

# 电磁超材料及智能超材料隐身技术发展现状及趋势

陈天航<sup>1</sup>, 何磊明<sup>1</sup>, 袁宏皓<sup>1</sup>, 蔡通<sup>2</sup>

(1. 中国航空研究院, 北京, 100029; 2. 空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

**摘要** 从武器装备的实际电磁攻防需求出发, 聚焦于超材料在电磁领域的应用, 简单回顾了电磁超材料的发展历程和实用化进程, 着重介绍了近年来最可能产生颠覆性技术的领域——智能可重复编程超材料及基于其的智能隐身系统。基于长期对电磁隐身、新型电磁器件的研究, 结合实践经验, 对目前超材料隐身技术成熟度进一步提高所面临的难点进行分析, 并对未来的发展做出了建议和展望。

**关键词** 智能隐身; 电子对抗; 电磁频谱战; 超材料; 超表面

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.03.004

**中图分类号** TN974 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)03-0026-08

## Current Development and Future of Electromagnetic Meta-Materials and Intelligent Cloaking Technology Based on Smart Meta-Materials

CHEN Tianhang<sup>1</sup>, HE Leiming<sup>1</sup>, YUAN Honghao<sup>1</sup>, CAI Tong<sup>2</sup>

(1. Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China;

2. Air and Missile Defend School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract** Studying to the needs of electronic attack and defense in reality of weaponry, this paper focuses attention on the application of meta-materials for the field of electromagnetism, reviews briefly the evolution and practical application of electromagnetic meta-materials, and introduces the fields which have been most potentially disruptive technologies in recent years, i. e. intelligent cloaking technology and smart cloaking weapon systems. Basing a long-term research on electromagnetic cloaking & novel electromagnetic devices in combination with workings in industry, the paper analyzes the difficulties faced with a current meta-material cloaking technology to be further improved, and makes suggestions and outlooks for future development.

**Key words** intelligent cloaking technology; electronic countermeasures; electromagnetic spectrum warfare; meta-material; metasurface

新兴技术的发展会催生战争形态的改变, 正如电子信息技术的发展促使未来战争从传统的陆、海、空、天作战域向赛博、电磁等新型作战域延伸。2015年, 美国战略与预算评估中心(CSBA)发布《电波制

胜: 重拾美国在电磁频谱领域的主宰地位》<sup>[1]</sup>, 明确提出了电磁频谱战的概念, 强调“低零功率”作战模式, 使用具有低雷达散射截面积(radar cross section, RCS)的平台搭载各种低截获概率(low prob-

收稿日期: 2022-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(61901512)

作者简介: 陈天航(1994-), 男, 辽宁沈阳人, 工程师, 博士, 研究方向为体系电磁攻防。E-mail: greendam@zju.edu.cn

**引用格式:** 陈天航, 何磊明, 袁宏皓, 等. 电磁超材料及智能超材料隐身技术发展现状及趋势[J]. 空军工程大学学报, 2023, 24(3): 26-33.  
CHEN Tianhang, HE Leiming, YUAN Honghao, et al. Current Development and Future of Electromagnetic Meta-Materials and Intelligent Cloaking Technology Based on Smart Meta-Materials[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(3): 26-33.

ability of intercept, LPI) 传感器进行隐蔽突防, 这将成为未来战争中一个重要的作战方式。通过对敌方 OODA 循环链中“观察”与“定位”环节的迟滞, 各类隐身技术能够极大地增加各类武器平台的突防能力和生存能力。隐身性能也因此成为提升机、舰、弹、车等武器装备生存能力和提高作战效能制胜对手的关键技术指标之一。

本文从武器装备的实际电磁攻防需求出发, 阐述电磁超材料的发展历程和技术落地进程现状, 并重点介绍近年来智能可重复编程超材料及智能隐身微系统的发展前景, 最后对超材料技术的未来做了应用难点分析、展望和期盼。

## 1 电磁波隐身

武器平台是由于自身发出的特征信号(如红外、光学特征信号, 射频信号)或外界探测波接触物体后反馈的物体特征信息(如雷达反射信号)进入敌方探测器中而被发现的, 因此隐身在军事上又得名“目标特征信号控制(signature control or suppression, SCS)”<sup>[2]</sup>。从以上来源出发, 雷达隐身的实现手段可大体分为吸波或定向散射、调节物体的散射光与背景类似和干扰欺骗 3 种方式<sup>[3]</sup>, 其中最成熟的是吸波或定向散射技术。以美国 F117A 隐身战斗机为例, 为了缩减后向散射, 受当时的计算电磁学方法和超级计算机性能限制, 设计人员将飞行器的外形修型为每个水平面与垂直面的夹角大于 30° 的多面体结构, 并涂覆了一层铁氧体吸波涂料来进一步吸收电磁波, 如图 1 所示。



图 1 F117A 隐身战机的独特外观

传统的吸波涂料按照原理划分可大体分为电损耗涂料(非磁性金属氧化物)、磁损耗涂料(羰基铁、铁氧体等)和导电损耗(碳纳米管、石墨烯化合物等)。但吸波涂料存在频带窄、对喷涂厚度精度要求高、密度大、不能综合调节等性能短板。此外, 因为当时缺乏雷达散射控制的有效手段, F117A 甚至没有安装火控雷达, 这在如今的复杂电磁战场环境视点下是无法接受的, 难以满足新一代武器装备电磁攻防的

