电磁超材料 —— 从等效媒质到现场可编程系统

崔铁军^{1,2}

1. 东南大学信息科学与工程学院毫米波国家重点实验室, 南京 210096

2. 东南大学电磁空间科学与技术研究院, 南京 210096

E-mail: tjcui@seu.edu.cn

收稿日期: 2020-05-06; 接受日期: 2020-06-24; 网络出版日期: 2020-10-15

国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0700201, 2017YFA0700202, 2017YFA0700203)、国家自然科学基金 (批准号: 61631007, 61731010, 61735010)、国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (批准号: 61761136007) 和 111 计划 (批准号: 111-2-05) 资助项目

摘要 电磁超材料是由亚波长单元周期或非周期地排列而组成的人工电磁结构, 可通过设计结构单元及其排布自由地控制电磁波, 是信息领域的研究热点之一. 本文介绍了东南大学毫米波国家重点实验室从事电磁超材料研究的历史和最新进展, 主要分为 3 个发展阶段. 第 1 阶段发展了等效媒质超材料, 提出了超材料结构的等效媒质一般性理论, 实验验证了宽带地面隐身衣、电磁黑洞、电磁幻觉及各向异性零折射率等奇特物理现象及功能器件, 并在超材料变换光学透镜、平板透镜天线, 以及宽带电磁隐身表面等方面获得了应用. 第 2 阶段开拓了基于人工表面等离激元 (surface plasmon polariton, SPP) 传输线的微波领域新方向, 提出一种超薄、低损耗、条带式的 SPP 传输线, 能在共形曲面上传输无畸变的 SPP 波; 基于此, 研制了一系列微波 SPP 无源器件、SPP 放大器和倍频器, 以及 SPP 天线, 构建了首个全 SPP 无线通信射频收发系统, 在间距为深亚波长的两个通道上实现了两个独立视频无干扰的超视距传输. 第 3 阶段创建了信息超材料新体系, 提出用数字编码表征超材料的新思想, 通过控制不同的数字编码序列实时地调控电磁波, 实现了超材料的现场可编程功能; 提出在信息超材料的物理平台上进行信息熵操作及相关的数字卷积定理和加法定理, 在物理空间上构筑起数字空间, 实现了对电磁波和数字信息的同时调控; 基于此研制了新架构的微波成像系统、无线通信系统和智能感知系统.

关键词 电磁超材料, 等效媒质, 表面等离激元, 数字编码, 现场可编程, 信息超材料, 信息系统

1 引言

电磁超材料的研究起源于 1965 年俄罗斯科学家 Veselago 提出的左手媒质 (或称左手材料) 概念^[1]. 所谓左手媒质, 是指介电常数和磁导率同时为负的媒质. Veselago 在理论上证明了左手媒质具

引用格式: 崔铁军. 电磁超材料 —— 从等效媒质到现场可编程系统. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 1427–1461, doi: 10.1360/SSI-2020-0123
Cui T J. Electromagnetic metamaterials—from effective media to field programmable systems (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 1427–1461, doi: 10.1360/SSI-2020-0123

有负的折射率, 会产生负折射现象, 因此左手媒质亦被称为负折射率媒质. 同时, Veselago 还证明了左手媒质中电磁波的背向传输、逆多普勒效应, 以及逆切伦科夫 (Cherenkov) 辐射等与常识相反的物理现象. 然而, 由于自然界并不存在介电常数和磁导率同时为负的媒质, 因此在 Veselago 论文发表后的 30 余年里左手媒质一直无人问津. 直到英国帝国理工学院 (Imperial College London) 的 Pendry 爵士等于 1996 年利用周期性金属线结构在微波段构造出等效的负介电常数^[2]、1999 年利用周期性开口谐振环结构设计出等效的负磁导率^[3], 这一方向才得到蓬勃发展. 因此, 这两个工作被认为是现代超材料研究的开端.

所谓电磁超材料 (亦称超构材料、新型人工电磁媒质、特异媒质等), 是指将亚波长单元按照周期性或非周期性排布而形成的人工结构. 通过设计单元参数和单元的空间排列方式, 人们可构造出自然界媒质和传统技术不能实现或很难实现的超常媒质参数 (例如负介电常数、负磁导率、负折射率、零折射率等), 以及媒质参数的任意非均匀分布, 从而产生全新的物理现象. 例如, Pendry 爵士^[4] 于 1999 年证明了左手媒质能放大凋落波, 实现完美成像, 这是物理上的一个重大突破. 2001 年, 加州大学圣地亚哥分校 (University of California, San Diego) 的 Smith 教授 (现任杜克大学 (Duke University) 教授) 等^[5] 将 Pendry 所提出的金属线结构和开口谐振环阵列有机组合, 同时实现了负介电常数和负磁导率, 并首次实验验证了负折射现象, 该工作入选当年 *Science* 杂志所遴选的年度 “十大科学突破”, 带动了左手媒质的研究热潮.

本文作者于 2004 年初接触左手媒质的研究, 开启了东南大学毫米波国家重点实验室的电磁超材料方向. 由于条件所致, 初期研究仅限于左手媒质新奇特性的理论计算. 根据电磁波理论, 负的介电常数和负的磁导率会导致电磁能量密度为负, 以及电磁波不遵循时间因果性问题. 因此本文作者的前两个工作是与麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology) 孔金瓯教授合作证明了具有色散特性的左手媒质满足时间因果性^[6], 推导出时域电磁能量的一般性表达式并证明其永远为正^[7], 部分解决了当时学术界对这一方向的质疑. 2005 年我们又发现了左手媒质的另一个超常性质: 可把电磁波完美地局限在一个开放区域^[8]. 随后, 本文作者的研究团队提出并数值验证了左手媒质的高功率密度产生^[9]、应用各向异性手征媒质产生负折射^[10]、应用强手征媒质产生负反射^[11] 等一系列超常现象的理论计算工作. 在开展了一段时间的理论研究后, 本文作者意识到实验对这一领域的重要性, 于 2005 年开始搭建超材料的实验平台. 左手媒质的实验研究有两条途径, 其一是 Smith 教授等^[5] 提出的应用人工微结构验证空间波效应, 其二是多伦多大学 (University of Toronto) 的 Eleftheriades 教授和加州大学洛杉矶分校 (University of California, Los Angeles) 的 Itoh 教授及其合作者分别提出的应用电感 (L)、电容 (C) 和传输线网络结构验证其电路等效效应^[12,13]. 由于后者的实验平台较为简单, 我们进行了一系列左手媒质电路实验和功能器件的研究, 包括基于 LC 传输线网络的电磁波局域效应^[14]、凋落波放大实验^[15~17]、高功率密度产生^[18], 以及基于 LC 网络的任意双波段微波器件^[19] 和超宽带微波滤波器^[20] 等.

左手媒质虽然具有很多超常规的物理特征并给人们带来很大期盼, 但由于其实现结构的频带窄和损耗大等缺点使其仅限于物理现象的研究, 因此人们期待超材料领域新的驱动力. 2006 年, Pendry 爵士及合作者^[21] 与英国圣安德鲁大学 (University of St Andrews) 的 Leonhardt 教授^[22] (现任以色列威茨曼科学研究所 (Weizmann Institute of Science) 教授) 相互独立地提出了变换光学的理念, 根据特定需求或设定的功能, 通过坐标变换构建非均匀各向异性媒质以对电磁波进行任意操控, 并据此提出 “隐身衣” (亦称隐身斗篷) 的概念和设计方法; 2006 年 11 月 Smith 教授等^[23] 在微波段制作并实验验证了隐身衣, 2006 年年底该工作再次入选 *Science* 杂志所遴选的年度 “十大科学突破”, 引发超材料新的研究热潮. 相应地, 我们的研究重点也从 LC 传输线网络转移到超材料对空间电磁波的调控上.

变换光学不仅为人们设计任意新奇物理现象提供了理论方法(很多现象无法实现或很难实现),更重要的是提升了人们对超材料内涵的深刻理解. 早期超材料追求的是自然界不存在的媒质参数(例如负介电常数、负磁导率和负折射率)及其对应的超常物理现象,但这些媒质参数必须利用超材料结构的谐振特性才能实现. 在谐振特性附近,必然伴随着频带窄和损耗大的缺陷. 而变换光学产生的非均匀媒质特性(对应于非周期结构)丰富了超材料内涵,即处于非谐振区的宽带和低损耗媒质参数按照所设计的渐变分布同样能自由调控电磁波,因此具有重要的理论意义和工程价值. 这类超材料也通常被称为渐变折射率超材料.

本文详细介绍 2006 年以后我们课题组在电磁超材料领域取得的重要进展及其产生背景,主要分为以下 3 个发展阶段. 第 1 阶段发展了等效媒质超材料,提出了超材料结构的等效媒质一般性理论,制作并实验验证了宽带地面隐身衣、电磁黑洞、电磁幻觉及各向异性零折射率等奇特物理现象,在国际上率先设计并实现了三维变换光学器件;提出低损耗及宽带微波超材料的设计方法,在三维变形龙伯透镜、平板透镜天线,以及宽带电磁隐身表面等方面获得了工程应用. 第 2 阶段开拓了基于人工表面等离激元(surface plasmon polariton, SPP)传输线的微波领域新方向,在国际上率先从微波传输线的角度研究 SPP 超材料,提出了一种超薄、低损耗、可弯折的条带式 SPP 传输线,能在共形曲面上传输无畸变的 SPP 波;基于 SPP 传输线研制了一系列微波 SPP 无源器件和 SPP 放大器及倍频器;提出超薄、具有亚波长及深亚波长尺度的人工局域表面等离激元(localized surface plasmon, LSP)超材料和等效媒质模型,实现了丰富的多极子谐振和高阶多极子谐振;构建了首个全 SPP 的无线通信射频收发系统,在间距为深亚波长的两个通道上实现了两个独立视频无干扰的超视距传输. 第 3 阶段创建了信息超材料新体系,提出用数字编码表征超材料的新思想,通过控制不同的数字编码序列实时地调控电磁波,实现了数字编码超材料和现场可编程超材料;提出在信息超材料的物理平台上进行信息熵操作及相关的数字卷积定理和加法定理,在物理空间上构筑起数字空间,实现了对电磁波和数字信息的同时调控;提出时空编码超材料的概念及时空卷积定理,进一步操控电磁波的空间波束、频谱分布及数字信息;基于信息超材料研制了新架构的微波成像系统、无线通信系统,及智能感知系统.

2 等效媒质超材料

变换光学的核心是把将要实现的物理现象(或功能)和所需要的媒质参数联系起来,因此涌现出大量的奇特器件的理论设计和仿真工作(包括我们提出的任意轴比椭圆形隐身衣^[24]、任意形状共形隐身衣^[25]、消除了电磁参数在内边界存在无穷大值的无奇异性隐身衣^[26],以及任意形状电磁波集中器^[27]等). 然而,如果要制备这些器件,必须将媒质参数和真实超材料结构关联起来,即建立超材料结构的等效媒质模型.

2.1 超材料的等效媒质模型

长期以来,超材料等效媒质的色散公式沿用传统的 Drude-Lorentz 模型^[3,28,29],该模型是基于经典物理在晶格间距非常小的情况下建立的,因此当超材料的单元间距在 1/10 波长左右时,由于空间色散问题,它只能定性,但不能定量地准确表征媒质参数. 为了解决这一问题,我们从麦克斯韦(Maxwell)方程出发,得到超材料结构等效介电常数和等效磁导率的更一般的表达式^[30]:

$$\varepsilon_e = \bar{\varepsilon} \frac{(\theta/2)}{\sin(\theta/2)} [\cos(\theta/2)]^{-S_b}, \quad \mu_e = \bar{\mu} \frac{(\theta/2)}{\sin(\theta/2)} [\cos(\theta/2)]^{S_b}, \quad (1)$$

其中 $\bar{\varepsilon}$ 和 $\bar{\mu}$ 是超材料结构单元的平均介电常数和平均磁导率^[31], θ 是电磁波在一个周期单元内传播时

图 1 (网络版彩图) 一个典型开口谐振环磁谐振结构及其等效媒质参数^[30] ©Copyright 2007 American Physical Society. (a) 平均介电常数; (b) 平均磁导率; (c) 等效介电常数; (d) 等效磁导率. 其中, 开口谐振环的几何参数为 $a = 2.5$ mm, $b = 2.2$ mm, $c = e = 0.2$ mm, $d = f = 0.22$ mm, $g = 1.1$ mm; 介质基板采用 FR4, 其复介电常数为 $4.4 + i0.001$, 厚度为 0.25 mm

Figure 1 (Color online) A typical split-ring resonator and its effective medium parameters^[30]. (a) The average permittivity. (b) The average permeability. (c) The effective permittivity. (d) The effective permeability. Here, the geometrical parameters of the split-ring resonator are $a = 2.5$ mm, $b = 2.2$ mm, $c = e = 0.2$ mm, $d = f = 0.22$ mm, and $g = 1.1$ mm. The dielectric substrate is chosen as FR4 with the thickness of 0.25 mm and complex dielectric constant of $4.4 + i0.001$

所产生的相位差, S_b 是表征结构单元谐振属性的常数 (对电谐振单元 $S_b = 1$; 对磁谐振单元 $S_b = -1$). 一般说来, 平均介电常数和平均磁导率可采用经典的 Drude-Lorentz 模型, 因此方程 (1) 所表述的等效介电常数和磁导率充分考虑了超材料结构的空间色散所带来的影响. 当结构单元趋于无穷小时, 超材料结构的等效介电常数和磁导率退化为 Drude-Lorentz 模型. 图 1(a) 和 (b) 描述了一个典型磁谐振结构——开口谐振环 (见图 1(a) 的内插图) 的平均介电常数和平均磁导率的实部和虚部, 由 Drude-Lorentz 模型给出, 显示出显著的磁谐振特征; 而图 1(c) 和 (d) 的红色曲线展示了我们的新模型所计算的等效介电常数和等效磁导率的实部和虚部.

