互联设计^[22]。

3.3 射频隐身技术

一直以来,人们都认为天线辐射特性和散射特

性之间存在一定关系,却很少有文献研究这方面的问题。现代的天线隐身技术强调 RCS 的调控与战术的配合,实现天线的 LO/LPI,以达到对天线系统 RCS 在时域、空域和频域上的有效管理。通常 LO/LPI 技术都需要不断加强天线罩、天线腔、天线设计的开发,以此作为共用子系统的交互元件,使带内、带外 RCS 更小^[23]。采用智能蒙皮天线技术,可有效取消飞行器上的外露天线,将其上的各种天线与机翼、机身蒙皮结合起来,甚至将若干分离的单功能天线综合成多功能射频孔径,可以有效地利用飞行器的表面积,减轻重量,降低飞行器气动阻力,同时也极大地减少 RCS 面积。可见,采用智能蒙皮天线是实现天线气动/隐身设计的有效方案之一。

与共形天线概念不同的是,智能蒙皮天线不仅需要完成飞行器天线所有的工作任务,还要自适应地逃避对方探测,实现对天线系统的隐身控制。也就是说,智能蒙皮天线不但从结构方面有利于飞行器气动/隐身一体化外形设计,更为重要的是,它能够自适应地调控天线辐射/散射特性。传统的天线隐身技术主要关注 RCS 的降低,随着当代电磁环境的日趋复杂和对抗的日益加剧,仅仅关注 RCS 指标的传统天线隐身技术已经不能满足良好的天线系统辐射/隐身双重目标,必须进行技术的创新。采用辐射/散射特性可重构技术可很好地实现 LO/LPI 的动态调控,达到智能蒙皮天线隐身设计的目的。

3.4 智能控制技术

智能控制技术是智能蒙皮天线实现波束自适应的极为关键的技术。为了实现波束捷变和动态调控,可以采用两种方式来实现:第一种就是在波控计算单元中实现,采用信号处理的方式计算出波束指向捷变与波束形状捷变的幅相控制码,并可向射频功能层提供不同的输入信号方案,达到对电磁信号的调控;第二种就是在控制与功能维护单元中实现,采用可重构技术,通过控制射频功能层中的开关(MEMS 开关或 PIN 二极管),直接调控射频功能层的辐射阵元或馈电网络^[16,24],实现智能蒙皮天线波束的可重构和功能重组。控制与功能维护单元提高了飞机的可用性,它能够在健康监测单元报告部分辐射单元损毁的情况下,启动备用单元或备用算法,进行硬件补偿或软件补偿,完成资源的重新分配、组合以及功能重构,保障系统功能继续正常发挥^[8,25]。

健康监测单元负责实时监测智能蒙皮天线是否能健康工作。为了实现这一功能,需要在智能蒙皮

天线中嵌入对各个状态进行监测的光纤/传感器,负责状态感知、状态信息传输以及状态信息分析等任务^[14]。通过实时监测智能蒙皮上的光纤/传感器的信息来判定整个系统是否正常工作,并把判定结果传递给控制与功能维护单元。在天线电磁性能监测方面,健康监测单元必须包括信号的采集分析以及控制信号的传输。具有有源收发组件的智能蒙皮相控阵天线,可以采用一种内置性能监控与故障隔离校正(Performance Monitoring/Fault Isolation and Correction, PM/FIC)系统进行监测^[26]。

3.5 热设计技术

从智能蒙皮天线外部环境来看,当飞行器高速运动时,高性能飞机的蒙皮表面温度能达到 200℃,而层埋在智能蒙皮里的光纤尤其是砷化镓/氮化镓芯片只能承受低于 145℃ 的温度,温度超过 100℃,电子设备就会失效^[13]。因此,必须寻求一种方法,在热量传入埋在飞机蒙皮表面之下的射频功能层以前就能将其散发。另一方面,从智能蒙皮天线内部环境来看,TR 组件的功放芯片已经形成过热危险,尤其是大功率毫米波智能蒙皮天线,其内部的热耗高达几百甚至上千瓦。因此,对于包含众多 TR 组件等有源单元的智能蒙皮天线,在采用三维多层集成电路时,系统散热是一个必须在系统体系架构规划时就要解决好的问题。