需要。

一种经人工特殊设计的新型结构材料——超材料(Metamaterial)提供了一种解决如上问题的方案。超材料的概念最初由前苏联科学家 Veselago 提出的左手材料(left handed material, LHM)引出<sup>[6]</sup>, 随后其意义及应用范围不断延伸, 形成了从微波波段到太赫兹、红外、可见光甚至热学、声学及力学等非电磁领域的研究体系, 为实施电磁波与多种物理场的精密控制提供了崭新的方法。根据 2016 年发布的国家标准《电磁超材料术语 GB/T 32005-2015》中, 超材料被定义为“一种特种复合材料或结构, 通过对材料关键物理尺寸上进行有序结构设计, 使其获得常规材料所不具备的超常物理性质。”

## 2 电磁超材料

电磁超材料是具有超越于传统材料电磁特性的新型人工电磁材料, 其主体由周期性的或服从某种排列规律的人工电磁元件所构成, 可以等效的看作人造“原子”和“分子”, 当这些元件被组合在一起时, 便可以在宏观上展现出独特的电磁特性。这些特性可以用来设计多种多样的新型电磁设备, 如负折射<sup>[7]</sup>, 逆切伦科夫辐射<sup>[8]</sup>, 负古斯汉森位移<sup>[9]</sup>, 滤波器<sup>[10]</sup>, 调节偏振<sup>[11]</sup>等等。最初的超材料都是厚度较大的三维体材料, 应用曾被长期限制在学术研究领域, 不便应用至武器装备上。2011 年 9 月, 美国哈佛大学 CAPASSO 课题组设计了二维平面电磁超材料, 即电磁超表面(也被译为超构表面、超颖表面等), 并在《Science》杂志上发表<sup>[12]</sup>。电磁超表面基于相位突变和极化控制思想设计、遵守广义 Snell 折射/反射定律, 它的厚度一般都小于工作波长。这种二维超材料具有尺寸薄、加工精确、易于共形等优势, 极大地提升了其应用前景, 尤其在天线罩和隐身蒙皮领域潜力凸显。因此, 本文后续所提及的超材料实际多为超表面。

从实际作战需求出发, 电磁超材料在武器装备隐身方面的应用有两种最为成熟: 吸波超材料与吸波-透波一体化(以下简称吸-透一体)超材料。吸波超材料通过有序设计的结构, 获得吸收或定向散射雷达来波的功能, 适合应用于一般部位的飞机蒙皮上。吸-透一体超材料允许某一工作频带内的电磁波透过, 而在带外显示为吸波性质, 适用于天线罩等需要收发电磁波部位的隐身。

在吸波超材料方面, 2008 年, 美国波士顿学院的 PADILLA W J 课题组<sup>[13]</sup>首次设计了吸波超材料, 这种材料由窄金属丝(底层)、中介质、谐振结

构(顶层)3层组成,几乎可以完全吸收11.5 GHz频点的反射电磁场,达到隐身的目的,其单元结构与吸收性能如图2所示。2009年,美国爱荷华州立大学SOUKOULIS C M课题组<sup>[14]</sup>设计了能够吸收7.7 GHz频率处电磁波的手性超材料,对垂直极化和水平极化入射波都有效。东南大学崔铁军院士课题组<sup>[15]</sup>设计了能够在3个频点吸收电磁波的超材料,这种方法经常被用于拓宽吸收频带。2014年,美国德州大学奥斯汀分校的ALU A课题组提出了一种覆盖型超材料,可以对天线散射进行管理,达到欺骗敌人或者是隐蔽自身的目的。2017年,新加坡南洋理工大学MOU J和SHEN Z<sup>[17]</sup>提出了一种运用了非福斯特(non-Foster)电路的超材料,能够吸收P波段电磁波。

