

电磁调控液晶相控阵天线发展现状

修 威^{1,3}, 杨 光³, 田海燕³, 庞 晨¹, 李永祯¹, 王雪松²

(1.国防科技大学电子信息系复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南 长沙 410073;

2. 国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073;

3. 北京华镁钛科技有限公司, 北京 100092)

摘 要: 介绍电磁超材料技术背景, 阐述电磁调控液晶技术发展历程、工作机理以及电磁调控液晶相控阵天线在研究和应用方面的最新进展, 总结电磁调控液晶相控阵天线技术优缺点, 并对未来液晶超材料在电磁调控超材料领域的发展前景进行展望。

关键词: 电磁调控; 液晶天线; 电磁超材料; 相控阵

中图分类号: TN82

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200216

Development of Electrically Controlled Liquid Crystal Phased Array Antenna

XIU Wei^{1,2}, YANG Guang², TIAN Haiyan², PANG Chen¹, LI Yongzhen², WANG Xuesong²

1. CEMEE, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. Beijing Huameta Technology Co., Ltd., Beijing 100092, China

Abstract: The technical background of EM metamaterials was introduced, the development history and working mechanism of electrically controlled LC technology, the latest developments in the research and application of electrically controlled LC phased array antenna were illustrated. The electrically controlled LC phased array antenna's advantages and disadvantages were summarized. Finally, the future prospect of LC metamaterials in the field of EM metamaterials was expounded.

Keywords: electrically controlled, liquid crystal antenna, EM metamaterial, phased array

1 引言

电磁超材料 (EM metamaterial) 描述的是一类具有特殊性质的人工电磁结构材料, 含义丰富, 根据使用场合的不同, 也称之为左手材料、光子晶体、双负材料、超构材料等。“负折射率”超材料概念于1968年由物理学家 Veselago^[1]首次提出, 由于缺乏实验验证, 该概念一直停留在理论假说上。直到美国杜克大学 Smith 教授团队在微波频率进行了实验验证, 才开始了电磁超材料研究热潮^[2]。电磁超材料因其独特的电磁特性而受到极为广泛的关注, 并迅速发展成为涉及物理、化学、材料、信

息等领域的前沿交叉学科, 其应用范围覆盖了工业、军事、生活等各个方面。随着现代社会逐渐步入信息化, 相关学科领域如通信、国防、电子技术及基础自然科学等都获得了前所未有的发展机遇, 电磁超材料技术研究正在由基础理论研究转向工程应用。从传统的频率选择表面 (Frequency Selective Surface, FSS)^[3]、电磁带隙 (Electromagnetic Band-Gap, EBG)^[4]、极化栅^[5]、人工磁导体^[6]等电磁超材料应用, 到最近几年加载电磁调控液晶^[7]、PIN二极管^[8]、MEMS开关^[9]或变容二极管^[10]等器件的新型电磁超材料产品问世, 电磁超材料已在隐身^[11]、低

收稿日期: 2020-11-01; 修回日期: 2020-11-30

通信作者: 修威, woodwall@139.com

基金项目: 国家杰出青年项目 (No.61625108); 国家自然科学基金面上项目 (No.61971429); 国家自然科学基金青年基金项目 (No.61701512)

Foundation Item: National Science Foundation for Distinguished Young Scholars (No.61625108); General Program of National Natural Science Foundation of China (No.61971429); Youth Program of National Natural Science Foundation of China (No.61701512)

散射截面^[12]、高性能天线^[13]、高分辨率的成像透镜^[14]，甚至实现数学运算^[15]等领域展示出了巨大的发展潜力。电磁超材料研究及应用概述如图1所示。

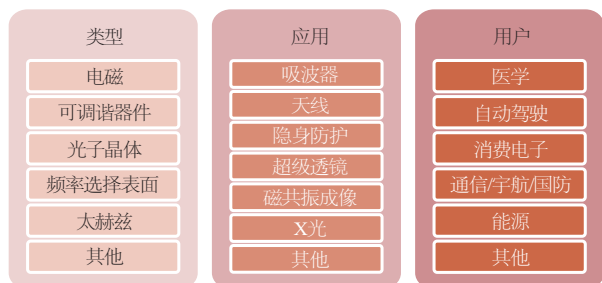


图1 电磁超材料研究及应用示意

电磁调控液晶作为最受关注的电磁超材料之一，凭借优异的电性能、热性能、物理性能、化学性能和机械性能，尤其是各向异性、低驱动电压、低功耗等方面的优势，其在微波、毫米波、太赫兹波乃至激光领域的应用成为电磁超材料研发和应用的重要方向之一，可广泛应用于天线、移相器、滤波器、偏振片和开关等器件的设计，为电磁场及光学领域突破和解决传统设计时所遇到的一些瓶颈提供了新的思路和解决方法。