为了验证新模型给出的等效媒质参数的准确性, 我们根据数值仿真得到的反射系数和透射系数对该开口谐振环结构的等效媒质参数进行提取^[32], 所得精确的介电常数和磁导率如图 1(c) 和 (d) 的绿色曲线所示. 比较图 1(a)~(d) 可清楚地看到 Drude-Lorentz 模型不能反映真实的等效媒质参数, 而方程 (1) 的理论预测结果与真实值非常接近. 因此, 我们所提出的等效媒质一般性模型不需要大量仿真即可准确获取超材料的等效介电常数和磁导率, 为超材料的快速准确设计奠定了基础^[33].

2.2 新奇物理现象及实验验证

变换光学为设计超材料大量的新奇物理特性提供了有效工具,其中隐身衣是最引人注目的成果之一.根据变换光学理论,麦克斯韦方程关于坐标变换具有协变性,据此可以设计包裹在物体外部的超材料,它能引导电磁波绕过物体而向前传播,好像物体不存在一样.因此,在任何位置观察电磁波都无法探测到物体,就像给它穿上了隐身衣.这类隐身衣称为“自由空间隐身衣”,于2006年提出并获得实验验证^[21~23].然而自由空间隐身衣需要极端媒质参数,因此所制备的隐身结构存在频窄带和损耗大等缺陷.为了解决这一问题,我们与杜克大学(Duke University) Smith教授研究组合作研制了第1个宽带和低损耗的“二维地面隐身衣”^[34].根据变换光学,将地面上覆盖有隐身衣的物理空间进行坐标变换,变换成仅有地面的虚拟空间,从而获得隐身衣的媒质参数及其空间分布^[35].我们提出用“T”型结构设计非谐振超材料,以实现地面隐身衣所要求的媒质参数,如图2(a)和(b)所示,可引导电磁波犹如照射在没有目标的平地一样发生镜面反射,从而对地面目标实现隐身.实验表明,该隐身衣的工作频率覆盖了13~16 GHz的宽频带范围,损耗小、隐身效果好,如图2(c)~(e)所示.之后,我们对二维隐身衣做了进一步改进,使其体积更小^[36].

2010年我们在三维隐身方面取得重要突破,和德国卡尔斯鲁尔大学(University Karlsruhe)的Wegener教授与Pendry爵士联合研究组相互独立地研制出“三维地面隐身衣”^[37,38].我们提出的三维隐身衣由二维隐身衣沿光轴旋转而成,可由全介质、非磁性的渐变折射率超材料实现,如图2(f)所示,对全方向入射、不同极化的电磁波均能实现隐身.实验表明,在8~12 GHz(整个X波段)的宽带范围内隐身效果良好^[37].而Wegener教授研究组的三维隐身衣由二维隐身衣向第三维延伸堆积而成,仅对横电模式极化、沿法向60°圆锥角以内入射的电磁波能起到隐身效果^[38].之后,我们提出拉普拉斯(Laplace)方程构架下的隐身方案,利用电阻网络构建了直流场隐身衣(如图2(g)所示)^[39]、直流场外部隐身衣^[40]和直流场有源隐身衣^[41],实验结果展示出优异的隐身效果.

2010年6月,我们首次基于电磁超材料用实验手段模拟了“电磁黑洞”,验证了微波段“电磁黑洞”的性质^[42,43].该人造“电磁黑洞”由一个高损耗的中心内核和一个无耗、折射率呈径向渐变分布的壳层组成,壳层外边界的折射率为1,与自由空间相匹配;壳层内边界的折射率与吸收内核相匹配,从而使入射到“电磁黑洞”的电磁波不发生反射,如图2(h)所示.壳层特有的径向渐变折射率分布使入射电磁波在壳层内发生弯折,螺旋式地行进并流向内核,最终被有耗内核吸收,如图2(i)所示,模拟了真实黑洞的部分性质.电磁幻觉是超材料实现新奇性能的另一个例子,应用变换光学可将一个物体变为另一个物体^[44].我们首次在微波段实现了几个电磁幻觉器件的实验验证,包括将一个尺寸目标虚幻地缩减成小尺寸目标^[45]、将金属目标虚幻地变为介质目标^[46],以及产生真实目标的幻觉像^[47].这些工作的核心是,利用开口谐振环构筑了非均匀各向异性媒质超材料.

与左手媒质的负介电常数和负磁导率类似,零折射率也是应用超材料产生的自然界不存在的媒质参数.我们提出互补型的开口谐振环和LC电谐振结构以构造介电常数接近零的超材料,实验验证了电磁波在填充零折射率超材料的狭窄通道内传输时的隧穿现象^[48~50].然而,零折射率超材料的一大问题是其波阻抗与自由空间波阻抗严重不匹配,因而造成电磁波的强反射.为了解决这一问题,我们分别提出了在直角坐标系和柱坐标系下构建各向异性零折射率超材料^[51,52],使传输方向的媒质参数为零,而横向媒质参数满足阻抗匹配条件.实验证明,位于直角坐标系各向异性零折射率超材料中的点源可直接辐射平面波或准平面波^[51],这一奇特物理特性已经用于高增益天线的研制^[53,54];而位于柱坐标系各向异性零折射率超材料中的多个点源阵列可进行无方向性或各向同性辐射,进而实现高效的空间功率合成^[52].总之,基于超材料的新奇物理现象很多,限于篇幅,这里不一一赘述.

图 2 (网络版彩图) 等效媒质超材料及其新物理现象实验验证. (a) 和 (b) 宽带和低损耗的二维地面隐身衣^[34]; (c)~(e) 二维地面隐身衣隐身效果的实验验证^[34] @Copyright 2009 The American Association for the Advancement of Science; (f) 宽带和低损耗的三维地面隐身衣^[37] @Copyright 2010 Springer Nature; (g) 由电阻网络构成的直流电隐身衣^[39] @Copyright 2012 American Physical Society; (h) 和 (i) 电磁黑洞试验样品及其对电磁波的吸收过程^[42] @Copyright 2010 IOP Publishing and Deutsche Physikalische Gesellschaft

Figure 2 (Color online) Metamaterials based on the effective medium model and experimental verifications of new physical phenomena. (a) and (b) The wideband and low-loss two-dimensional ground-plane cloak^[34]. (c)~(e) Experimental performance of the two-dimensional ground-plane cloak^[34]. (f) The wideband and low-loss three-dimensional ground-plane cloak^[37]. (g) The D. C. electric invisibility cloak made of resistor network^[39]. (h) and (i) The electromagnetic black hole and its absorbing strategy to the electromagnetic waves^[42]

2.3 超材料透镜

新型透镜是超材料带来的既有奇特物理特性又有工程价值的器件, 我们研制了两类超材料透镜: 变换光学透镜和三维平板透镜. 龙伯透镜 (Luneburg lens) 是球对称介质延迟透镜, 其折射率沿径向渐

变分布,球心处的折射率为 1.414,球表面处的折射率为 1,与自由空间匹配.龙伯透镜可将任意方向入射的平面波汇聚至球面对径位置焦点处,能同时接收来自多个方向的信号,具有重要应用价值.然而,在利用球形龙伯透镜实现多波束或进行空间波束扫描时,需要在球形表面上安装馈源阵列或在球面上移动馈源,在工程应用中存在诸多限制.根据变换光学原理,我们将球形龙伯透镜的球缺面变换成一个平面,形成具有零焦距和平坦聚焦面的变形龙伯透镜^[55].该变形龙波透镜保持了龙伯透镜的所有优点:高增益、低副瓣、无相差;只需将馈源阵列放在焦平面上即可实现多波束,或者将馈源在焦平面上移动即可进行空间波束扫描.但是,变形龙伯透镜具有复杂的三维非均匀折射率分布,且折射率最大值远大于 1.414.所选择的球缺底面越大,产生的波束扫描角越大,但变换得到的折射率越高,因此变形龙伯透镜越难实现.我们提出应用两种不同材料介质板打孔的方法解决了这一难题,在多层介质板的的不同位置打出大小不一的圆孔,即可实现三维变形龙伯透镜所要求的非均匀折射率分布,如图 3(a)所示^[55].实验结果表明,所研制的三维平坦聚焦面变形龙伯透镜工作在整个 Ku 波段 (12~18 GHz),其最大扫描角达到 50°.因此该透镜天线同时具有宽频带、高增益、低损耗、低副瓣、零焦距、无相差、大扫描角等优势.

超分辨率成像是超材料领域的研究热点之一,但现有基于超材料的超分辨率成像方法要么依赖于负折射媒质,要么依赖于表面等离子激元模式,因此存在带宽窄、损耗大等缺点.为了克服上述缺陷,我们从变换光学理论出发,引入新的放大变换,从而解析地获得了超分辨率放大透镜所需的媒质参数.运用在介质板中植入不同的空气孔表征连续变化的折射率分布,我们研制了全介质、宽带、低损耗的二维超分辨率成像透镜^[56].该透镜由两部分组成:中间区域是均匀的高介电常数内核,可将附近带有物像信息的凋落波部分放大;外部是折射率渐变的非均匀阻抗匹配层,可将物像信息无反射地传播到自由空间,从而实现高效的远场超分辨率成像,如图 3(c)所示.实验结果表明,放置在该透镜中相距亚波长尺度的两个源由于透镜的放大作用其位置可清晰分辨,突破了衍射极限^[56].之后,我们将二维超分辨率成像透镜推广至三维情况,由一个半球形三维超分辨率放大透镜和一个三维平板聚焦透镜组成^[57],该透镜系统实现了亚波长间距的多个目标的超分辨成像,如图 3(d)所示.

除了变换光学,几何光学理论也可用于超材料透镜的设计.我们提出了一种基于渐变折射率超材料的三维平板透镜天线,具有宽频带、低损耗、双极化和高定向等特点^[58].该透镜由一系列多层微带金属环构成,可通过改变金属环结构尺寸满足渐变折射率的需要.由于渐变折射率的调控,馈源产生的球面波前在经过该渐变折射率平板透镜后被转换成平面波前,以增强天线的定向性.同时由于匹配层的设计,该平板透镜天线的回波损耗也得到显著降低.实验结果表明,该平板透镜天线具有低回波损耗和高定向性的特点,且频带覆盖整个 X 波段 (8~12 GHz).与传统喇叭天线相比,该平板透镜天线在口径相同的情况下增益可提高 6 dBi (在 12 GHz 处)^[58].由于该平板透镜天线可在近距离处产生准平面波,因此被成功地用于被三维地面隐身衣近场分布的准确测量^[37].基于这一方法,我们研制了一系列平板透镜天线,包括根据介质打孔方式制备的 Ku 波段高增益天线^[59],如图 3(b)所示.三维超材料平板透镜不但可以实现高增益,而且可以控制副瓣.例如,通过设计媒质参数分布使透镜口面场的相位呈均匀分布而幅度呈锥削分布,在整个 Ku 波段 (12~18 GHz) 实现了高增益和低副瓣的优异性能^[60].类似地,我们还研制了可产生贝塞尔 (Bessel) 波束的平板透镜天线^[61]、可独立调控不同极化下电磁波波束的各向异性平板透镜天线^[62]等.

2.4 超材料隐身超表面

隐身衣虽然从物理角度展示了“理想隐身”的美好蓝图,但两个原因使其很难付诸工程应用:(1)损耗大和频带窄影响了其性能;(2)体积庞大限制了其应用场景.为了解决这一问题,我们从目

图 3 (网络版彩图) 基于等效媒质超材料的透镜及其测量结果. (a) 基于变换光学的三维变形龙伯透镜^[55] ©Copyright 2010 Springer Nature; (b) 超材料平板透镜天线及其测量结果^[59] ©Copyright 2013 Springer Nature; (c) 二维超分辨率成像放大透镜^[56] ©Copyright 2013 John Wiley and Sons; (d) 三维超分辨率放大透镜和三维平板聚焦透镜系统^[57]

Figure 3 (Color online) Metamaterial lenses based on the effective medium model and their experimental results. (a) The three-dimensional flattened Luneburg lens based on transformation optics^[55]. (b) Metamaterial flat lens antenna and its measurement results^[59]. (c) The two-dimensional super-resolution amplifying lens^[56]. (d) The integrated system of three-dimensional super-resolution amplifying lens and flat focusing lens^[57]

标雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 缩减的角度提出了人工随机漫散射表面的概念^[63]. 利用超材料单元电磁参数可设计的特点, 设计出表面折射率或表面折射率梯度随机变化的电磁超表面, 对入射电磁波能产生漫散射的效果, 有效地将入射电磁波能量分散到各个方向, 从而在宽角度范围内大

大降低了入射波的反射能量. 理论和实验结果表明, 这种隐身表面可在宽带、宽角范围内有效地减少目标的 RCS, 具有重要的应用价值^[63]. 之后, 我们对这一思想做了进一步简化, 摒弃表面折射率的中间环节, 使超表面的相位在 0 到 360° 范围内呈随机分布 (超表面足够大) 或某种特定分布 (小尺寸超表面, 需要优化), 从而达到散射相消的目的^[64~69]. 图 4(a) 展示了由回字形单元结构所设计的随机相位超表面 (厚度仅为 4 mm), 测量结果表明在 8~27 GHz 的超宽带范围内使雷达散射截面 (radar cross section, RCS) 缩减 10 dB, 且对不同的入射角有很好的适应性, 如图 4(b) 所示^[64]. 之后, 我们把随机相位超表面的概念从微波段拓展到太赫兹频段^[65, 66], 图 4(c) 和 (d) 给出了由回字形单元和井字形单元组合而成的太赫兹随机相位超表面及其反射系数的测量结果, 显示出显著的隐身性能^[65]. 最近, 我们基于 ITO 超材料结构研制了光学透明但雷达波隐身的随机相位超表面^[67~69], 其中一个示例如图 4(e) 和 (f) 所示. 实验结果展示其透光率在 80% 以上, 而雷达波吸收率在 20~38 GHz 的超宽带范围内超过 80%, 且对入射角度不太敏感^[69].