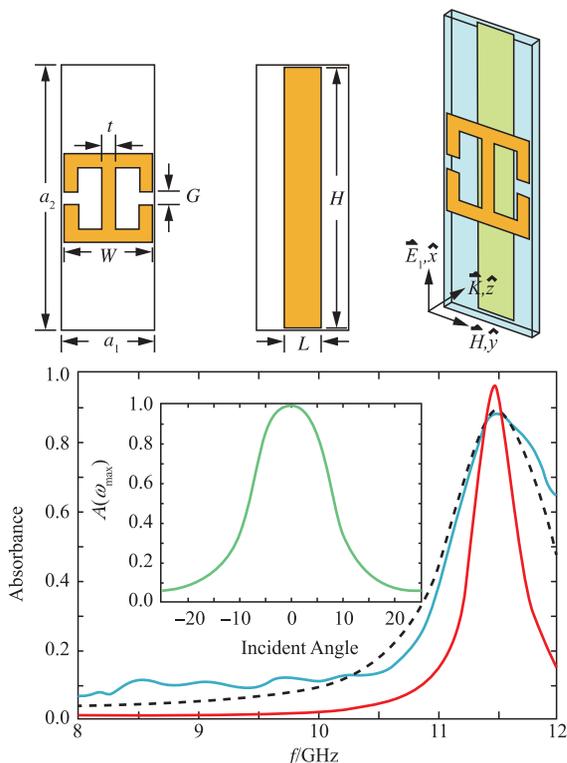


图2 PADILLA W J 课题组设计电磁超材料的单元电路结构与其吸收性能<sup>[13]</sup>

飞行器天线罩通常已经被设计为隐身外形,可将正面入射的电磁波反射到非威胁方向,避免电磁波进入雷达舱内产生腔体散射,但这些反射信号仍然可能被敌双站、多站雷达捕捉到。因此应用一种能在工作频带内透过电磁波、频带外吸收电磁波的吸-透一体材料是设计天线罩的更优选择。美国俄亥俄州立大学MUNK B A<sup>[18]</sup>于20世纪60年代就开始在雷达散射控制方面进行研究,发表了一系列有关频率选择表面(frequency selective surface, FSS)的研究成果,催生了一系列在特定频段的吸-透一体电磁结构。2012年,意大利比萨大学的MONORCHIO A课题组<sup>[19]</sup>提出了低透高吸隐身

天线罩,上层电阻层由方环周期结构组成,下层由有选频透过性的电磁表面构成。2014年,电子科技大学肖绍球课题组<sup>[20]</sup>设计了一种中频透过,两侧频带吸收的带通吸-透一体电磁材料,其电阻层与筛选层都由方环和交叉偶极子构成,电阻层中被嵌入了集总元件,其单元结构和S参数如图3所示。2017年,国防科技大学付云起教授课题组<sup>[21]</sup>提出了一种带有集总电路元件的低吸高透吸-透一体材料。2019年,文献<sup>[22]</sup>设计了具有2个吸收带和2个通过带的双通道吸透一体电磁材料。

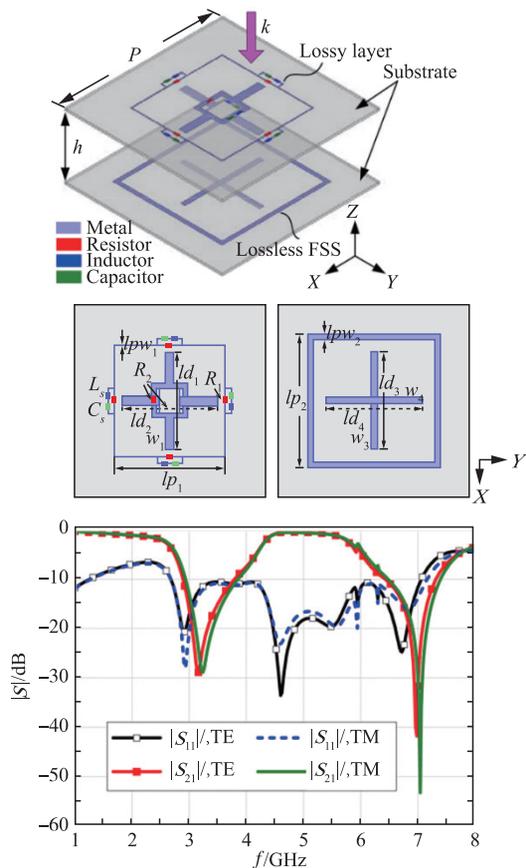


图3 电子科技大学肖绍球课题组设计电磁材料的结构与吸透性能示意图<sup>[20]</sup>

传统的,仅依托于静态结构发挥作用的超材料出厂后即定型,只能静态调整材料的散射,一旦外部电磁环境有变化,这种静态超材料的预期工作性能将会大幅降低,导致其应用具有较大的局限性。因此,研究人员开始尝试在静态结构中加入有源元件要素,来实现对电磁波的主动实时控制。从控制途径来分类,有热调制<sup>[23]</sup>、机械调制、光调制<sup>[26]</sup>和电调制<sup>[27]</sup>等。电调制又可按照有源元素的分类分为电调材料和集总电路元件等。其中,由于电路元件可以很方便地被集成在微波超材料的单元结构上,如图4所示,且现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array, FPGA)可以以编程的方式控制这些电路元件的电参数,因此嵌入电路元件的