2 电磁调控液晶技术发展概述

2.1 研究历程概述

早期有关电磁调控液晶的研究集中于液晶的介电性能、各向异性以及对所施加电场和磁场的依赖性^[17]。介电测量是使用波导方法在单个微波频率（~24 GHz）下进行的，实验中使用的向列型和层列型液晶材料需要在较高的温度（100~200℃）下才能表现出液晶相。这个阶段液晶材料具有相对较高的温度、较低的化学纯度和特性的短期稳定性，以及相对较大的介质损耗（约为0.1），均导致了1960年代到1970年代有关电磁调控液晶的研究大都基于单纯学术兴趣。

在1980年代，室温液晶的化学设计和合成方面取得突破，1960年代至1970年代研究的“高温”和“不稳定”液晶被化学上稳定的室温液晶所替代，该液晶在微波频率下具有高双折射和介电常数可调性，这引起了更多电磁场领域学者的研究兴趣。1990年代初以来，德国默克（Merck）、日本智索（Chisso）以及中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等液晶材料的生产厂商和研究机构针对电磁调控液晶应用需求展开了新产品的研制，陆续开发出具有高光学各向异性、低损耗角正切、快速响应时间、宽的相范围、高清亮点和低熔点等优点的新型液晶材料。同时现代网络分析仪、晶圆技术、建

模和微波仿真技术的显著改进为微波毫米波乃至太赫兹频率下液晶特性研究的爆炸式发展奠定了坚实的基础。

2.2 应用领域概述

加载MEMS开关、PIN二极管或变容二极管等器件的电磁超材料虽然具有器件成熟、响应时间快等优点，但在实际应用中存在明显不足，例如仅能提供离散的调谐级别，具有更高的制造复杂性和成本，并且其性能指标在高频段（几十吉赫兹）时会显著恶化等。其他连续可调的材料（例如铁氧体和铁电体）是微波、毫米波频率调谐器件设计的绝佳选择，但它们具有高介电损耗、高介电常数值以及非常高的工作电压（通常需数百伏），尤其是在膜层厚度较大的情况下上述不足更加突出，因此限制了它们在毫米波应用中的整体性能。

与之相比，电磁调控液晶超材料不仅可以提供对电磁波的连续调谐，满足低介电常数和色散要求，介电损耗在1~1 000 GHz范围内均可以接受，更吸引人的是该指标会随频率升高而降低，同时驱动偏置电压较低，几伏到几十伏即可满足工程应用。电磁调控液晶超材料在毫米波甚至太赫兹频段具备更紧凑的器件尺寸、更快的切换时间以及更低的生产成本，同时性能也可得到进一步提升。上述特点使得电磁调控液晶超材料技术研究在众多应用领域取得了突破，在学术界和工业界，电磁调控液晶已经成为国内外超材料领域的研究热点之一，研究重点由构建和表征采用液晶的可调谐微波设备，包括移相器/延迟线^[18]、可调滤波器和谐振器^[19]、超材料或频率选择表面^[20]、贴片天线^[21]、相控阵天线^[22]、反射阵列^[23]、行波天线^[24]或透镜天线^[25]等，逐渐转向工程实用和产品开发。这其中，已有基于电磁调控液晶技术的移相器和相控阵天线产品面世并得到应用。

基于电磁调控液晶的器件示意如图2所示。

3 电磁调控液晶天线技术分析

卫星互联网浪潮兴起、5G商用、信息网络与产业体系变革重塑、泛在连接构建万物智联新生态等主要趋势都对微波、毫米波天线行业的技术革新提出了应用要求，传统的机械驱动波束扫描天线不仅存在尺寸大、笨重、功耗大等应用局限，而且机械伺服结构还会带来波束扫描速度慢、可靠性差等问题，已经无法满足新的使用需求。各类新应用均要求天线可以实现电子波束扫描，还希望低成本、低功耗、高可靠性、平板化、轻量化等。