作为总结, 我们在等效媒质超材料方面取得了一些研究进展, 提出了超材料结构的等效媒质一般性理论, 率先实验验证了宽带地面隐身、电磁黑洞及电磁幻觉等奇特物理现象, 且在超材料透镜和隐身表面等方面取得部分工程应用.

3 人工表面等离激元超材料

SPP 是一种特殊的表面波模式, 对电磁波具有亚波长束缚能力和场增强特征, 仅存在于正、负介电常数媒质的交界面上. 在光波段, 由于金属的介电常数为负, 因此金属表面可支持 SPP 模式. SPP 的激发、耦合和传输所引起的丰富的物理性质是当今光学领域的研究热点之一. 然而, 在低频 (太赫兹、微波) 情况下金属近乎为完美电导体, 因此很难激励起 SPP 波. 为解决这一难题, Pendry 爵士等^[70]于 2004 年提出在金属表面引入周期结构以实现低频人工 SPP 模式. 其后, 很多学者尝试使用不同的周期结构, 用以验证 SPP 的相关物理现象. 但是这些人工 SPP 超材料的设计均基于块状硬质二维周期结构, 难以操控 SPP 沿着任意弯曲的表面传输. 为了减小 SPP 超材料的体积, 我们于 2011 年提出具有亚波长宽度的开槽金属板结构, 证明其支持高质量的 SPP 波^[71~73]. 在此基础上, 2012 年我们进一步提出超薄 (近零厚度) 的开槽金属条带结构作为 SPP 超材料^[74, 75].

3.1 微波 SPP 传输线

超薄开槽金属条带的工作于 2013 年在期刊正式发表^[76, 77], 这是首次从微波传输线的角度研究 SPP 超材料. 我们提出了一种超薄、宽带、低损耗、条带式的 SPP 传输线, 能在任意曲面上共形地传输无畸变的 SPP 波, 如图 5(a) 和 (b) 所示^[77]. 其几何形状和传统的微带传输线相似, 均是金属条带, 但微带线需要金属地构成双导体系统, 支持准横电磁模式的空间波; 而 SPP 传输线是刻槽金属条带单导体系统, 支持高度局域化、具有场增强和波长压缩特性的表面波模式. 由于 SPP 传输线是单导体, 因此可设计在像纸一样的柔性基板上, 其厚度只有工作波长的 1/600. 与传统微带线相比, 等宽度的 SPP 传输线有如下优势: (1) 传输特性可通过调控微结构参数自由设计, 根据需求使 SPP 波的束缚能力可强可弱; (2) 电磁场高度局域在传输线周围, 离开传输线将以指数形式衰减. 这种高度局域化的场模式可在弯曲表面保形, 如图 5(c) 和 (d) 所示^[77]. 数值仿真分析和实验结果证明, 该 SPP 传输线可以操控 SPP 波沿任意弯曲和扭曲的金属条带传输, 如图 5(e) 所示 (其中数值仿真和测试结果具有高度一致性), 这是传统微波传输线无法做到的; (3) 根据 SPP 模式的色散曲线, 在相同频率下 SPP 模式的传播常数大于空间波的传播常数, 因此 SPP 模式具有波长压缩效应, 可用于制作柔性、共形、可

图 4 (网络版彩图) 基于超材料的人工随机散射表面. (a) 和 (b) 微波毫米波段随机相位超表面及其在不同入射角情况下镜面反射系数的测量结果^[64] ©Copyright 2017 Springer Nature; (c) 和 (d) 太赫兹随机相位超表面及其反射系数的测量结果^[65] ©Copyright 2015 John Wiley and Sons; (e) 和 (f) 光学透明但雷达波隐身的随机相位超表面及其在不同入射角情况下雷达波吸收率的测量结果^[69]

Figure 4 (Color online) Artificially random scattering surfaces based on metamaterial. (a) and (b) The random-phase metasurface in the microwave frequency and the measurement results of its reflection coefficients under different incidence angles^[64]. (c) and (d) The random-phase metasurface in the terahertz frequency and the measurement results of its reflection coefficients^[65]. (e) and (f) The random-phase metasurface with optical transparency and radar-wave absorption and the measurement results under different incidence angles^[69]

弯折、可扭转的小型化微波器件. 图 5(f) 给出了一个微波 SPP 功分器例子, 其实测结果 (图 5(h)) 与全波仿真结果 (图 5(g)) 非常吻合, 并展示出该功分器优异的 3 dB 功分特性^[77]. 该工作发表后, 国内和国外涌现了大量的形式各异的微波 SPP 传输线, 这里不再赘述.

图 5 (网络版彩图) 超薄开槽金属条带微波 SPP 传输线及其色散特性和传输特性^[77]. (a) 不同厚度开槽金属条带的色散特性; (b) 不同槽深的四条超薄、柔性微波 SPP 传输线照片; (c)~(e) 超薄柔性微波 SPP 传输线发生弯折时的近场特性及传输模式测量结果; (f)~(h) 微波 SPP 功分器照片及其近场的仿真与测试结果比较

Figure 5 (Color online) The microwave SPP transmission line based on ultrathin corrugated metallic strip^[77]. (a) The dispersion properties of corrugated metallic strips with different thicknesses. (b) The photographs of four ultrathin and flexible SPP transmission lines with different corrugation depths. (c)~(e) The near fields and measured transmission modes of the bending SPP transmission line. (f)~(h) The photograph of SPP splitter and comparisons of near-field simulations and measurements

3.2 微波 SPP 模式的高效激发与 SPP 无源器件

为了使 SPP 传输线及功能器件在微波领域获得应用, 如何高效地激发 SPP 模式是不可回避的问题. 现有微波源产生的是空间电磁波, 与传统的微带线和共面波导等相契合. 但这些传统传输线支持横电磁模式或准横电磁模式, 与 SPP 模式不匹配, 因此 SPP 波的激发效率非常低, 很难与传统的微波传输线和电路进行系统集成. 为了解决这个问题, 我们提出一种新的模式转换方法并设计了相应的模式转换装置^[78,79], 实现了 SPP 传输线与传统微波传输线的阻抗匹配和动量匹配, 使 SPP 模式和空间波模式能高效地相互转换. 图 6(a) 给出了共面波导传输线与双边锯齿状开槽金属条带 SPP 传输线高效的模式转换方法, 其核心思想与关键技术包括: (1) 提出了渐变的锯齿结构, 以实现 SPP 波和空间波两种电磁波模式的波矢或动量匹配; (2) 设计了逐渐向外张开的金属地, 以实现共面波导和 SPP 传输线的阻抗匹配. 数值仿真和实验结果证明, 该模式转换装置完美地解决了 SPP 和空间波的模式不匹配问题, 实现了共面波导和 SPP 传输线之间的高效转换, 如图 6(b) 所示^[78]. 类似地, 我们也提出了微

图 6 (网络版彩图) 微波 SPP 模式的高效激发与 SPP 无源器件. (a) 共面波导传输线与 SPP 传输线的高效转换结构及其近场测量结果^[78]; (b) 经过转换结构后, 电磁波由共面波导到 SPP 传输线, 再到共面波导的传输系数和反射系数^[78] ©Copyright 2013 John Wiley and Sons; (c) 由 SPP 传输线和基片集成波导构成的可调带通滤波器实物图^[80]; (d) 和 (e) SPP-基片集成波导带通滤波器的传输系数和近场分布^[80] ©Copyright 2015 Springer Nature

Figure 6 (Color online) The high-efficiency excitation of microwave SPP modes and passive SPP devices. (a) The high-efficiency transition between coplanar waveguide and the SPP transmission line and measured results of near fields^[78]. (b) The transmission and reflection coefficients of the electromagnetic waves by the whole system after making the transitions^[78]. (c) The photograph of the tunable bandpass filter made of the SPP transmission line and substrate integrated waveguide^[80]. (d) and (e) The transmission coefficients and near-field distributions of the tunable bandpass filter^[80]

带传输线与 SPP 传输线的高效转换^[79]. 这些工作为实现 SPP 传输线及功能器件与传统微波电路的高效集成奠定了基础, 研制了一系列微波 SPP 无源器件^[80~86].

作为实例, 图 6(c) 展示了由 SPP 传输线和传统基片集成波导所构成的通带可控滤波器^[80], 通过模式匹配结构的设计, 实现微带线、SPP 传输线, 以及基片集成波导的集成. 根据 SPP 和基片集成波导的色散曲线可知, SPP 呈现高频截止的特性, 而基片集成波导具有低频截止的特性. 综合两者的低通和高通特性, 选取适当 SPP 结构的凹槽深度和基片集成波导的等效宽度, 可使 SPP 的截止频率高于基片集成波导的截止频率, 从而在低于 SPP 的截止频率和高于基片集成波导的截止频率之间形成

通带. 改变 SPP 结构参数, 能有效地调整该带通滤波器的带宽. 如图 6(d) 所示, 当 SPP 结构的凹槽深度 $h = 1.2, 1.4, 1.6$ 及 1.9 mm 时, 该滤波器的 3 dB 通带带宽分别是 15.84, 11.73, 9.39 及 5.91 GHz, 展现出很大的动态调控范围. 图 6(e) 分别给出了该带通滤波器的工作频率位于阻带和通带时的近场分布图.

3.3 微波 SPP 的深亚波长双通道传输

传统微波传输线的一个制约瓶颈是其电磁兼容设计难度大, 尤其是临间互耦十分严重. 电磁信号串扰常见于平行排布的裸露微带线之间, 对系统的信号完整性提出了严峻挑战. SPP 凭借其优异的场束缚能力, 可在电磁兼容设计中发挥优势. 为了实现更强的 SPP 场束缚能力, 我们提出如图 7(a) 所示的新型 SPP 结构, 由上下两个反对称的锯齿状开槽金属条带组成^[87]. 由图 7(b) 所示的色散曲线可清晰地看出, 与单个开槽金属条带 SPP 传输线和微带线相比, 新 SPP 传输线对电磁场的束缚能力更强. 这一特性可将传输的电磁能量更紧密地束缚于传输线周围, 抑制传输线间的电磁耦合. 图 7(c) 和 (d) 给出了深亚波长双通道传输的对比实例, 上图为两个微带线, 下图为两个新型 SPP 传输线, 其间距均为 $1/30$ 波长, 且两类传输线的整体尺寸相同. 当电磁信号在下面通道传输时, SPP 传输线展示出优异的去耦合特性, 能无串扰地传输; 而微带线产生了较大耦合, 如图 7(d) 所示. 实验结果标明, SPP 传输线在窄带内可以提供大约 40 dB 的隔离度, 在宽带内提供大于 10 dB 的隔离度^[87]. 类似地, SPP 的深亚波长双通道传输可推广到深亚波长多通道传输. 因此, SPP 传输线可从物理层解决现在电路中的临间互耦问题.

在上述工作的基础上, 我们和新加坡南洋理工大学 (Nanyang Technological University) 余浩教授 (现任南方科技大学教授) 课题组合作, 进一步将 SPP 应用于集成电路中. 基于标准 65 nm CMOS (complementary metal oxide semiconductor) 工艺制作了亚毫米波段的 SPP 传输线, 并与传统微带线进行了性能对比, 如图 7(e) 和 (f) 所示^[88]. 相对于平行耦合微带线, 两个平行的 SPP 传输线在 220 GHz 到 325 GHz 的宽带范围内具有约 19 dB 的串扰抑制, 初步证明了 SPP 传输线在集成电路中的优势. 2017 年我们进一步合作将 SPP 传输线应用于片上信道, 并利用开口谐振环进行调制, 验证了在片上环境下 SPP 传输线仍具有传输串扰低的特性^[89].