微波超材料在雷达隐身和射频隐身领域有着较大的应用前景。

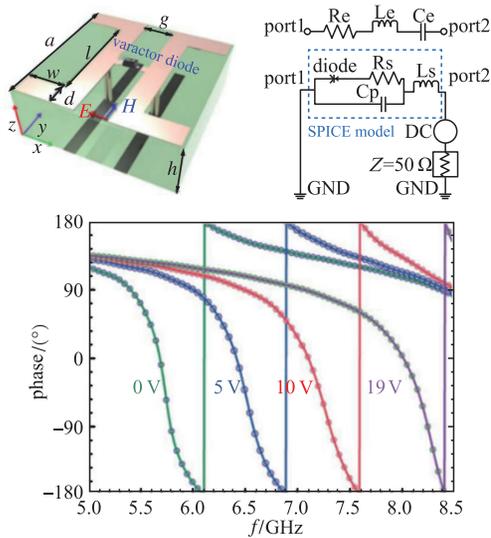


图 4 典型可重复编程微波超材料单元的结构示意图及其  $S_{11}$  参数<sup>[28]</sup>

2010年,英国肯特大学的 SANZ-IZQUIERDO B 等人<sup>[29]</sup>设计了一类可调吸-透一体电磁材料,他们在同心的开口谐振环上装设了 PIN 二极管或变容二极管,分别实现吸-透种类和工作频率调节的功能。2012年,空军工程大学曹祥玉教授团队<sup>[30]</sup>提出利用分形结构的自相似性,在 Hilbert 超表面结构中嵌入了 2 个二极管,完成对吸波频段的调控。2014年,崔铁军院士课题组<sup>[31]</sup>和美国宾夕法尼亚大学 ENGHETA 课题组<sup>[32]</sup>相互独立提出数字超材料的概念。崔铁军课题组提出了一种可重复编程编码超表面,在单元结构上加入可由馈电调节的 PIN 二极管,2 种分别对应工作频率下 0 与  $\pi$  的反射相位,这 2 种状态分别对应二进制编码的“0 状态”和“1 状态”,如图 5 所示。至此,通过 FPGA 可以实时对单元结构的反射相位进行调整,达到反射波控制的效果。浙江大学冉立新课题组<sup>[33]</sup>在超材料单元中加入变容二极管,达到通过馈电切换超表面的透波和“不透明”的状态。2016年,空军工程大学杨欢欢课题组<sup>[34]</sup>设计了应用包含 PIN 二极管的单元结构,实现了动态偏振、散射和聚焦控制等功能。2016年,西安交通大学的徐卓课题组<sup>[35]</sup>提出了一种使用 PIN 二极管的控制极化波形的透射型超表面。同年,法国第一雷恩大学的 POULIGUEN P 课题组<sup>[36]</sup>设计了由 2 个 PIN 二极管组成的透射超表面,拥有较为理想的反射和透射系数。2018年,希普布尔印度工程科学技术学院的 MITRA D 课题组<sup>[37]</sup>设计了可切换的吸-透一体超材料,其底层的频率选择表面上装设了 PIN 二极管,可依控制信号在 2.88 GHz 处切换为透波状态,而 C 波段和部分 X 波段呈

现吸波状态。2019年,南京大学冯一军教授课题组<sup>[38]</sup>提出了一种可调双极化频率吸-透一体超材料,在 0.8~3.4 GHz 频段内对电磁波的吸收率超过 80%,在 1.6 GHz 处表现为透波。同年,崔铁军课题组设计了一种可重复编程时域数字编码超表面,在调节变容管的馈电后,反射波的相位和频谱也会随之被改变,实现多普勒隐身,在雷达对抗领域有着较高的潜在应用价值。

这类吸-透一体超材料制作的天线罩一般在开启时(PIN 管截断)表现出选频透过性,在关闭时(PIN 管导通)表现为一种类似 Salisbury 屏的性质,即在一定频段内呈现完全的电磁波吸收效应。配合隐身战机雷达的猝发控制,可以非常有效地实现射频隐身。

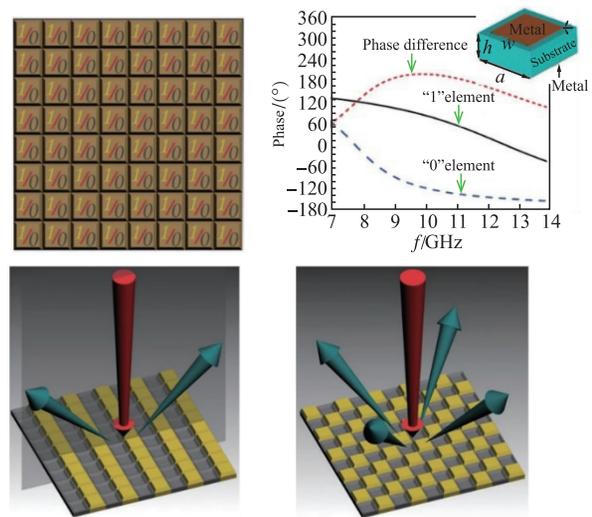


图 5 可重复编程编码超表面<sup>[31]</sup>

电磁超材料在近数十年间也开始在武器装备上进行应用。1985年,美国空军首次提出了“智能蒙皮”技术<sup>[40]</sup>。随后,美国洛克希德马丁公司在 F-22 隐身战机设计中就应用了频率带通选择功能的天线罩。2012年,美国雷神公司开发了“透波率可控人工复合蒙皮材料”,研究人员在蒙皮材料中使用了带有可变电容的电磁微结构表面,通过控制每个微结构上变容元件的偏置电压,便可以改变电磁表面的透波参数,从而实时控制蒙皮的透波特性。据美国《航空周刊》网站报道,西门子与英国航宇系统公司正在开展应用于欧洲战斗机样机的智能蒙皮研制工作。该蒙皮将可实现雷达、辅助通信以及作为主动隐身系统的功能<sup>[41]</sup>。俄罗斯第五代战机苏-57 应用了超材料对其在电磁及光波波段的隐身特性进行优化<sup>[42]</sup>。

### 3 智能超材料

所谓智能隐身,应当是以非静态方式工作,能够

实时“观察”到空间电磁波的变化,“定位”入射波,自主“决策”处理信息,并实施自适应隐藏军事装备“行动”的一种技术。上节所述的一众可重复编程超材料实现了动态工作的功能,为实现智能隐身提供了硬件素材。然而,这些超材料多数只实现了主动调控部分的设计,缺乏“观察”与自主“决策”环节,尚不足以被称为智能超材料。一个合格的智能隐身应当“观察”周遭的电磁环境,并且自主“决策”各个单元结构如何调控。