电磁液晶超材料可以运用于微波、毫米波乃至太赫兹波频段的电调谐器件设计，具有体积小、便捷性高、功耗低、制造成本低等显著特点；并且其填充介质液晶

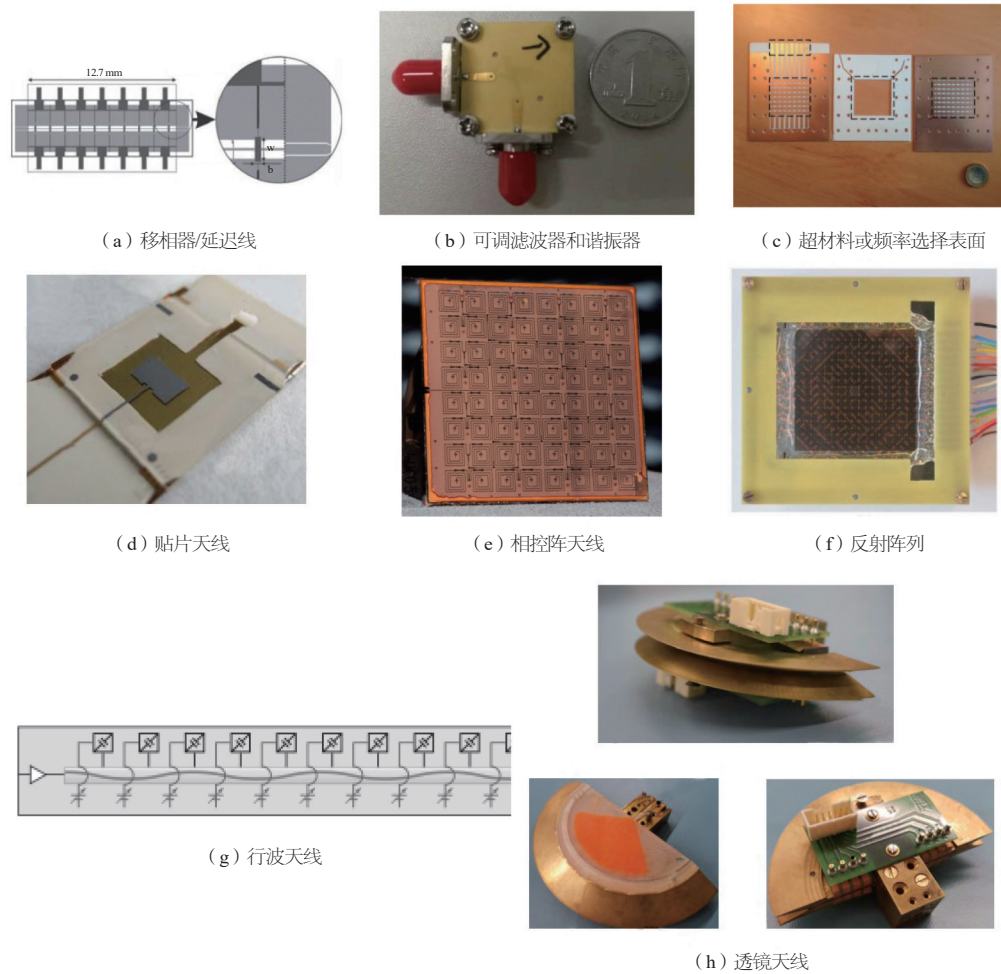


图2 基于电磁调控液晶的器件示意

的损耗角正切随着频率的增大而减小，偏置电压也相对较小，为低成本、低功耗相控阵天线设计提供了一个有效的解决方案。

3.1 基本原理

电磁液晶超材料经过初始取向后，其液晶分子可按一定规则排布。如图3所示，通过对该液晶超材料层施加偏置电压，改变液晶分子排列方向，会使得平行于液晶分子长轴的介电常数与垂直于分子长轴方向的介电常数各不相同，从而形成液晶超材料等效介电常数 ϵ_r 在一定范围内连续变化，即 $\Delta\epsilon = \epsilon_{r\parallel} - \epsilon_{r\perp}$ 不再为零，这时就表现了介电各向异性。利用液晶的这个性质即可实现对电磁波相位等特性的连续调控。