3.4 微波局域表面等离子激元谐振及功能器件

除了传输型的 SPP 模式之外, 还存在另一种 LSP 谐振模式. 在光波段, 金属或介质纳米颗粒支持 LSP 模式, 并获得广泛关注. 在微波等低频频段, 和 SPP 超材料的大量研究相比, LSP 超材料直到 2012 年才有学者涉及. 西班牙马德里自治大学 (Autonomous University of Madrid) 的 Garcia-Vidal 教授及其合作者提出一种结构化的金属圆柱, 可在低频范围内支持人工 LSP 模式^[90]. 数值仿真表明, 这种立体结构化的金属圆柱 LSP 超材料只能激励起电六极子、八极子和十极子谐振, 且缺乏实验验证. 为此我们提出一种厚度接近于零、直径为半波长的超薄开槽金属圆片^[91], 如图 8(a) 所示, 这种 LSP 超材料结构具有近零厚度、重量轻等优点, 可在空间电磁波照射下激励起异常丰富的 LSP 谐振, 实现了包括电偶极子、四极子、六极子, 直至十四极子的谐振模式, 其谐振曲线和前两个模式的近场如图 8(a) 所示. 微波段的实验结果与理论分析和数值仿真吻合得很好, 这也是微波段 LSP 谐振模式的首次实验验证^[91]. 进一步挖掘该超薄 LSP 超材料的物理特征, 我们发现它能激励起更高阶的 LSP 谐振^[92]. 图 8(a) 所示的多极子谐振发生在极坐标的角域方向, 而更高频段的 LSP 谐振同时发生在角域方向和径向上, 图 8(b) 给出了角域电八极子和电十极子而径向电偶极子的实例. 其中, 上面两个图是仿真结果, 而下面两个图为实验结果, 显示出高度的一致性. 可见, 我们所提出

图 7 (网络版彩图) 微波 SPP 的亚波长双通道传输. (a) 和 (b) 由上下两个反对称的锯齿状开槽金属条组成的新型 SPP 传输线及其色散曲线^[87]; (c) 和 (d) 亚波长双通道 SPP 传输线 (左上图) 和微带线 (左下图) 及其传输特性比较^[87]; (e) 和 (f) 基于 CMOS 工艺的亚毫米波双通道 SPP 传输及测量结果^[88] ©Copyright 2015 Springer Nature

Figure 7 (Color online) Subwavelength-dual-channel transmissions of microwave SPP modes. (a) and (b) The SPP transmission line composed of two anti-symmetrical corrugated metallic strips and its dispersion properties^[87]. (c) and (d) Subwavelength-dual-channel SPP transmission lines (left upper) and microstrips (left lower) and their comparisons in the transmission properties^[87]. (e) and (f) Subwavelength-dual-channel SPP transmission lines and microstrips based on the CMOS technology and their measured cross talks in the submillimeter-wave frequencies^[88]

的半波长超薄 LSP 超材料结构蕴含着异常丰富的表面等离激元谐振, 可用于构建结构紧凑的微波传感器.

深入研究 LSP 谐振的产生机理, 上述 LSP 超材料的半波长尺寸可进一步缩小为亚波长尺度. 与 Garcia-Vidal 教授和 Pendry 爵士课题组合作, 我们于 2014 年提出了径向开螺旋槽的亚波长超薄 LSP 超材料, 如图 8(c) 所示^[93]. 由于螺旋槽的引入和高度可设计性, 即使超材料的尺寸仅为 1/10 波长, 但沿着螺旋槽在径向上可行进 1/4 波长, 因此亦可产生丰富的 LSP 谐振. 图 8(c) 展示了该超材料结构所激励的电偶极子谐振和磁偶极子谐振的近场图, 清晰地刻画了电偶极子和磁偶极子的物理特征. 为了精确表征螺旋槽 LSP 超材料的物理特征和进一步挖掘更丰富的谐振特性, 我们与新加坡南洋理工

图 8 (网络版彩图) 超薄微波 LSP 谐振结构及物理特性. (a) 超薄开槽金属圆片 LSP 结构、谐振曲线及其所激励的电偶极子和电四极子近场图^[91] ©Copyright 2013 John Wiley and Sons; (b) 超薄开槽金属圆片 LSP 结构所激励起的角域电八极子和电十极子而径向电偶极子近场仿真和测量结果^[92] ©Copyright 2015 Springer Nature; (c) 径向开螺旋槽的亚波长超薄 LSP 结构及其激励的电偶极子谐振和磁偶极子谐振的近场图^[93]; (d) 双耦合螺旋槽结构的 LSP 器件及其场增强效应^[95] ©Copyright 2017 John Wiley and Sons

Figure 8 (Color online) Ultrathin microwave LSP resonant structures and their physical properties. (a) The ultrathin corrugated metallic disk structure, its resonant curve, and near-field distributions of electric dipole and quadrupole modes^[91]. (b) The simulated and measured near-field distributions of the electric octupole and decapole modes along the angular direction and dipole mode along the radial direction^[92]. (c) The ultrathin subwavelength LSP structure based on spirally corrugated metallic disk and near-field distributions of electric and magnetic dipole modes^[93]. (d) The dimer of two spiral LSP structures with strong coupling and its field-enhancement properties^[95]

大学罗宇教授合作提出了螺旋槽 LSP 超材料的等效媒质模型, 预测并实验验证了更高阶的电多极子和磁多极子^[94]. 在螺旋槽 LSP 谐振效应的基础上, 我们提出了 LSP 的耦合模型揭示其模式杂化效应^[95]. 该模型描述了多个 LSP 结构之间的相互作用如何对其谐振模式及场分布特性产生影响, 对多

元件的 LSP 复合系统设计具有指导意义. 基于这个理论模型, 我们提出了双耦合螺旋槽 LSP 结构, 并在微波段进行了实验验证, 如图 8(d) 所示. 该结构可将入射电磁场汇聚在极小的范围内, 实现大于 5000 倍的局部场增强效应^[95].

上述超薄 LSP 谐振结构可以方便地和超薄 SPP 传输线自由组合, 实现新型的微波 LSP 器件、传感器及 SPP-LSP 组合器件^[96], 促进了 LSP 的研究从传统光学向微波和太赫兹频段拓展.

3.5 微波 SPP 有源器件

在光波段, SPP 放大主要是抵消金属损耗, 使 SPP 波能传输到更远的距离. 其手段是将增益媒质加入到介质材料, 用于单金属分界面、金属薄片和金属包层中. 但增益媒质的体积较大, 对实现高度集成、高增益的功能放大器件存在瓶颈. 然而在微波段, 半导体有源器件的理论模型和技术已经非常成熟, 将微波 SPP 物理与半导体器件有机结合, 将产生高效的微波 SPP 有源器件^[97~99]. 由于单导体 SPP 传输线不带金属地, 故与半导体器件存在一定程度的不兼容性, 例如难以共地造成系统不稳定. 为此我们提出一种具有镜面对称结构的双导体 SPP 传输线 (图 7(a)), 这种结构可方便地使 SPP 与半导体器件兼容集成, 具体如图 9(a) 所示. 通过设计 SPP 传输线结构, 使之与半导体放大芯片阻抗匹配以减少反射, 我们研制了第 1 款微波 SPP 放大器, 其俯视图如图 9(b) 所示^[97]. 实验结果证明, 通过加载低噪声放大器芯片到镜面对称的 SPP 传输线, SPP 波在宽频段 (6~20 GHz) 范围内实现了约 20 dB 的高增益放大, 图 9(c) 给出了该微波 SPP 放大器传输系数和反射系数的测量结果, 展示出优异性能^[97].

近十余年来, 利用 SPP 结构的场增强效应产生二次谐波在非线性光学领域引起了广泛关注, 但受限于材料的非线性强度和金属损耗, 光频 SPP 二次谐波产生的效率很低. 在微波频段, 亚波长尺度的非线性有源芯片可提供巨大的非线性效应, 因此我们在微波段首次提出并实现了 SPP 二次谐波的高效产生^[98]. 与 SPP 放大器不同, 由于高次谐波的产生, 必须对 SPP 传输线在输入端和输出端进行精确设计. 在输入波导的设计中, 为了抑制进入非线性芯片的非工作频率信号, 双导体 SPP 结构的自然滤波特性可进一步提高频谱纯度; 而输出波导的设计要抑制 SPP 的基波和其他不需要的高次谐波, 放大所产生和传输的谐波. 图 9(d) 展示了我们所研制的产生二次谐波的 SPP 倍频器^[98], 其中所用半导体器件为场效应管. 图 9(e) 所示的频谱测量结果清晰地展示了二次谐波的高效产生, 以及三次谐波的有效抑制. 进一步的实验结果表明, 当基频从 5 到 10 GHz 宽带变化时, 基频到二次谐波的转换增益测量值为 10 dB, 而三次谐波低于 -30 dB 以上. 为了验证所产生的二次谐波依旧是 SPP 波, 图 9(f) 和 (g) 给出了输出波导端的近场分布, 定量地展示了放大后的 SPP 二次谐波^[98]. 考虑到该 SPP 二次谐波发生器效率高、性能优良, 可直接作为微波 SPP 倍频器使用.

除了线性放大器和非线性场效应管芯片, 变容二极管也常用于有源 SPP 器件的设计和研制. 例如, 我们提出在 SPP 传输线结构上加载变容二极管以对 SPP 的传输特性进行动态调控, 这也是微波 SPP 传输线相比于传统传输线的另一个优势. 通过在 SPP 传输线的周期单元上加载变容二极管, 对各个单元的偏置电压独立编码控制, 我们研制了微波 SPP 可编程器件^[99]. 在不同的偏压编码策略下, 这一可编程器件能实现移相器、逻辑门、慢波调控等诸多不同功能.

3.6 微波 SPP 天线及无线通信系统

若使 SPP 传输线和功能器件调制的电磁信号在空中传输 (例如 SPP 无线通信和 SPP 雷达), 必须先将 SPP 模式变成辐射波模式. 我们提出在超薄开槽金属条带 SPP 传输线的末端加载渐变 H 形引向器, 提供了一种快速将 SPP 模式转换为辐射模式的方法, 从而构建了第 1 个具有定向辐射特

图 9 (网络版彩图) 微波 SPP 有源器件及测量结果. (a) 具有镜面对称结构的双导体 SPP 传输线与放大器芯片的集成^[97]; (b) 微波 SPP 放大器照片^[97]; (c) 微波 SPP 放大器传输系数和反射系数的测量结果^[97] ©Copyright 2014 John Wiley and Sons; (d) 微波 SPP 倍频器照片^[98]; (e) 微波 SPP 倍频器的频谱测量结果^[98]; (f) 和 (g) 微波 SPP 倍频器输出波导端的近场分布^[98]

Figure 9 (Color online) Active microwave SPP components and their measurement results. (a) The integration of the dual-corrugated-metallic-strip SPP transmission line with an amplifier chip^[97]. (b) Photograph of the SPP amplifier^[97]. (c) The measured transmission and reflection coefficients of the SPP amplifier^[97]. (d) Photograph of the SPP frequency multiplier^[98]. (e) The measured frequency spectra of the SPP multiplier^[98]. (f) and (g) The near-field distributions in the output port of the SPP multiplier at different frequencies^[98]

性的 SPP 天线^[100]. 之后, 我们设计了一系列新型辐射结构及阵列, 实现了高性能的 SPP 定向辐射^[101~104]. 定向天线是最简单的 SPP 天线, 利用 SPP 超材料的结构特征还可方便地设计频率扫描漏波天线. 例如, 我们通过设计周期性 SPP 开槽的深度实现表面阻抗的正弦调制, 进而将 SPP 转化为指定方向的漏波辐射^[105]; 提出了能任意定制极化辐射的漏波天线, 通过在双边带 45° 倾斜凹槽结构产生正交极化的电磁波并设计双边带斜凹槽的相对位移, 实现了不同极化的 SPP 漏波辐射^[106]. 将变容二极管引入 SPP 超材料结构, 我们进一步研制了电控波束扫描漏波天线. 通过在开槽深度周期调制的 SPP 传输线上加载变容二极管, 使其表面阻抗可随外加电压变化实时重构, 从而实现了漏波辐射波束在固定频率下的大角度实时扫描^[107]; 在 SPP 传输线上周期交替加载一系列电容器和变容二极管, 使得 SPP 以不同模式同时工作在两个不同频带, 且其周期调制表面阻抗随外加电压实时重构, 实现了漏波辐射波束在两个频带内固定频率下的大角度扫描^[108]. 此外, 我们还将 SPP 传输线结构与其他物理

特性相结合, 构建了涡旋波发生器^[109] 和对 SPP 漏波辐射与空间波宽带定向辐射的同时调控^[110].

综上所述, 我们从微波传输线的角度提出并研制了系列 SPP 传输线、SPP 和 LSP 无源器件、SPP 有源器件, 以及 SPP 天线, 形成了微波 SPP 的完整体系. 基于此我们进行了系统集成, 研制了全 SPP 的无线通信射频收发系统^[111]. 由于 SPP 模式极强的场束缚能力, 该系统可使两个独立的数字信号在两个亚波长间距的电磁通道上分别调制并独立传输. 作为对比, 我们基于微带线制作了系统构架和几何尺寸完全相同的无线通信射频收发系统. 在非视距条件下, 对两种无线通信系统做了视频传输的对比实验, 实验设置完全相同. 经过测试, 基于 SPP 的无线通信系统实时通信速度大于 500 Mbps, 误码率小于 10^{-5} . 将两部高清电影在间距为 $1/10$ 波长的两个通道内同时输入, 经过整个 SPP 链路和天线辐射、超视距传输, 我们在接收端可以实时、无误码地收看到两部电影. 而在对比实验中, 基于微带线的无线通信系统不能实现亚波长通道内两个视频的独立传输, 显示出 SPP 系统的独特优势.

作为总结, 我们从微波传输线的角度研究 SPP 超材料, 从 SPP 基础传输线到全 SPP 无线通信收发系统, 形成了完整体系, 开拓了基于 SPP 传输线的微波领域新方向.

4 信息超材料

我们创建信息超材料这一新体系的初衷有两个: (1) 超材料的独特之处在于对电磁波的自由调控, 但传统超材料一旦制备成型其功能即被固定或只能微调; (2) 希望超材料和数字信息建立起联系. 为此, 我们突破了用等效媒质参数和连续物理参数表征超材料的研究体系, 提出用数字编码表征超材料的新思想, 其意义包括: (1) 引出现场可编程超材料的概念, 可实时、大自由度地控制电磁波, 使同一超材料平台能实现很多完全不同的功能; (2) 在超材料物理空间上构筑了数字空间, 可对电磁波和数字信息同时调控, 产生新架构电子信息系统.