深度学习是一种基于神经网络对数据进行表征学习的人工智能算法,其历史溯源悠久,后在 2006 年由加拿大多伦大学的 HINTON G E 正式提出<sup>[43]</sup>。在静态超材料的设计中,深度学习技术就已经被用于结构性能优化<sup>[44]</sup>。在可重复编程超材料出现后,深度学习技术可以依靠大量训练数据来预测超材料单元结构预想的分布情况。2020 年,浙江大学陈红胜课题组<sup>[45]</sup>提出了一种“变色龙”式智能隐身系统。这种隐身系统工作在 6.7~9.2 GHz,使用预先训练的人工神经网络,建立起入射电磁波与反射电磁波的关系,进而建立起与超材料单元结构馈电的关系。如此可通过感知入射波,迅速计算出所有的偏置电压并回传给智能超材料,整个过程不需要人为干预,即达成自主智能隐身的功能。该隐身系统的“观察”和“定位”部分分别由两个探测器组成,分别监测周围环境和入射波的变化。如图 6 所示,该系统的演示样机蒙皮部分由 2 片仅 2 mm 厚的超表面组成,地形环境由凹凸不平的金属材料模拟。样机放置在地面不同位置,该系统可以如“变色龙”一般迅速融入环境。相比于动物界中的变色龙需要数秒到数十秒才能融入背景,该系统可在 15 ms 内迅速完成反应。这种隐身系统对背景迅速变换的复杂电磁环境隐身领域具有重大价值。

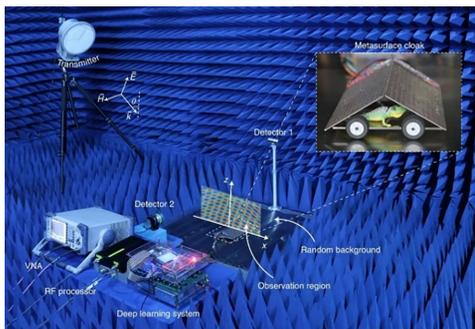


图 6 浙江大学陈红胜课题组设计的基于深度学习的“变色龙”式微波隐身系统<sup>[45]</sup>

2021 年,东南大学崔铁军课题组<sup>[46]</sup>设计了一种针对测速雷达的智能多普勒隐身系统。如图 7 所示,这种智能多普勒隐身系统由超材料(超表面)、处理单元、速度测量装置、信号源等设备组成。在接收

到速度信息后,处理单元将驱动信号源产生检测到的多普勒频率调制的信号,从而改变超材料单元结构的馈电。超材料部分的厚度为 2 mm 左右,可以工作在 2.78~6.32 GHz 的频带。这种智能多普勒隐身系统能够对任意极化入射电磁波实现最大 400 kHz 的频移。这种隐身系统能够自主适应运动物体的变化速度,来实时消除不同的多普勒频移,产生速度欺骗干扰,并可能令自身被敌方雷达的动目标检测(moving target indicator, MTI)滤波器算法所忽略,达到隐藏自身的目的。

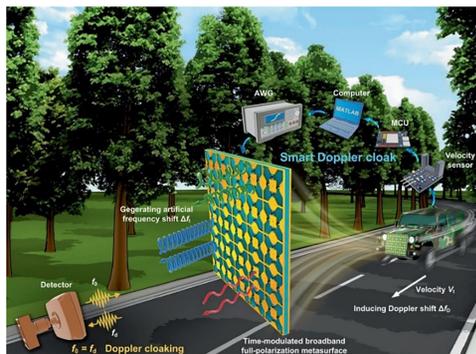


图 7 东南大学崔铁军课题组设计的智能微波多普勒隐身系统<sup>[46]</sup>

通过加载更复杂的电子电路,超表面可以进一步实现更复杂的隐身功能。2017 年,意大利罗马第三大学的 BILOTTI F 课题组<sup>[47]</sup>提出了一种利用超表面设计智能隐身天线的方案,能够实现天线对脉冲信号探测隐身,而在连续波信号照射下工作的功能,如图 8 所示。这种超表面基于波形选择原理<sup>[48]</sup>,其单元结构中嵌入了由二极管桥、电感与电阻器件组成的集总元件电路。当脉冲信号输入时,整流电路呈开路,抑制天线的散射特征,降低被截获概率,对外表现为隐身特性。只有当连续波信号输入时,电路呈短路,天线可正常工作。该设计在理论上可以对 3 GHz 的脉冲雷达信号隐身,但考虑到整流电路较为复杂,投入应用尚需时日。

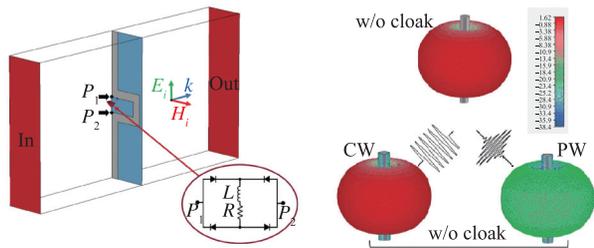


图 8 意大利罗马第三大学的 BILOTTI 课题组提出的智能隐身天线构想<sup>[47]</sup>

## 4 机遇与挑战

### 4.1 电磁超材料创造的机遇

自进入 21 世纪以来,电磁超材料技术取得了长

足的发展,尤其是可重复编程超材料的出现,为智能隐身打通了实用化的技术通道。目前来看,使用电磁超材料进行武器装备的隐身具有如下优势:

轻量化(厚度薄且重量轻)。工作在微波频段的超材料多采用常规的印制电路板(printed circuit board, PCB)工艺制造,以常用的多层PCB为例,其面密度一般小于 $4 \text{ kg/m}^2$ ,厚度小于 $2 \text{ mm}$ ,与传统涂覆型吸波材料如铁氧体相比,在铺敷厚度上相仿,但密度要低3个数量级之多<sup>[49]</sup>。

可动态调控,利于频谱控制。传统的磁性吸波涂料、介电常数渐变材料、高分子蜂窝芯等隐身材料在出厂时即定型,不能动态调整。可重构编程超材料给予了武器装备动态隐身的能力,有利于实时调整隐身效果以及优化用频管理。

促进电磁战攻防装备一体化。一体化是指将功能相近,相互关联的数个设备组合成一个系统,达到简化系统的目的。智能可重复编程超材料具有动态散射调控功能,无需额外电子战吊舱支持,便可将目标物体散射调节至很小、很大甚至呈数个假目标。利用这种超材料,可以在不破坏隐身外形的情况下,实现电磁静默状态与主动博弈状态之间的切换,更可结合基于电磁频谱的有源抵消技术和基于低零功率的电磁频谱的灵巧电磁对抗技术,包括低功率的灵巧干扰技术、主被动隐身和基于LPI/LPD的探测和通信技术<sup>[1, 50]</sup>,实现对电磁频谱域的控制。

#### 4.2 电磁超材料面临的挑战

同时,超材料技术尤其是智能超材料的应用也面临着诸多挑战:

1)对复杂外形的共形造成了超材料制造加工的困难。尽管空基平台对隐身的需求最为迫切,但下一代隐身战机通常拥有复杂的气动外形,如翼身融合构型中存在的大量曲面,会导致一般的PCB工艺不能满足制造要求。解决这一问题通常有2种技术途径,一是在薄膜基底,如氧化铟锡<sup>[51]</sup>(indium tin oxide, ITO)等基底材料上通过光刻得到柔性超表面,然后分块转移贴覆在重点隐身区域上。这种方法在工艺上较为简单,但分块造成的接缝与单元结构的不连续也会对隐身性能造成影响。二是先将超材料的基底材料成型,或利用镀膜工艺将得到金属化的表面,然后在表面激光镌刻所需的单元结构,这种方法能够较好地保证结构的完整性,但是也存在加工周期长、加工精度难控制等问题<sup>[52]</sup>。

2)对复杂外形的共形造成了超材料单元结构性能的损耗。曲面处单元结构的S参数必然与设计时所预期的平面单元结构不同。解决这一问题尚需更多针对性的技术攻关<sup>[53]</sup>,目前的解决方法是只在重点隐身部位,如飞行器的机翼前缘、垂直尾翼等可能产生强散射的部位覆盖超材料。此外,在智能超材

料中,可以采用有源激励微调的方式一定程度上补偿其性能损失。

3)对复杂外形的共形造成了智能超材料隐身收敛的困难。对于小规模部署的智能超材料,其技术成熟度已经比较高,如图6中陈红胜组所设计的隐身车,其蒙皮仅由2块三角放置的方形超材料(超表面)组成。然而对于复杂的武器装备外形来说,随着外形自由度数量的增加,大的解空间呈指数级增长,导致数据集采集和算法建模的任务繁重<sup>[54]</sup>。在目前已有的技术手段下,仍然只能在重点隐身部位覆盖超材料。

4)智能超材料单元结构引入的集总可调器件限制了其工作频带。传统的静态超材料已经可实现宽频隐身。然而在超材料单元结构中引入调节范围有限的集总有源器件,如有限调谐范围的变容二极管,会导致其工作频带变窄,导致智能隐身难以具备宽频性能。目前的应对策略是抓住主要矛盾,专注于杀伤环上的某一个环节:据统计,针对飞行器的X波段的火控雷达数目约占30%,尤其是中制导多工作在X波段。故飞行器的智能隐身应着重于X波段,允许敌“观察”与“定位”,但在敌“攻击行动”环节干扰其武器的中段甚至末端制导,达到提高我方装备生存率的目的。

5)智能隐身系统有待进一步集成化。武器装备尤其是飞行器对载荷、空间等要求非常苛刻,但现有的智能隐身系统方案中,MCU、FPGA、信号源等设备占用了大量空间。未来应将各种电子设备进行体系集成,推进智能隐身系统从研究人员的设计构想原型落地成为成熟的工程型号。

## 5 结语

我国的电磁超材料研究多由高校具有电子信息学科背景的团队完成,主要擅于电路设计、电磁仿真与测试,而对物理结构、加工工艺以及材料应用等深层知识掌握不够全面。尤其是在近年来兴起的智能隐身领域,其研究对象需要从作战需求分析出发,形成一整套工业解决方案,已经远远超出了单一智能材料的范畴。综上所述,作者对电磁超材料的未来发展做如下建议:

1)需组建涵盖电子信息、高分子材料、结构强度、飞行器设计、作战效能仿真等多学科交叉的复合型研究团队,展开对电磁超材料的深入研究。

2)工业部门应结合自身优势发挥牵头作用,对以智能超材料为核心隐身功能结构功能一体化蒙皮进行开放性演示验证研究,快速提高技术成熟度,推进前瞻性、颠覆性技术落地。

## 参考文献

- [1] CLARK B, GUNZINGER M. Winning the Airwaves: Regaining America's Dominance in the Electromagnetic Spectrum [M]. Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2015.
- [2] 桑建华. 飞行器隐身技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2013.
- [3] CHEN T H, ZHENG B, QIAN C, et al. Progress of Novel Electromagnetic Cloaking Research [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(15): 154104.
- [4] SUN X Y, LIU X, SHEN X, et al. Reprint of Graphene Foam/Carbon Nanotube/Poly(Dimethyl Siloxane) Composites for Exceptional Microwave Shielding [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 92: 190-197.
- [5] PANWAR R, PUTHUCHERI S, SINGH D, et al. Design of Ferrite-Graphene-Based Thin Broadband Radar Wave Absorber for Stealth Application [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- [6] VESELAGO V G. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of Permittivity and Permeability [J]. Soviet Physics Uspekhi, 1968, 10(4): 509-514.
- [7] CHEN H S, RAN L X, HUANGFU J T, et al. Left-Handed Materials Composed of Only S-Shaped Resonators [J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2004, 70(5): 057605.
- [8] LUO C Y, IBANESCU M, JOHNSON S G, et al. Cerenkov Radiation in Photonic Crystals [J]. Science, 2003, 299(5605): 368-371.
- [9] KONG J A, WU B I, ZHANG Y. Lateral Displacement of a Gaussian Beam Reflected from a Grounded Slab with Negative Permittivity and Permeability [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(12): 2084-2086.
- [10] ALLEN K W, DYKES D J P, REID D R, et al. Multi-Objective Genetic Algorithm Optimization of Frequency Selective Metasurfaces to Engineer Ku-Passband Filter Responses [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2020, 167: 19-30.
- [11] CHENG Y Z, LI W Y, MAO X S. Triple-Band Polarization Angle Independent  $90^\circ$  Polarization Rotator Based on Fermat's Spiral Structure Planar Chiral Metamaterial [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2019, 165: 35-45.
- [12] YU N F, GENEVET P, KATS M A, et al. Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction [J]. Science, 2011, 334(6054): 333-337.
- [13] LANDY N I, SAJUYIGBE S, MOCK J J, et al. Perfect Metamaterial Absorber [J]. Scientific Reports, 2008, 100(20): 207402.
- [14] WANG B N, KOSCHNY T, SOUKOULIS C M. Wide-Angle and Polarization-Independent Chiral Metamaterial Absorber [J]. Physical Review B, 2009, 80(3): 033108.
- [15] SHEN X P, YANG Y, ZANG Y Z, et al. Triple-Band Terahertz Metamaterial Absorber: Design, Experiment, and Physical Interpretation [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(15): 154102.
- [16] SORIC J C, FLEURY R, MONTI A, et al. Controlling Scattering and Absorption with Metamaterial Covers [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(8): 4220-4229.
- [17] MOU J C, SHEN Z X. Broadband and Thin Magnetic Absorber with Non-Foster Metasurface for Admittance Matching [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6922.
- [18] MUNK B A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 18(1): 94-94.
- [19] COSTA F, MONORCHIO A. A Frequency Selective Radome with Wideband Absorbing Properties [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(6): 2740-2747.
- [20] SHANG Y P, SHEN Z X, XIAO S Q. Frequency-Selective Resorber Based on Square-Loop and Cross-Dipole Arrays [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(11): 5581-5589.
- [21] CHEN Q, YANG S L, BAI J J, et al. Design of Absorptive/Transmissive Frequency-Selective Surface Based on Parallel Resonance [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(9): 4897-4902.
- [22] GUO M, CHEN Q, SUN Z S, et al. Design of Dual-Band Frequency-Selective Resorber [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(5): 841-845.
- [23] SHU F Z, WANG J N, PENG R W, et al. Electrically Driven Tunable Broadband Polarization States Via Active Metasurfaces Based on Joule-Heat-Induced Phase Transition of Vanadium Dioxide [J]. Laser & Photonics Reviews, 2021, 15(10): 2100155.
- [24] WANG Z J, JING L Q, YAO K, et al. Origami-Based Reconfigurable Metamaterials for Tunable Chirality [J]. Advanced Materials, 2017, 29(27): 1700412.
- [25] CONG L Q, PITCHAPPA P, LEE C K, et al. Active Phase Transition via Loss Engineering in a Terahertz Mems Metamaterial [J]. Advanced Materials, 2017, 29(26): 1700733.
- [26] HAN T C, LIU Y X, LIU L, et al. Light-Programmable Manipulation of DC Field in Laplacian Meta-Devices [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 12208.
- [27] ZHANG Y F, FOWLER C, LIANG J H, et al. Electrically Reconfigurable Non-Volatile Metasurface U-