本节将对基于上述基本原理，在电磁调控液晶相控阵天线领域研究较深入且技术成熟度较高的3种主要技术路线进行简要分析。

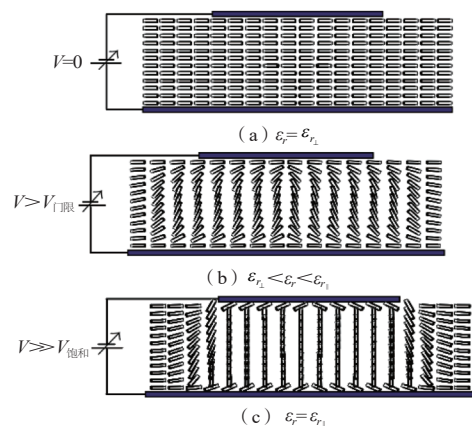


图3 液晶分子偏转角度与偏置电压的关系

(1) 液晶谐振器开关移相技术

该技术原理是设计液晶高 Q 值的谐振器开关替代传统加载PIN开关器件电磁超材料结构，实现射频信号的通

断控制，天线辐射单元则以传统电磁超材料结构原理按一定的规律周期排布，每相邻两个辐射单元存在一个相位差，通过全息算法确定液晶谐振器“开关”状态，进而选择辐射单元控制波束指向^[26]。

该技术优点是容易实现收发天线共面设计，但不足较为明显。由于液晶本身性能导致开关隔离度不高，小尺寸周期单元排布导致互偶、相位模糊和辐射效率不高，因而存在天线扫描波束指向精度较差、效率较低（15%）、旁瓣电平较大和控制算法设计复杂等问题，同时该技术路线对电磁调控液晶材料特性要求较高。

(2) 液晶延迟线移相技术

该技术原理是采用倒置微带线三明治结构实现延迟线移相结构，通过控制液晶介电常数的变化改变波导波长和S21参数，可通过设计调整微带线长度实现相位变化范围^[18]，如图4所示。

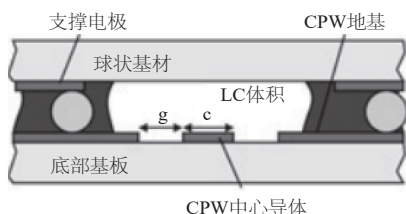


图4 液晶延迟线移相技术原理示例

该技术优点是工艺相对简单，其不足主要表现在移相损耗较大（FoM：60° /dB），导致天线整体损耗偏大，因而效率不高（30%）；同时移相器尺寸相对较大，难于实现天线双极化、收发一体化设计。

(3) 液晶可变电容器移相技术

该技术原理是采用多层“三明治”结构实现可变电容器结构，通过控制液晶介电常数的变化改变结构容值和阻抗，实现基于该可变电容结构的时频响应、频率选择、移相控制、传输匹配等功能；通过3D结构设计实现更佳的慢波效果，达到有效减小移相器尺寸和移相器损耗的目的，提升了移相器的品质因数。液晶可变电容器移相技术原理如图5所示。

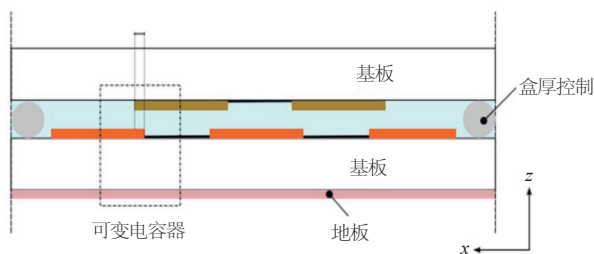


图5 液晶可变电容器移相技术原理

该技术优点是在有限空间内最大限度利用液晶可调能力，实现大范围的液晶电磁控制，有助于降低单元尺寸（小于 $0.009\lambda_0^2$ ），同时降低液晶带来的电磁调控损耗（FoM：大于 100° /dB），提高辐射效率（40%），并使电磁调控时间大大缩短，达到毫秒级。该技术的不足是结构相对复杂，对加工工艺要求相对严格。