热设计是智能蒙皮天线可靠性设计的一项关键技术,目的是要保证电子元器件及设备在规定的热环境下,能安全正常地工作。从目前的设计方式上看,强迫风冷和液体冷却已经在机载平台上得到应用。当机载平台对冷却系统的体积和重量要求不十分严格,且热功率密度分布不高时,强迫风冷不失为一种好的选择,它省去了液体冷却系统的冷却泵和动力源,较为简洁、廉价。但在大多数情况下,尤其是毫米波频段甚至更高频段,高性能、高密度集成是智能蒙皮天线的一大特点,导致热设计成为一个极难解决的关键技术难题,直接在多功能发热芯片下面埋置液冷管道是较好的设计方案^[27]。

从系统体系架构角度考虑,散热层应该充分利用系统内部未放置元器件的空间以尽量减小系统总体积,并且达到使系统整体更稳固的作用。从系统散热性能及效率角度看,散热层应主要置于系统产热较多部件周围,例如 TR 组件的功放芯片下方/上方,并且与热源器件之间保持良好的热传导,以达到高效散热效果^[28]。

4 结 论

智能蒙皮天线是一项新兴天线技术,它打破了传统天馈系统电气与结构相对独立的设计模式,从系统的角度出发,融合电磁学、机械学、热力学、阵列信号处理、光电子技术、自动控制、计算机工程等多学科知识,对天馈系统进行微系统、多芯片集成设计,实现了结构功能的高度一体化、智能化,解决了传统天馈系统在航空武器平台上面临的技术难题,是天线技术领域发展的一个新的里程碑,在通信、导航、雷达、电子战、遥感遥测等方面有很大的应用前景。

参考文献:

- [1] Lockyer A J, Alt K H, Kudva J N, et al. Structural finite element modeling strategies for a conformal load bearing antenna structure (CLAS) [C]//Proceedings of SPIE 1997. San Jose, CA: IEEE, 1997: 166-172.
- [2] Baratault P, Gautier F, Albarel G. Evolution des antennes pour radars aéroportés de la parabole aux peaux actives[J]. Rev. Techn., Thomson-CSF, 1993: 749-793.
- [3] Josefsson L. Smart skins for the future [C] //Proceedings of Adaptive Antennas in Spatial TDMA Multihop Packet Radio Networks. Karlskrona, Sweden: IEEE, 1999: 682-685.
- [4] Josefsson L, Persson P. Conformal array antenna theory and design [M]. New Jersey, John Wiley & Sons Inc., 2006.
- [5] 何庆强, 何海丹, 官正涛. 嵌入式智能蒙皮天线: 中国, 201310492003. 7[P].
HE Qing-qiang, HE Hai-dan, GUAN Zheng-tao. Embedded smart skin antenna: China, 201310492003. 7[P]. (in Chinese)
- [6] 何庆强, 何海丹, 赵青. 一体化毫米波有源相控阵天线: 中国, 201310341730. 3[P]. 2013.
HE Qing-qiang, HE Hai-dan, ZHAO Qing. Integration technique of millimeter active phased array antennas: China, 201310341730. 3[P]. 2013. (in Chinese)
- [7] 周金柱, 何庆强, 保宏, 等. 结构功能一体化机翼天线: 中国, 201410135872. 9[P]. 2014.
ZHOU Jin-zhu, HE Qing-qiang, BAO Hong, et al. Aerofoil antenna with structure and function incorporation: China, 201410135872. 9[P]. 2014. (in Chinese)
- [8] 宋玉华, 张利萍, 林淑明. 21 世纪无人机关键技术[J]. 现代防御技术, 2004, 32 (5): 30-35.
SONG Yu-hua, ZHANG Li-ping, LIN Shu-ming. Key technology for UAVs in the 21st century [J]. Modern Defence Technology, 2004, 32 (5): 30-35. (in Chinese)
- [9] 李尚俊. 光纤智能结构/蒙皮在航空上的应用[J]. 中国民航飞行学院学报, 2000(2): 29-30.
LI Shang-jun. Application of fiber smart structure/skin in aviation industry [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2000(2): 29-30. (in Chinese)
- [10] Rohi K, Zeyhep C B, Donald P B, et al. NiCr MEMS tactile sensors embedded in polyimide toward smart skin [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22 (2): 349-355.
- [11] 裘进浩, 边义祥, 季宏丽, 等. 智能材料结构在航空领域中的应用[J]. 航空制造技术, 2009(3): 26-29.
QIU Jin-hao, BIAN Yi-xiang, JI Hong-li, et al. Application of smart materials and structures in aviation industry [J]. Aviation Manufacture Technique, 2009 (3): 26-29. (in Chinese)
- [12] 朱松. 机载共形天线的发展[J]. 国际电子战, 2007 (1): 30-36.
ZHU Song. The development of aircraft conformal antenna [J]. International Electronic Warfare, 2007(1): 30-36. (in Chinese)
- [13] 刘菊艳. 智能蒙皮[J]. 飞航导弹, 1990(9): 40-41.
LIU Ju-yan. Smart skin [J]. Cruise Missile, 1990 (9): 40-41. (in Chinese)
- [14] 王智, 周建军. 智能蒙皮技术的发展现状及其军事运用[J]. 国防技术基础, 2006(5): 24-27.
WANG Zhi, ZHOU Jian-jun. The development trend and military application of smart skin antenna [J]. Technology Foundation of National Defence, 2006(5): 24-27. (in Chinese)
- [15] Gross F. Smart antennas for wireless communications[M]. New York: McGraw-Hill Companies Inc., 2005.
- [16] Wang G, Ramanan B, Pan B, et al. Radiofrequency MEMS-enabled polarization reconfigurable antenna arrays on multilayer liquid crystal polymer [J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2011, 5(13): 1594-1599.
- [17] Li D S, Li H N, Fritzen C P. Load dependent sensor placement method: theory and experimental validation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012 (31): 217-227.
- [18] 何庆强. 一种相控阵天线系统模块级误差分析控制方法: 中国, CN102104196A[P]. 2011-06-22.
HE Qing-qiang. The module error analysis of system and controlling method for phased array: China, CN102104196A[P]. 2011-06-22. (in Chinese)
- [19] He Qing-qiang, Wang Bing-zhong, Wei Shao. Radiation pattern calculation for arbitrary conformal arrays that include mutual coupling effects [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2010, 52(2): 57-63.
- [20] Braaten B D, Roy S, Nariyal S, et al. A self-adapting flexible (SELFLEX) antenna array for changing conformal surface applications [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(2): 655-665.
- [21] Nansen C, Hongchin L. Design of costless and adjustable inductors embedded in array packages [C] //Proceedings