- sing Low-Loss Optical Phase-Change Material [J]. *Nature Nanotechnology*, 2021, 16(6): 661-666.
- [28] LIAO D S, WANG H G, ZHANG Y F, et al. Bi-functional Reconfigurable Metasurface for Manipulating Reflected Waves in Real-Time with Broad Tuning Band [J]. *Electronics Letters*, 2019, 55 (19): 1037-1039.
- [29] SANZ-IZQUIERDO B, PARKER E A, BATCHLOR J C. Dual-Band Tunable Screen Using Complementary Split Ring Resonators [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(11): 3761-3765.
- [30] LIU T, CAO X Y, GAO J, et al. RCS Reduction of Waveguide Slot Antenna with Metamaterial Absorber [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(3): 1479-1484.
- [31] CUI T J, QI M Q, WAN X, et al. Metamaterials, Digital Metamaterials and Programmable Metamaterials [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3 (10): e218.
- [32] GIOVAMPAOLA C D, ENGHETA N. Digital Metamaterials [J]. *Nature Materials*, 2014, 13 (12): 1115-1121.
- [33] LI H, YE D X, SHEN F Z, et al. Reconfigurable Diffractive Antenna Based on Switchable Electrically Induced Transparency [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015, 63 (3): 925-936.
- [34] YANG H H, CAO X Y, YANG F, et al. A Programmable Metasurface with Dynamic Polarization, Scattering and Focusing Control [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 35692.
- [35] LI W, XIA S, HE B, et al. A Reconfigurable Polarization Converter Using Active Metasurface and Its Application in Horn Antenna [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2016, 64 (12): 5281-5290.
- [36] DI PALMA L, CLEMENTE A, DUSSOPT L, et al. 1-Bit Unit-Cell for Transmitarray Applications in Ka-Band [C]// 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-4.
- [37] BAKSHI S C, MITRA D, GHOSH S. A Frequency Selective Surface Based Reconfigurable Resorber with Switchable Transmission/Reflection Band [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18 (1): 29-33.
- [38] QIAN G X, ZHAO J M, REN X M, et al. Switchable Broadband Dual-Polarized Frequency-Selective Resorber/Absorber [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(12): 2508-2512.
- [39] ZHAO J, YANG X, DAI J Y, et al. Programmable Time-Domain Digital-Coding Metasurface for Non-Linear Harmonic Manipulation and New Wireless Communication Systems [J]. *National Science Review*, 2019, 6(2): 231-238.
- [40] LOCKYER A J, ALT K H, KINSLOW R W, et al. Development of a Structurally Integrated Conformal Load-Bearing Multifunction Antenna: overview of the Air Force Smart Skin Structures Technology Demonstration Program [C]// Proceedings of SPIE, 1996. doi: 10.1117/12.240429.
- [41] 张亚坤, 曾凡, 戴全辉, 等. 雷达隐身技术智能化发展现状与趋势[J]. *战术导弹技术*, 2019(1): 56-63.
- [42] 祝叶华. 未来世界由超材料建构[J]. *科技导报*, 2016, 34(18): 14-26.
- [43] HINTON G E, OSINDERO S, TEH Y W. A Fast Learning Algorithm for Deep Belief Nets [J]. *Neural Computation*, 2006, 18(7): 1527-1554.
- [44] MA W, CHENG F, LIU Y M. Deep-Learning-Enabled on-Demand Design of Chiral Metamaterials [J]. *ACS Nano*, 2018, 12(6): 6326-6334.
- [45] QIAN C, ZHENG B, SHEN Y C, et al. Deep-Learning-Enabled Self-Adaptive Microwave Cloak without Human Intervention [J]. *Nature Photonics*, 2020, 14 (6): 383-390.
- [46] ZHANG X G, SUN Y L, YU Q, et al. Smart Doppler Cloak Operating in Broad Band and Full Polarizations [J]. *Advanced Materials*, 2021, 33 (17): e2007966.
- [47] VELLUCCI S, MONTI A, BARBUTO M, et al. Waveform-Selective Mantle Cloaks for Intelligent Antennas [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, 68(3): 1717-1725.
- [48] WAKATSUCHI H, LONG J A, SIEVENPIPER D F. Waveform Selective Surfaces [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(11): 1806386.
- [49] 姬金祖, 黄沛霖, 马云鹏, 等. 隐身原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2018.
- [50] 张澎, 张成, 管洋阳, 等. 关于电磁频谱作战的思考[J]. *航空学报*, 2021, 42(8): 525898.
- [51] 吴杨慧, 王俊杰, 赖森锋, 等. 用于航空电磁防护和智能隐身的光学透明柔性宽带吸波器的试验研究[J]. *航空科学技术*, 2019, 30(5): 70-74.
- [52] 孟庆杰, 樊君, 石军威, 等. 隐身天线罩的研究现状与发展趋势[J]. *纺织导报*, 2018(S1): 108-112.
- [53] 何小祥, 薛尉, 徐伟, 等. 大规模柱面频率选择表面电磁特性分析[J]. *南京理工大学学报*, 2012, 36(1): 112-117.
- [54] QIAN C, CHEN H. A Perspective on the Next Generation of Invisibility Cloaks—Intelligent Cloaks [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(18): 180501.

(编辑:徐楠楠)