4.1 数字编码超材料

根据第 2 节所述, 超材料单元结构的亚波长特征使其可由连续的等效媒质参数描述. 类比于电路, 这类超材料又称为模拟超材料. 与此相对应, 我们和美国宾夕法尼亚大学 (University of Pennsylvania) 的 Engheta 教授课题组相互独立地提出了数字超材料的概念^[112, 113]. Engheta 教授等^[113] 提出的数字超材料是模拟超材料的离散化, 仍属于等效媒质超材料的范畴; 而我们摆脱了等效媒质的束缚, 提出数字编码的概念描述超材料单元, 通过改变数字编码单元的空间排布控制电磁波^[112], 因此该超材料又称为数字编码超材料, 构建了一个新的研究体系.

具体地, 我们提出以电磁响应相位差为 180° 的两个超材料原子作为数字 0 和 1 单元, 籍此构建一比特数字编码超材料, 如图 10(a) 左上角插图所示. 应用 0 和 1 编码单元的不同空间排列实现所需的设计功能: 在电磁波垂直入射的情况下, 全 0 或全 1 单元数字编码能实现高增益的单波束反射; 0 和 1 单元一维交错分布的数字编码可实现反常双波束反射; 而 0 和 1 单元棋盘格式分布可实现四波束反常反射, 如图 10(c) 所示. 由于 0 和 1 单元空间排列方式的多样性, 可设计更多的电磁调控功能, 例如当 0 和 1 数字编码呈随机排布时, 超材料将产生漫散射, 能在宽频带和宽角域内降低雷达散射截面^[112]. 上述功能均得到全波仿真和实验结果的验证. 基于上述思路, 我们进一步提出高比特数字编码超材料. 例如, 二比特数字编码超材料由相位差为 90° 的 4 种超材料单元 (记为 00, 01, 10, 11) 构成; 而三比特数字编码超材料由相位差为 45° 的 8 种超材料单元 (000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111) 构成; 依次类推. 高比特数字编码超材料为调控电磁波带来更多的自由度, 对电磁波束的控制更加精细, 例如能使随机漫散射的散射电平更低、隐身效果更好^[112].

图 10 (网络版彩图) 数字编码超材料单元结构及其对电磁波的调控。(a) 数字编码超材料、单元结构及现场可编程超材料^[112]; (b) 数字编码超材料单元结构在二极管开和关的状态下相位响应曲线^[112]; (c) 不同编码情况下数字编码超材料对电磁波的调控^[112] ©Copyright 2014 Springer Nature; (d) 由闵科夫斯基分形结构所实现的太赫兹数字编码超材料^[114] ©Copyright 2015 Springer Nature; (e) 各向异性数字编码超材料基本单元及其对不同极化入射波的调控^[115] ©Copyright 2016 Springer Nature

Figure 10 (Color online) The digital coding metamaterial and its manipulations to electromagnetic waves. (a) The digital coding metamaterial and programmable metamaterial^[112]. (b) The phase response curves of the digital unit structure under “ON” and “OFF” states of the PIN diode^[112]. (c) Manipulations of electromagnetic waves by the digital coding metamaterial under different coding sequences^[112]. (d) Terahertz digital coding metamaterial realized by Minkowski fractal structures^[114]. (e) The unit structure of anisotropic digital coding metamaterial and its controls to differently polarized waves^[115]

之后我们将数字编码超材料的概念由微波拓展至太赫兹波, 提出一种闵科夫斯基 (Minkowski) 分形结构以实现一比特、二比特和三比特太赫兹数字编码超材料, 如图 10(d) 所示, 并实验验证了其超

常反射和漫散射特征^[114]. 同时将各向同性数字编码推广至各向异性数字编码, 其单元结构在不同极化电磁波的照射下呈现出独立的数字态, 通过赋予整个超材料阵列相应的各向异性数字编码矩阵, 使其在不同极化电磁波的照射下表现出完全不同的调控功能, 如图 10(e) 所示^[115]. 在此基础上, 我们进一步提出了基于开口谐振环结构的张量数字编码超材料, 实现了对电磁波极化态旋转以及电磁波波矢的大动态范围调控, 并在太赫兹波段验证了空间波到 TE (transverse electric) 和 TM (transverse magnetic) 模式表面波的转换^[116]. 类似的工作还包括双频段数字编码超材料^[117]. 这些研究展现出数字编码超材料对电磁波强大的调控能力.

4.2 现场可编程超材料和信息超材料

在上述数字编码超材料中, 不同的数字单元 (例如 0 和 1) 可由不同的物理结构实现, 也可由集成某种有源器件的同一物理结构实现. 前者为无源数字编码, 能给超材料的功能设计带来全新方法; 而后者为有源数字编码, 是我们的研究重点, 能对电磁波进行实时调控. 图 10(a) 右上角插图展示了我们最早提出的数字编码单元, 由超材料结构和一个偏压二极管构成^[112]. 当二极管导通 (赋予高电压电平) 时该单元呈现数字 1 状态; 当二极管断开 (赋予零电压) 时该单元呈现数字 0 编码状态. 图 10(b) 给出了两种状态下超材料单元的反射相位响应特性, 由图 10 可见在 8.6 GHz 附近二者的相位差为 180°. 因此, 该偏压二极管可实时地控制超材料单元的 1 和 0 状态, 实现了超材料由“静态”向“动态”的飞跃. 更为重要的是, 控制二极管电压的高电平和零电平恰好是基带的数字 1 和 0, 因此数字编码超材料建立起基带数字 0 和 1 与电磁波物理数字 0 和 1 的天然联系.

基于上述数字编码单元, 我们提出并研制了第 1 个真正的数字超材料: 超材料的所有单元都相同, 但其 0 和 1 编码状态受基带数字 0 和 1 的控制. 因为每个数字单元的 0 和 1 状态均可独立调控, 因此将拥有 2^N 个数字编码组合 (其中 N 是超材料的总单元数). 将不同的 0 和 1 数字编码序列及其功能提前设计好并存储在现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 之中, 我们实现了第 1 个现场可编程超材料, 如图 10(a) 下插图所示. 单一的数字编码超材料在 FPGA 的实时控制下, 通过预加载的切换编码序列完成对电磁波的动力学调控, 可实时操作多种完全不同的功能, 例如单波束反射、可控多波束反常反射、电磁漫散射等^[112], 突破了传统等效媒质超材料的局限性.

在现场可编程超材料中, 不同的数字编码序列 (例如 0110001011..., 1001010001, 0001110101 等) 既是操控电磁波不同辐射和散射行为的控制码, 同时也是数字信息本身. 因此, 现场可编程超材料不但可以调控电磁波, 也可以调控信息. 为此我们于 2017 年在 *Journal of Materials Chemistry C* 的特邀论文中将超材料的概念进一步推广, 首次提出信息超材料和信息超表面的概念^[118], 其内涵包括了数字编码超材料、现场可编程超材料、软件化超材料和可认知超材料, 是物理学与信息科学的有机融合. 信息超材料采用数字化方式表征超材料的人工单元, 因此能直接处理数字信息, 并对信息进行感知、理解、记忆和学习, 使其成为同时调控电磁波和数字信息的全新物理平台, 为构建全新架构的电子信息系统奠定基础.

4.3 信息超材料的几个定理

信息超材料的核心是在超材料的物理空间上建立起数字空间, 将电磁波物理和信息科学有机地结合起来. 因此我们有可能在超材料的物理空间上进行信息操作和数字信号处理运算.

在数字空间, 信号的数字卷积定理在调控信号方面获得广泛应用. 得益于信息超材料的数字编码与其远场方向图之间的傅里叶 (Fourier) 变换关系, 我们率先将数字卷积定理搬移到数字编码超材料物理空间^[119]. 如图 11(a)~(c) 所示, 当某个特定编码图案 (a) 叠加一个梯度编码图案 (b) 形成新的编

图 11 (网络版彩图) 信息超材料的基本定理. (a)~(f) 数字编码超材料的卷积定理, 可实现对电磁波束向所需方向的任意搬移^[119]; (g)~(i) 应用香农信息熵对数字编码超材料信息容量的描述^[120]; (j) 不同编码情况下数字编码超材料的几何信息熵和物理信息熵^[120] @Copyright 2016 Springer Nature

Figure 11 (Color online) The basic theorems of information metamaterials. (a)~(f) The convolution theorem of digital coding metamaterial, which can realize arbitrary beam shifts to the desired directions^[119]. (g)~(i) The quantitative measures of information contained in the digital coding metamaterial using Shannon entropy^[120]. (j) The geometrical information entropy and physical information entropy of the digital coding metamaterial under different coding patterns^[120]

码图案 (c) 时, 根据卷积定理, 编码图案 (a) 所对应的电磁波束 (d) 可无失真地被搬移到梯度编码图案 (b) 所对应的波束方向 (e), 直接形成新的波束 (f), 其机理与傅里叶变换中将基带信号搬移到高频载波的过程类似^[119]. 数字编码超材料的卷积定理为设计复杂波束调控提供了非常方便和有效的工具. 基于此, 我们证明应用二比特数字编码超材料能将电磁波辐射到上半空间的任意设定方向, 或实现全半空间的波束扫描. 如果使用传统电磁场数值方法或优化方法设计数字编码图案, 一方面将耗用大量的计算资源, 另一方面很难获得无失真的电磁波束调控.

在信息超材料中, 不同的数字编码图案对应不同的物理性能. 例如, 全 0 编码超材料产生单波束辐射, 而 0 和 1 的随机编码将产生大量的多波束辐射, 如图 11(g) 和 (h) 所示, 人们的直觉是后者的信息量明显高于前者, 但使用物理方法很难定量地评估信息超材料所蕴含的信息量大小. 为此, 我们提

出利用香农 (Shannon) 信息熵表征具有不同数字编码图案的信息超材料所携带的信息量. 图 11(i) 和 (j) 展示了当 0 和 1 编码由均匀向随机变化的编码图案演进过程, 及其对应的几何信息熵和物理信息熵^[120]. 结果表明, 香农信息熵能准确评估信息超材料所携带信息量的大小. 数字编码图案越随机, 其几何信息熵和物理信息熵越大, 这一结论既与数字信息空间的信息熵相一致, 也与热力学中熵的原始定义相吻合. 最近, 基于信息熵理论, 我们给出了信息超材料信息容量上限和下限的预估^[121].

另外, 为了实现多个电磁波束相互独立的任意调控, 我们进一步提出了信息超材料的加法定理^[122]. 通过引入复数数字编码, 加法定理可将两种或多种不同的功能进行叠加, 所形成的新数字编码能对这些功能独立调控, 拓展了信息超材料的信息处理能力, 提高了超材料设计的自由度.

4.4 时间编码和时空编码可编程超材料

前面所述信息超材料的数字编码定义在空间域, 即利用数字单元在空间的不同编码序列任意调控电磁波的波束. 但这些空间编码仅关注超材料与电磁波作用时的稳态特性, 即超材料单元的控制信号在调制周期内保持不变. 为了进一步提高信息超材料操控电磁波的维度和对数字信息的处理能力, 我们提出时间编码数字超材料的概念及实现方法^[123]. 通过引入周期性的单元控制信号, 时间编码数字超材料可实现对电磁频谱的灵活调控, 如图 12(a) 所示. 借助于 FPGA, 我们构建了时间编码现场可编程超材料. 图 12(b) 和 (c) 展示了超材料在 0101010101... 一比特时间编码驱动下所产生反射波的频谱分布^[123], 可见反射波仅存在奇次谐波, 基波消失, 且正负一次谐波占主导地位. 当时间编码变为二比特 00-01-10-11... 周期性编码时, 超材料将产生以正一次谐波为主导的频谱分布, 如图 12(d) 和 (e) 所示. 因此, 不同的时间编码使超材料可对电磁频谱进行动态调控, 从而精确控制不同谐波. 实验结果验证了入射能量从基波至高阶谐波的高效转换^[124].

在时间编码数字超材料的基础上, 我们进一步提出了时空联合编码数字超材料的概念及制备实验^[125]. 特殊设计的可编程超材料在时间域上按照相应的时间编码序列快速切换, 可在频率域控制谐波能量分布, 同时空间域的编码排布控制电磁波束, 因此时空编码数字超材料能在空间域和频率域同时调控电磁波. 例如, 利用优化算法设计相应的时空编码矩阵, 可将入射波能量分散到不同空间方向和不同谐波频谱上, 这一特性能更大限度地缩减雷达散射截面^[125]. 更重要的是, 引入时间编码后可扩展空间编码比特数, 降低了实现高比特现场可编程超材料的系统复杂度. 例如, 只要设计相应的时空编码矩阵, 我们证明二比特的时空编码可编程超材料能在中心频率和谐波频率实现等效的 360° 相位覆盖, 形成任意比特的空间编码超材料^[126], 可用于波束赋形等一系列复杂应用.

最近, 我们将空域编码的数字卷积定理推广至了时空编码数字超材料, 为解析地设计电磁波频谱分布及在各个谐波上的波束调控奠定了基础^[127]. 另外, 我们也提出基于时空编码数字超材料打破时空互易性的实施方案并进行了实验验证^[128], 展示出时空编码超材料所带来的新物理特征.