- of 2007 International Symposium on Signals, Systems and Electronics. Montreal, Que:IEEE,2007:383-386.
- [22] 黄建. 毫米波有源相控阵 TR 组件集成技术 [J]. 电讯技术, 2011, 51 (2): 1-6.
HUANG Jian. Crucial integration technology of T/R module for millimeter-wave active phased array [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51 (2): 1-6. (in Chinese)
- [23] David L J. Introduction to RF stealth [M]. Raleigh, NC, USA:SciTech Publishing Inc. , 2004.
- [24] Symeon N, Ramanan B, Cesar L. Pattern and frequency reconfigurable annular slot antenna using PIN Diodes [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagations, 2006, 54 (2): 439-448.
- [25] Kilaru R, Celik-Butler Z, Butler D P, et al. NiCr MEMS tactile sensors embedded in polyimide toward smart skin [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2013, 22 (2): 349-355.
- [26] Chu R S, Lee K M. Analysis and development of a signal injection technique using transmission lines embedded at phased array aperture [J]. IEEE Transactions on Antenna and Propagations, 1993, 41 (10): 1464-1469.
- [27] Holzwarth S, Jacob A F, Dreher A, et al. Active antenna arrays at Ka-band: status and outlook of the SANTANA project [C]//Proceedings of the 4th European Conference on Antenna and Propagations. Barcelona, Spain: IEEE, 2010:1-5.
- [28] Stark A, Dreher A, Geise A, et al. SANTANA: advanced electronically steerable antennas at Ka-band [C] // Proceedings of the 3th European Conference on Antennas and Propagation. Berlin:IEEE,2009:471-478.

作者简介:



何庆强 (1977—), 男, 重庆铜梁人, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为天线理论与技术、共形天线与智能蒙皮、相控阵天线;

HE Qing-qiang was born in Tongliang, Chongqing, in 1977. He is now a senior engineer with the Ph. D. degree. His research concerns antenna theory and technique, conformal antenna and smart skin, and phased array antenna.

Email:heqingqiang518@126.com

王秉中 (1962—), 男, 四川成都人, 教授、博士生导师, 主要研究方向为计算电磁学、天线理论与技术;

WANG Bing-zhong was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1962. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns computational electromagnetics, and antenna theory and technique.

何海丹 (1970—), 男, 四川泸州人, 研究员, 主要研究方向为天线理论与技术、阵列天线、智能天线。

HE Hai-dan was born in Luzhou, Sichuan Province, in 1970. He is now a senior engineer of professor. His research concerns antenna theory and technique, array antenna, and smart antenna.