4.5 现场可编程成像

现场可编程成像是超材料现场可编程功能的直接应用, 体现出其独特优势. 全息成像是一种典型的成像方法, 其图像由全息图案确定, 全息图案设计好之后其对应的图像随之固定. 近年来, 人们将超材料与全息技术相结合, 用于设计太赫兹及光频段的全息成像器件, 可将不同极化或不同位置处的不同全息图案写在同一个超材料全息板上, 因此获得了两个或多个固定的全息图像. 现场可编程超材料的出现使现场可编程全息成像成为可能. 2017 年, 我们和北京大学李廉林教授等合作, 利用一比特现场可编程超材料首次实现了实时动态可调的微波全息成像, 如图 13 所示^[129]. 为了使同一个超材料能实时地呈现很多不同的全息像, 我们根据改进的 Gerchberg-Saxton 算法预先计算出不同图像所对应

图 12 (网络版彩图) 时间编码数字超材料及其对电磁频谱的调控^[123] @Copyright 2018 Oxford University Press. (a) 时间编码数字超材料及其对电磁频谱调控的示意图; (b) 和 (c) 0101010101... 一比特时间编码及其产生的反射波频谱分布; (d) 和 (e) 00-01-10-11... 二比特时间编码及其产生的反射波频谱分布

Figure 12 (Color online) The time-domain-coding digital metamaterial and its controls to the electromagnetic spectra^[123]. (a) A time-domain-coding digital metamaterial and the sketch in controlling the electromagnetic spectra. (b) and (c) The 1-bit time-domain coding 0101010101... and the resulted reflection spectrum distribution. (d) and (e) The 2-bit time-domain coding 00-01-10-11... and the resulted reflection spectrum distribution

的 0/1 编码图案, 并将其存储到 FPGA 中, 即可实时地产生所对应的全息像, 如图 13 下面两个子图所示^[129].

超材料的现场可编程功能也用于简化微波成像和雷达成像的系统架构. 传统微波成像或者基于相控阵体制, 需要高成本的多个发射天线和接收天线, 或者基于合成孔径体制, 需要机械扫描或运动飞行, 现场可编程超材料为简化上述系统架构提供了物理基础. 为此, 我们基于现场可编程超材料提出一种新体制微波成像系统, 在单频情况下使用单天线、不需机械扫描即可实现微波成像, 简化了成像系统架构, 降低了成像成本^[130, 131]. 其基本原理是, 现场可编程超材料在单天线的激励下, 通过切换预先设计的大量的不同数字编码图案, 可产生多组独立的随机波束照射待成像物体, 并接收其回波信号. 然后通过逆散射算法^[130]或者压缩感知技术^[131]处理所获取的多组独立多波束测量数据, 最终重建待测物体图像.

4.6 新架构无线通信

除了对电磁波实时操控的现场可编程功能, 信息超材料还能直接控制和处理数字信息, 因此为构建新体制无线通信奠定了基础. 在传统无线通信的发射系统中, 所要传递的数字信息先要通过数模

图 13 (网络版彩图) 基于信息超材料的现场可编程全息成像及其实验结果。同一个全息板可动态、实时地产生很多不同的全息像^[129] @Copyright 2017 Springer Nature

Figure 13 (Color online) The programmable holographic imaging based on the information metamaterial and experimental results, in which many different holographic images can be generated in real time by using the same programmable metamaterial^[129]

转换变成中频模拟信号，然后中频模拟信号需要混频至微波，最后经过放大和微波射频链路通过发射天线发送出去。2019 年，我们基于空间编码数字超材料提出了一种全新的直接辐射无线数字通信系统^[132]，其发射机仅由馈源天线、现场可编程超材料和 FPGA 构成，极大地简化了传统发射机构架。其基本原理是，待发射的数字信息直接被加载到数字编码超材料上，在馈源天线的照射下以不断变换的远场方向图形式辐射到自由空间中；接收系统将处于远场区域不同位置处的接收天线所接收到的电场汇总，通过对比远场方向图与编码序列之间的映射关系，应用状态检测算法以及状态优化算法而恢复出所发送的原始信息。目前，我们已将这一方法推广至近场的多通道通信，在多个空间通道上独立地传输多个不同信息^[133]。

图 14 (网络版彩图) 基于时间编码数字超材料的新架构 BFSK 无线通信系统及实验结果^[123] ©Copyright 2018 Oxford University Press. (a) 简化架构的发射机框图; (b) 基于时间编码数字超材料无线通信系统在实验室的测试环境; (c) 和 (d) 接收机处于不同角度时的测量结果

Figure 14 (Color online) The new-architecture BFSK wireless communication system based on the time-domain-coding digital metamaterial and the relevant measurement results^[123]. (a) The flowchart of simplified transmitter architecture. (b) The lab measurement environment of the wireless communication system based on the time-domain-coding digital metamaterial. (c) and (d) The measurement results when the receiver is located at different directions

简化无线通信系统架构的另一条途径是使用时间编码数字超材料^[123, 134~139]. 如图 12 所示, 递增的二比特时间编码 00-01-10-11... 会产生正一次谐波, 而递减的二比特时间编码 11-10-01-00... 会产生负一次谐波, 应用 FPGA 可实时切换正负一次谐波, 正好与无线通信的二进制频移键控 (binary frequency shift keying, BFSK) 体制相契合. 因此, 我们基于时间编码数字超材料构建了新架构的 BFSK 无线通信系统^[123], 如图 14 所示. 同样, 传统发射机中所必须的数模转换、混频器、射频链路、天线等被数字编码超材料和 FPGA 所取代, 基带信号通过特定的对应关系直接映射成超材料的反射系数, 进而对入射波的载波频率进行调制. 图 14(b)~(d) 的实验结果显示, 该通信系统在多角度、有干扰等情

形下均实现了信息的低误码率传输^[123], 但系统的数据传输速度较低, 为 78.4 kbps.

为了进一步提高数据传输速度, 我们提出和研制了基于时间编码超材料的正交相移键控 (quadrature phase shift keying, QPSK) 无线通信系统^[134]. 利用反射系数相位与基带数字比特流的一一对应关系, 类比通信原理中的 QPSK 调制, 建立了从数字基带到反射系数的完整映射. 同时结合通信领域的先进算法, 实现了载波同步、信道预估与均衡等功能, 极大地提升了系统在传输速率、误码率、稳定性等方面的性能, 最终完成了在室内复杂环境下的实时视频传输, 其数据传输速率已达到 1.6 Mbps. 在此基础上, 我们还研制了基于时间编码超材料的 8 移相键控 (8 phase shift keying, 8PSK) 无线通信系统^[135, 136] 和多种机制混合的无线通信系统^[137], 该方向也成为无线通信的研究热点^[138, 139].

4.7 智能信息超材料

信息超材料的现场可编程特征和信息处理能力可方便地与其他传感器及人工智能相结合, 形成智能超材料. 智能化一直是超材料乃至整个信息领域孜孜以求的重要研究方向. 纵观其发展历程, 超材料从最初的无源结构发展到有源超结构, FPGA 的引入使其具有任意可编程功能. 然而, 现场可编程超材料的体系架构仍需要手动指令完成功能切换, 无法脱离人为控制. 为此, 我们在现场可编程超材料的基础上引入独立的感知器件与决策算法, 提出了一种智能超材料架构, 可摆脱人为控制, 实现自适应可编程的波束调控功能^[140]. 具体地, 我们将陀螺仪等感知器件集成到二比特空间编码可编程超材料上, 能自动感知超材料的运动过程. 同时提出一套在线反馈算法作为控制端的决策中枢, 可根据感知的运动数据实时计算出对应的编码分布, 从而自适应地实现波束凝视、波束扫描等功能^[140]. 这一方法目前已经进一步推广至双极化自适应感知智能超材料^[141].

除了传感器和决策算法, 以深度学习为代表的人工智能也助力了智能信息超材料的发展. 以微波成像为例, 在传统成像架构 (包括可编程超材料成像) 中, 数据获取和数据处理的过程是割裂的, 因而制约了成像系统实时感知的需求. 为了解决这一难题, 我们与李廉林教授合作, 基于现场可编程超材料提出了机器学习驱动的智能电磁感知方法, 实现了人体目标的实时动态成像^[142]. 如图 15 所示, 该感知方法将可编程数字超材料和卷积神经网络机器学习相结合, 采用机器学习方法对超材料进行在线训练, 实现了数据获取和数据处理的一体化操作, 能同时进行机器学习驱动的波束扫描和自适应数据获取, 完成了运动目标的实时成像. 最近, 我们又充分发挥人工智能技术强大的数据处理能力, 通过现场可编程超材料对空间 Wi-Fi 非合作无线信号的灵活调控, 实现了 GHz 帧率的非合作人体的实时微波成像, 且可同时探测人体的生命体征和自动手语识别^[143], 研制了 Wi-Fi 频段信息超材料智能电磁感知系统^[144], 为解决智慧家庭的人机交互、有语言障碍人群进行交流等问题提供了新途径. 目前我们正在将数字编码超材料的智能化设计^[145, 146]、多种传感器, 以及机器学习算法相结合, 研究具有自主学习能力的可认知超材料.

作为总结, 我们从自主地提出超材料的数字编码表征开始, 构筑了数字编码超材料平台, 将超材料物理世界和数字世界紧密地结合在一起, 开拓了现场可编程超材料和系统、新架构信息系统, 及智能超材料系统, 创建了信息超材料新体系.

5 结束语

自 2004 年接触左手媒质开始, 16 年来我们一直在超材料领域努力耕耘. 由初始阶段的模仿跟踪 (等效媒质超材料), 到后面的渐有心得 (从微波传输线角度研究 SPP 超材料), 再到现在的创新突破 (信息超材料), 从一个小侧面见证了我国科学研究的快速发展. 本文是我们课题组集体工作的一个总

图 15 (网络版彩图) 基于现场可编程超材料提出了机器学习驱动的智能电磁感知成像^[142] ©Copyright 2019 Springer Nature. (a)~(c) 由现场可编程超材料产生的机器学习训练模式及其对应的数字编码图案; (d) 受测人体目标不同的运动姿态; (e) 和 (f) 频率为 4 GHz 时不同条件下的测量结果

Figure 15 (Color online) The intelligent electromagnetic sensing system driven by machine learning based on the programmable metamaterial^[142]. (a)~(c) The training modes in machine learning and the corresponding coding patterns produced by the programmable metamaterial. (d) Different gestures of the tested human target. (e) and (f) The measurement results under different situations at the frequency of 4 GHz

结, 很多研究内容由于篇幅所限没有涉及或展开, 具体可参阅我们的专著 [147] 和综述论文及观点论文 [148~156], 从不同方向阐述了我们的研究工作. 尤其是 2017 年为了纪念超材料名词诞生 15 周年, 英国物理学会 *Journal of Optics* 出版“超材料的历史”专辑, 邀请该领域最有影响力的 13 位专家撰稿, 我以“微波超材料——从静态到数字和可程式调控电磁波”为题详细介绍了我们课题组超材料研究的历史和发展历程^[148].

关于未来研究, 我们将继续挖掘电磁超材料的新物理特征, 重点突破超材料功能器件的工程应用, 研究信息超材料的信息论和新构架信息系统.

致谢 向对参与此工作和相关研究的所有同事、博士后、已经毕业和在读的博士研究生、硕士研究生、本科生、访问学者和访问学生表示感谢, 向国内外所有的合作者表示感谢.

参考文献

- 1 Veselago V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ . *Sov Phys Usp*, 1968, 10: 509–514
- 2 Pendry J B, Holden A J, Stewart W J, et al. Extremely low frequency plasmons in metallic mesostructures. *Phys Rev Lett*, 1996, 76: 4773–4776
- 3 Pendry J B, Holden A J, Robbins D J, et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 1999, 47: 2075–2084
- 4 Pendry J B. Negative refraction makes a perfect lens. *Phys Rev Lett*, 2000, 85: 3966–3969
- 5 Shelby R A, Smith D R, Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, 2001, 292: 77–79
- 6 Cui T J, Kong J A. Causality in the propagation of transient electromagnetic waves in a left-handed medium. *Phys Rev B*, 2004, 70: 165113
- 7 Cui T J, Kong J A. Time-domain electromagnetic energy in a frequency-dispersive left-handed medium. *Phys Rev B*, 2004, 70: 205106
- 8 Cui T J, Cheng Q, Lu W B, et al. Localization of electromagnetic energy using a left-handed-medium slab. *Phys Rev B*, 2005, 71: 045114
- 9 Cheng Q, Cui T J. High-power generation and transmission through a left-handed material. *Phys Rev B*, 2005, 72: 113112
- 10 Cheng Q, Cui T J. Negative refractions in uniaxially anisotropic chiral media. *Phys Rev B*, 2006, 73: 113104
- 11 Zhang C, Cui T J. Negative reflections of electromagnetic waves in a strong chiral medium. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 194101
- 12 Eleftheriades G V, Balmain K G. *Negative-Refractive Metamaterials*. New York: Wiley, 2005
- 13 Caloz C, Itoh T. *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*. New York: Wiley, 2004
- 14 Cui T J, Cheng Q, Huang Z Z, et al. Electromagnetic wave localization using a left-handed transmission-line superlens. *Phys Rev B*, 2005, 72: 035112
- 15 Cui T J, Lin X Q, Cheng Q, et al. Experiments on evanescent-wave amplification and transmission using metamaterial structures. *Phys Rev B*, 2006, 73: 245119
- 16 Liu R, Zhao B, Lin X Q, et al. Experimental observation of evanescent-wave amplification and propagation in microwave regime. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 221919
- 17 Liu R, Zhao B, Lin X Q, et al. Evanescent-wave amplification studied using a bilayer periodic circuit structure and its effective medium model. *Phys Rev B*, 2007, 75: 125118
- 18 Yao Y H, Cui T J, Cheng Q, et al. Realization of a super waveguide for high-power-density generation and transmission using right- and left-handed transmission-line circuits. *Phys Rev E*, 2007, 76: 036602
- 19 Lin X Q, Liu R Pe, Yang X M, et al. Arbitrarily dual-band components using simplified structures of conventional CRLH TLs. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2006, 54: 2902–2909
- 20 Lin X Q, Ma H F, Bao D, et al. Design and analysis of super-wide bandpass filters using a novel compact meta-structure. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2007, 55: 747–753
- 21 Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling electromagnetic fields. *Science*, 2006, 312: 1780–1782
- 22 Leonhardt U. Optical conformal mapping. *Science*, 2006, 312: 1777–1780
- 23 Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies. *Science*, 2006, 314: 977–980
- 24 Jiang W X, Cui T J, Yu G X, et al. Arbitrarily elliptical-cylindrical invisible cloaking. *J Phys D-Appl Phys*, 2008, 41: 085504
- 25 Jiang W X, Chin J Y, Li Z, et al. Analytical design of conformally invisible cloaks for arbitrarily shaped objects. *Phys Rev E*, 2008, 77: 066607
- 26 Jiang W X, Cui T J, Yang X M, et al. Invisibility cloak without singularity. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 194102
- 27 Jiang W X, Cui T J, Cheng Q, et al. Design of arbitrarily shaped concentrators based on conformally optical transformation of nonuniform rational B-spline surfaces. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 264101
- 28 Simovski C R, Belov P A, He S. Backward wave region and negative material parameters of a structure formed by

- lattices of wires and split-ring resonators. *IEEE Trans Antenn Propagat*, 2003, 51: 2582–2591
- 29 Schurig D, Mock J J, Smith D R. Electric-field-coupled resonators for negative permittivity metamaterials. *Appl Phys Lett*, 2006, 88: 041109
- 30 Liu R, Cui T J, Huang D, et al. Description and explanation of electromagnetic behaviors in artificial metamaterials based on effective medium theory. *Phys Rev E*, 2007, 76: 026606
- 31 Smith D R, Pendry J B. Homogenization of metamaterials by field averaging. *J Opt Soc Am B*, 2006, 23: 391–403
- 32 Smith D R, Schultz S, Markoš P, et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients. *Phys Rev B*, 2002, 65: 195104
- 33 Cui T J, Smith D R, Liu R. *Metamaterials — Theory, Design, and Applications*. Berlin: Springer, 2009
- 34 Liu R, Ji C, Mock J J, et al. Broadband ground-plane cloak. *Science*, 2009, 323: 366–369
- 35 Li J, Pendry J B. Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking. *Phys Rev Lett*, 2008, 101: 203901
- 36 Ma H F, Jiang W X, Yang X M, et al. Compact-sized and broadband carpet cloak and free-space cloak. *Opt Express*, 2009, 17: 19947–19959
- 37 Ma H F, Cui T J. Three-dimensional broadband ground-plane cloak made of metamaterials. *Nat Commun*, 2010, 1: 21
- 38 Ergin T, Stenger N, Brenner P, et al. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths. *Science*, 2010, 328: 337–339
- 39 Yang F, Mei Z L, Jin T Y, et al. DC electric invisibility cloak. *Phys Rev Lett*, 2012, 109: 053902
- 40 Yang F, Mei Z L, Yang X Y, et al. A negative conductivity material makes a dc invisibility cloak hide an object at a distance. *Adv Funct Mater*, 2013, 23: 4306–4310
- 41 Ma Q, Mei Z L, Zhu S K, et al. Experiments on active cloaking and illusion for Laplace equation. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 173901
- 42 Cheng Q, Cui T J, Jiang W X, et al. An omnidirectional electromagnetic absorber made of metamaterials. *New J Phys*, 2010, 12: 063006
- 43 Narimanov E E, Kildishev A V. Optical black hole: broadband omnidirectional light absorber. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 041106
- 44 Lai Y, Ng J, Chen H Y, et al. Illusion optics: the optical transformation of an object into another object. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 253902
- 45 Jiang W X, Cui T J, Ma H F, et al. Shrinking an arbitrary object as one desires using metamaterials. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 204101
- 46 Jiang W X, Cui T J. Radar illusion via metamaterials. *Phys Rev E*, 2011, 83: 026601
- 47 Jiang W X, Qiu C W, Han T, et al. Creation of ghost illusions using wave dynamics in metamaterials. *Adv Funct Mater*, 2013, 23: 4028–4034
- 48 Liu R, Cheng Q, Hand T, et al. Experimental demonstration of electromagnetic tunneling through an epsilon-near-zero metamaterial at microwave frequencies. *Phys Rev Lett*, 2008, 100: 023903
- 49 Silveirinha M G, Engheta N. Tunneling of electromagnetic energy through subwavelength channels and bends using ϵ -near-zero materials. *Phys Rev Lett*, 2006, 97: 157403
- 50 Cheng Q, Liu R, Huang D, et al. Circuit verification of tunneling effect in zero permittivity medium. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 234105
- 51 Cheng Q, Jiang W X, Cui T J. Radiation of planar electromagnetic waves by a line source in anisotropic metamaterials. *J Phys D-Appl Phys*, 2010, 43: 335406
- 52 Cheng Q, Jiang W X, Cui T J. Spatial power combination for omnidirectional radiation via anisotropic metamaterials. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 213903
- 53 Zhou B, Cui T J. Directivity enhancement to vivaldi antennas using compactly anisotropic zero-index metamaterials. *Antenn Wirel Propag Lett*, 2011, 10: 326–329
- 54 Yuan L H, Tang W X, Li H, et al. Three-dimensional anisotropic zero-index lenses. *IEEE Trans Antenn Propagat*, 2014, 62: 4135–4142
- 55 Ma H F, Cui T J. Three-dimensional broadband and broad-angle transformation-optics lens. *Nat Commun*, 2010, 1: 124
- 56 Jiang W X, Qiu C W, Han T C, et al. Broadband all-dielectric magnifying lens for far-field high-resolution imaging.

- Adv Mater, 2013, 25: 6963–6968
- 57 Jiang W X, Ge S, Han T, et al. Shaping 3D path of electromagnetic waves using gradient-refractive-index metamaterials. *Adv Sci*, 2016, 3: 1600022
- 58 Chen X, Ma H F, Zou X Y, et al. Three-dimensional broadband and high-directivity lens antenna made of metamaterials. *J Appl Phys*, 2011, 110: 044904
- 59 Zhou X Y, Zou X Y, Yang Y, et al. Three-dimensional large-aperture lens antennas with gradient refractive index. *Sci China Inf Sci*, 2013, 56: 120410
- 60 Qi M Q, Tang W X, Xu H X, et al. Tailoring radiation patterns in broadband with controllable aperture field using metamaterials. *IEEE Trans Antenn Propagat*, 2013, 61: 5792–5798
- 61 Qi M Q, Tang W X, Ma H F, et al. Suppressing side-lobe radiations of horn antenna by loading metamaterial lens. *Sci Rep*, 2015, 5: 9113
- 62 Qi M Q, Tang W X, Cui T J. A broadband bessel beam launcher using metamaterial lens. *Sci Rep*, 2015, 5: 11732
- 63 Yang X M, Zhou X Y, Cheng Q, et al. Diffuse reflections by randomly gradient index metamaterials. *Opt Lett*, 2010, 35: 808–810
- 64 Wang D, Liu Z G, Zhao J, et al. Accurate design of low backscattering metasurface using iterative Fourier transform algorithm. *Sci Rep*, 2017, 7: 11346
- 65 Dong D S, Yang J, Cheng Q, et al. Terahertz broadband low-reflection metasurface by controlling phase distributions. *Adv Opt Mater*, 2015, 3: 1405–1410
- 66 Zhao J, Cheng Q, Wang T Q, et al. Fast design of broadband terahertz diffusion metasurfaces. *Opt Express*, 2017, 25: 1050–1061
- 67 Zhang C, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband metamaterial for optical transparency and microwave absorption. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 143511
- 68 Zhao J, Zhang C, Cheng Q, et al. An optically transparent metasurface for broadband microwave antireflection. *Appl Phys Lett*, 2018, 112: 073504
- 69 Zhang C, Yang J, Cao W K, et al. Transparently curved metamaterial with broadband millimeter wave absorption. *Photon Res*, 2019, 7: 478–485
- 70 Pendry J B, Martín-Moreno L, Garcia-Vidal F J. Mimicking surface plasmons with structured surfaces. *Science*, 2004, 305: 847–848
- 71 Zhou Y J, Jiang Q, Cui T J. Bidirectional bending splitter of designer surface plasmons. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 111904
- 72 Zhou Y J, Cui T J. Broadband slow-wave systems of subwavelength thickness excited by a metal wire. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 101906
- 73 Zhou Y J, Cui T J. Multi-directional surface-wave splitters. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 221901
- 74 Cui T J, Shen X. Passive plasmonic components based on plasmonic metamaterials. In: *Proceedings of SPIE Photonics Europe*, Brussel, 2012. 16
- 75 Shen X, Cui T J. Terahertz plasmonic metamaterial waveguides and devices. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, Paris, 2012. 19
- 76 Shen X, Cui T J. Planar plasmonic metamaterial on a thin film with nearly zero thickness. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 211909
- 77 Shen X, Cui T J, Martin-Canob D, et al. Conformal surface plasmons propagating on ultrathin and flexible films. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 40–45
- 78 Ma H F, Shen X, Cheng Q, et al. Broadband and high-efficiency conversion from guided waves to spoof surface plasmon polaritons. *Laser Photonics Rev*, 2014, 8: 146–151
- 79 Liao Z, Zhao J, Pan B C, et al. Broadband transition between microstrip line and conformal surface plasmon waveguide. *J Phys D-Appl Phys*, 2014, 47: 315103
- 80 Zhang Q, Zhang H C, Wu H, et al. A hybrid circuit for spoof surface plasmons and spatial waveguide modes to reach controllable band-pass filters. *Sci Rep*, 2015, 5: 16531
- 81 Gao X, Zhou L, Cui T J. Odd-mode surface plasmon polaritons supported by complementary plasmonic metamaterial. *Sci Rep*, 2015, 5: 9250
- 82 Gao X, Shi J H, Ma H F, et al. Dual-band spoof surface plasmon polaritons based on composite-periodic gratings.

- J Phys D-Appl Phys, 2012, 45: 505104
- 83 Gao X, Zhou L, Yu X Y, et al. Ultra-wideband surface plasmonic Y-splitter. *Opt Express*, 2015, 23: 23270–23277
 - 84 Gao X, Shi J H, Shen X, et al. Ultrathin dual-band surface plasmonic polariton waveguide and frequency splitter in microwave frequencies. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 151912
 - 85 Gao X, Zhou L, Liao Z, et al. An ultra-wideband surface plasmonic filter in microwave frequency. *Appl Phys Lett*, 2014, 104: 191603
 - 86 Yang Y, Shen X, Zhao P, et al. Trapping surface plasmon polaritons on ultrathin corrugated metallic strips in microwave frequencies. *Opt Express*, 2015, 23: 7031–7037
 - 87 Zhang H C, Cui T J, Zhang Q, et al. Breaking the challenge of signal integrity using time-domain spoof surface plasmon polaritons. *ACS Photonics*, 2015, 2: 1333–1340
 - 88 Liang Y, Yu H, Zhang H C, et al. On-chip sub-terahertz surface plasmon polariton transmission lines in CMOS. *Sci Rep*, 2015, 5: 14853
 - 89 Liang Y, Yu H, Feng G, et al. An energy-efficient and low-crosstalk sub-THz I/O by surface plasmonic polariton interconnect in CMOS. *IEEE Trans Microwave Theor Techn*, 2017, 65: 2762–2774
 - 90 Pors A, Moreno E, Martin-Moreno L, et al. Localized spoof plasmons arise while texturing closed surfaces. *Phys Rev Lett*, 2012, 108: 223905
 - 91 Shen X, Cui T J. Ultrathin plasmonic metamaterial for spoof localized surface plasmons. *Laser Photonics Rev*, 2014, 8: 137–145
 - 92 Liao Z, Luo Y, Fernández-Domínguez A I, et al. High-order localized spoof surface plasmon resonances and experimental verifications. *Sci Rep*, 2015, 5: 9590
 - 93 Huidobro P A, Shen X, Cuerda J, et al. Magnetic localized surface plasmons. *Phys Rev X*, 2014, 4: 021003
 - 94 Liao Z, Fernández-Domínguez A I, Zhang J, et al. Homogenous metamaterial description of localized spoof plasmons in spiral geometries. *ACS Photonics*, 2016, 3: 1768–1775
 - 95 Zhang J, Liao Z, Luo Y, et al. Spoof plasmon hybridization. *Laser Photonics Rev*, 2017, 11: 1600191
 - 96 Liao Z, Shen X, Pan B C, et al. Combined system for efficient excitation and capture of LSP resonances and flexible control of SPP transmissions. *ACS Photonics*, 2015, 2: 738–743
 - 97 Zhang H C, Liu S, Shen X, et al. Broadband amplification of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies. *Laser Photonics Rev*, 2015, 9: 83–90
 - 98 Zhang H C, Fan Y, Guo J, et al. Second-harmonic generation of spoof surface plasmon polaritons using nonlinear plasmonic metamaterials. *ACS Photonics*, 2016, 3: 139–146
 - 99 Zhang H C, Cui T J, Xu J, et al. Real-time controls of designer surface plasmon polaritons using programmable plasmonic metamaterial. *Adv Mater Technol*, 2017, 2: 1600202
 - 100 Xu J J, Zhang H C, Zhang Q, et al. Efficient conversion of surface-plasmon-like modes to spatial radiated modes. *Appl Phys Lett*, 2015, 106: 021102
 - 101 Yin J Y, Zhang H C, Fan Y, et al. Direct radiations of surface plasmon polariton waves by gradient groove depth and flaring metal structure. *Antenn Wirel Propag Lett*, 2016, 15: 865–868
 - 102 Xu J J, Yin J Y, Zhang H C, et al. Compact feeding network for array radiations of spoof surface plasmon polaritons. *Sci Rep*, 2016, 6: 22692
 - 103 Yin J Y, Bao D, Ren J, et al. Endfire radiations of spoof surface plasmon polaritons. *Antenn Wirel Propag Lett*, 2017, 16: 597–600
 - 104 Xu J J, Jiang X, Zhang H C, et al. Diffraction radiation based on an anti-symmetry structure of spoof surface-plasmon waveguide. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 021118
 - 105 Kong G S, Ma H F, Cai B G, et al. Continuous leaky-wave scanning using periodically modulated spoof plasmonic waveguide. *Sci Rep*, 2016, 6: 29600
 - 106 Wang M, Ma H F, Tang W X, et al. Leaky-wave radiations with arbitrarily customizable polarizations based on spoof surface plasmon polaritons. *Phys Rev Appl*, 2019, 12: 014036
 - 107 Wang M, Ma H F, Zhang H C, et al. Frequency-fixed beam-scanning leaky-wave antenna using electronically controllable corrugated microstrip line. *IEEE Trans Antenn Propagat*, 2018, 66: 4449–4457
 - 108 Wang M, Ma H F, Tang W X, et al. A dual-band electronic-scanning leaky-wave antenna based on a corrugated microstrip line. *IEEE Trans Antenn Propagat*, 2019, 67: 3433–3438

- 109 Yin J Y, Ren J, Zhang L, et al. Microwave vortex-beam emitter based on spoof surface plasmon polaritons. *Laser Photonics Rev*, 2018, 12: 1600316
- 110 Wang M, Ma H F, Wu L W, et al. Hybrid digital coding metasurface for independent control of propagating surface and spatial waves. *Adv Opt Mater*, 2019, 11: 1900478
- 111 Zhang H C, Zhang L P, He P H, et al. A plasmonic route for the integrated wireless communication of subdiffraction-limited signals. *Light Sci Appl*, 2020, 9: 113
- 112 Cui T J, Qi M Q, Wan X, et al. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials. *Light Sci Appl*, 2014, 3: e218
- 113 Della G C, Engheta N. Digital metamaterials. *Nat Mater*, 2014, 13: 1115–1121
- 114 Gao L H, Cheng Q, Yang J, et al. Broadband diffusion of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces. *Light Sci Appl*, 2015, 4: e324
- 115 Liu S, Cui T J, Xu Q, et al. Anisotropic coding metamaterials and their powerful manipulation of differently polarized terahertz waves. *Light Sci Appl*, 2016, 5: e16076
- 116 Liu S, Zhang H C, Zhang L, et al. Full-state controls of terahertz waves using tensor coding metasurfaces. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9: 21503–21514
- 117 Liu S, Zhang L, Yang Q L, et al. Frequency-dependent dual-functional coding metasurfaces at terahertz frequencies. *Adv Opt Mater*, 2016, 4: 1965–1973
- 118 Cui T J, Liu S, Zhang L. Information metamaterials and metasurfaces. *J Mater Chem C*, 2017, 5: 3644–3668
- 119 Liu S, Cui T J, Zhang L, et al. Convolution operations on coding metasurface to reach flexible and continuous controls of terahertz beams. *Adv Sci*, 2016, 3: 1600156
- 120 Cui T J, Liu S, Li L L. Information entropy of coding metasurface. *Light Sci Appl*, 2016, 5: e16172
- 121 Wu H T, Bai G D, Liu S, et al. Information theory of metasurfaces. *Natl Sci Rev*, 2020, 7: 561–571
- 122 Wu R Y, Shi C B, Liu S, et al. Addition theorem for digital coding metamaterials. *Adv Opt Mater*, 2018, 6: 1701236
- 123 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. *Natl Sci Rev*, 2019, 6: 231–238
- 124 Dai J Y, Zhao J, Cheng Q, et al. Independent control of harmonic amplitudes and phases via a time-domain digital coding metasurface. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 90
- 125 Zhang L, Chen X Q, Liu S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces. *Nat Commun*, 2018, 9: 4334
- 126 Zhang L, Wang Z X, Shao R W, et al. Dynamically realizing arbitrary multi-bit programmable phases using a 2-bit time-domain coding metasurface. *IEEE Trans Antenn Propagat*, 2020, 68: 2984–2992
- 127 Zhang C, Yang J, Yang L X, et al. Convolution operations on time-domain digital coding metasurface for beam manipulations of harmonics. *Nanophotonics*, 2020. doi: 10.1515/nanoph-2019-0538
- 128 Zhang L, Chen X Q, Shao R W, et al. Breaking reciprocity with space-time-coding digital metasurfaces. *Adv Mater*, 2019, 31: 1904069
- 129 Li L, Cui T J, Ji W, et al. Electromagnetic reprogrammable coding-metasurface holograms. *Nat Commun*, 2017, 8: 197
- 130 Li Y B, Li L L, Xu B B, et al. Transmission-type 2-bit programmable metasurface for single-sensor and single-frequency microwave imaging. *Sci Rep*, 2016, 6: 23731
- 131 Li L, Hurtado M, Xu F, et al. A survey on the low-dimensional-model-based electromagnetic imaging. *FNT Signal Process*, 2018, 12: 107–199
- 132 Cui T J, Liu S, Bai G D, et al. Direct transmission of digital message via programmable coding metasurface. *Research*, 2019, 2019: 1–12
- 133 Wan X, Zhang Q, Chen T Y, et al. Multichannel direct transmissions of near-field information. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 60
- 134 Dai J Y, Tang W K, Zhao J, et al. Wireless communications through a simplified architecture based on time-domain digital coding metasurface. *Adv Mater Technol*, 2019, 4: 1900044
- 135 Tang W, Dai J Y, Chen M, et al. Programmable metasurface-based RF chain-free 8PSK wireless transmitter. *Electron Lett*, 2019, 55: 417–420
- 136 Tang W, Dai J, Chen M, et al. Programmable metasurfaces: the future of wireless? *Electron Lett*, 2019, 55: 360–361
- 137 Dai J Y, Tang W, Yang L X, et al. Realization of multi-modulation schemes for wireless communication by time-

- domain digital coding metasurface. *IEEE Trans Antenn Propagat*, 2020, 68: 1618–1627
- 138 Tang W, Chen M Z, Chen X, et al. Wireless communications with reconfigurable intelligent surface: path loss modeling and experimental measurement. *IEEE Trans Wirel Commun*, 2020
 - 139 Tang W, Chen M Z, Dai J Y, et al. Wireless communications with programmable metasurface: new paradigms, opportunities, and challenges on transceiver. *IEEE Wirel Commun*, 2020, 27: 180–187
 - 140 Ma Q, Bai G D, Jing H B, et al. Smart metasurface with self-adaptively reprogrammable functions. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 98
 - 141 Ma Q, Hong Q R, Gao X X, et al. Smart sensing metasurface with self-defined functions in dual polarizations. *Nanophotonics*, 2020, 9: 3271–3278
 - 142 Li L, Ruan H, Liu C, et al. Machine-learning reprogrammable metasurface imager. *Nat Commun*, 2019, 10: 1082
 - 143 Li L, Shuang Y, Ma Q, et al. Intelligent metasurface imager and recognizer. *Light Sci Appl*, 2019, 8: 97
 - 144 Li H Y, Zhao H T, Wei M L, et al. Intelligent electromagnetic sensing with learnable data acquisition and processing. *Patterns*, 2020, 1: 100006
 - 145 Zhang Q, Liu C, Wan X, et al. Machine-learning designs of anisotropic digital coding metasurfaces. *Adv Theor Simul*, 2019, 2: 1800132
 - 146 Qiu T, Shi X, Wang J, et al. Deep learning: a rapid and efficient route to automatic metasurface design. *Adv Sci*, 2019, 6: 1900128
 - 147 Cui T J, Tang W X, Yang X M, et al. *Metamaterials — Beyond Crystals, Noncrystals, and Quasicrystals*. Boca Raton: CRC Press, 2016
 - 148 Cui T J. Microwave metamaterials—from passive to digital and programmable controls of electromagnetic waves. *J Opt*, 2017, 19: 084004
 - 149 Liu S, Cui T J. Concepts, working principles, and applications of coding and programmable metamaterials. *Adv Opt Mater*, 2017, 5: 1700624
 - 150 Cui T J. Microwave metamaterials. *Natl Sci Rev*, 2018, 5: 134–136
 - 151 Tang W X, Zhang H C, Ma H F, et al. Concept, theory, design, and applications of spoof surface plasmon polaritons at microwave frequencies. *Adv Opt Mater*, 2019, 7: 1800421
 - 152 Fu X, Cui T J. Recent progress on metamaterials: from effective medium model to real-time information processing system. *Prog Quantum Electron*, 2019, 67: 100223
 - 153 Chen T, Tang W X, Mu J, et al. Microwave metamaterials—a review. *Annalen Der Physik*, 2019, 531: 1800445
 - 154 Ma Q, Cui T J. Information metamaterials: bridging the physical world and digital world. *PhotoniX*, 2020, 1: 1
 - 155 Bao L, Cui T J. Tunable, reconfigurable, and programmable metamaterials. *Microw Opt Technol Lett*, 2020, 62: 9–32
 - 156 Wu R Y, Cui T J. Microwave metamaterials: from exotic physics to novel information systems. *Front Inform Technol Electron Eng*, 2020, 21: 4–26

Electromagnetic metamaterials—from effective media to field programmable systems

Tiejun CUI^{1,2}

1. *State Key Laboratory of Millimeter Waves, School of Information Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;*

2. *Institute of Electromagnetic-Space Science and Technology, Southeast University, Nanjing 210096, China*

E-mail: tjcui@seu.edu.cn

Abstract Electromagnetic metamaterials are periodic or nonperiodic artificial structures comprising basic elements in subwavelength scales. They can be used to control electromagnetic waves by designing the basic elements and their spatial arrangements. Metamaterial has been a research hotspot in physical and information sciences. In this review, I present the history and main progresses achieved in metamaterial studies conducted in the State Key Laboratory of Millimeter Waves at Southeast University, which were performed in three stages. In the first stage, we improved the developments in effective-medium metamaterials. In particular, we proposed a general theory to accurately describe the effective permittivity and permeability of metamaterials. Based on the general theory, we designed and realized a three-dimensional (3D) wideband ground-plane invisibility cloak, free-space electrostatic invisibility cloak, electromagnetic black hole, electromagnetic illusions, and radially anisotropic zero-index metamaterial for omni-directional radiations and nearly perfect power combinations of source arrays. Moreover, we undertook significant efforts in engineering applications of microwave metamaterials, such as broadband and low-loss 3D transformation-optic lens for wide-angle scanning, 3D planar gradient-index lens for high-gain radiations, and random metasurfaces to reduce radar cross sections. In the second stage, we opened up a new direction of plasmonic metamaterials from the viewpoint of microwave transmission lines. We proposed an ultrathin, narrow, and flexible corrugated metallic strip to guide spoof surface plasmon polaritons (SPPs) with small bending and radiation losses, based on which we designed and realized a series of passive SPP devices (such as power divider, coupler, filter, and resonator), active SPP devices (such as amplifier and duplexer) and SPP antennas in the microwave bands. We demonstrated a significant feature of the ultrathin SPP transmission line in overcoming challenges of signal integrity existing in the traditional integrated devices and circuits. We built up a full-SPP wireless communication system with unique properties to remotely transmit two movies in two deep-subwavelength-distance channels exhibiting excellent performance. In the third stage, we established a new area of metamaterial-information metamaterial. We proposed to describe the metamaterial using digital coding from the information science viewpoint, which directly resulted in a new kind of metamaterial-digital coding metamaterial. We theoretically and experimentally illustrated that the digital coding metamaterials comprising digital units can be controlled using different coding sequences to achieve different functions. When the digital state of the coding unit was controlled using a field programmable gate array (FPGA), we realized a field programmable metamaterial that can manipulate electromagnetic waves in real time and generate numerous different functions using a single piece of hardware. The digital coding metamaterial provides a platform to establish a digital space on the physical space and enriches the methodology and theory of metamaterials. We proposed measuring the information capacity of metamaterials using Shannon entropy and presented the convolution and addition theorems on metamaterial platforms, which can be used to simultaneously control the physical properties and digital information. Based on information metamaterials, we established new-architecture microwave imaging systems, wireless communication systems, and other intelligent information systems.

Keywords electromagnetic metamaterial, effective-medium model, surface plasmon polaritons, digital coding metamaterial, field programmable, information metamaterial, information system

Tiejun CUI was born in Hebei Province in September 1965. He received his B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Xidian University, Xi'an, China, in 1987, 1990, and 1993, respectively. He joined the Department of Electromagnetic Engineering, Xidian University, in March 1993 and became an associate professor in November 1993. From 1995 to 1997, he was a research fellow at the Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik (IHE) at the University of Karlsruhe, Germany, under the support of the Alexander von Humboldt Foundation. In July 1997, he joined the Center for Computational Electromagnetics, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign first as a postdoctoral research associate and then as a research scientist. In September 2001, he became a Cheung-Kong professor at the Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing, China. He is the chief professor at Southeast University and a member of the Chinese Academy of Sciences. His research interests include computational electromagnetics and metamaterials. He proposed the concepts of digital coding metamaterial and programmable metamaterial in 2014 and created a new direction of metamaterials — the information metamaterials.