3.2 与CMOS低成本相控阵天线技术对比分析

采用成本更低的硅基CMOS工艺代替昂贵的GaAs、GaN工艺，牺牲一部分T/R组件性能（单通道功率小、效率低等）来换取成本的相对降低，天线集成度高，能够使相控阵天线波束具有高精度、快速扫描的能力；但依旧基于射频芯片集成电路生产线和工艺，生产难度较大，射频板材、制造工艺等均受制于国外，批量生产和成本降低在很长一段时间内仍有难度，其大规模普及应用受成本、尺寸、重量、功耗、系统复杂度所限制。与之相比，电磁调控液晶相控阵天线在功耗、成本、一致性和量产可行性上都具备一定优势。二者的具体对比如见表1。

表1 低成本相控阵天线技术对比

基本原理	电磁调控液晶超材料	硅基CMOS工艺T/R
频段	Ku、Ka、77 GHz、THz等均适合	Ku、Ka、77 GHz
加工	LCD面板工艺简单，高低频工艺难度差别不大	芯片工艺难度大，频率越高工艺越难
尺寸	灵活设计，可以实现大尺寸超表面	集成电路芯片尺寸
成本	低	高
一致性	好，整体调控，无须单元校准	差，需要在使用过程中每个器件独立调控
电磁调控损耗	小，FoM>90 频率增高，损耗几乎不增加	大，FoM<60 频率越高损耗越大
电磁调控精度	高，可以实现10 bit（1 024级）低成本调控	通常6 bit调控（相当于64级调控），8 bit（256级调控）成本高，损耗增大
功耗	低功耗、低电压、微安级电流	功耗大，低电压、毫安级电流

4 全球主要电磁调控液晶天线产品研制进展

低成本相控阵天线市场需求的日益明确，使越来越多国内外科研院所、天线设备厂商乃至显示面板厂商对电磁调控液晶相控阵天线技术增大研发投入，却因面临材料、设计、工艺等障碍和壁垒大都止步于理论研究阶段。

电磁调控液晶相控阵天线是跨学科融合技术，涉及微波电磁场、物理、化学、材料、微纳工艺、计算机软硬件、工程等多个学科，需突破传统天线设计领域的微小电尺寸仿真和设计，设计思路和设计方法不同，模型构造复杂，精确仿真难度大。对各专业均有理解和融合思考能力的技术带头人才能有创新技术突破，不仅需要

实现与众不同的原理设计，还需具备工程可实施性。电磁调控液晶相控阵天线可以使用现有的TFT-LCD显示面板生产线加工制造液晶相控阵天线面板，实现规模化生产制造。但由于电磁调控液晶相控阵天线与传统显示从设计到应用有很大不同，所需的材料和工艺与现有生产线差别较大，每个工艺环节均需要反复尝试和测试，加工时间周期长，迭代周期长，导致研发难度大。

目前，国内外仅有三四家厂商可提供具有自主知识产权的电磁调控液晶相控阵天线工程样机，其主要进展及性能指标总结如下。

4.1 液晶谐振器开关移相技术代表产品

Kymeta公司已于2017年年底正式推出了全球首款基于液晶谐振器开关移相技术的液晶相控阵天线产品，并陆续交付用户应用。目前其正在开展第二代液晶相控阵天线u8的开发。

4.2 液晶延迟线移相技术代表产品

Alcan Systems公司于2020年6月发布产品开发计划，其基于电磁调控液晶技术的Ka频段卫星通信天线将于2021年第4季度交付首批客户，并表示该天线定价1 500欧元（完整终端价格估计为2 500欧元）。

4.3 液晶可变电容器移相技术代表产品

北京华镁钛科技有限公司于2018年1月推出了国内首台基于液晶可变电容器移相技术的Ku频段液晶相控阵天线工程样机，并于2019年11月联合液晶面板生产线实现Ku频段液晶相控阵天线小批量试生产，其面向卫星互联网应用的液晶相控阵天线预计2021年实现量产。

上述3款产品主要技术指标对比见表2。

4.4 低成本优势分析

自2017年美国Kymeta公司推出全球首款液晶相控阵天线并投入市场至今，液晶相控阵天线产品的低成本优势已经在生产、调测和应用等不同阶段得到印证。

(1) 生产成本及物料成本低

首先，天线液晶面板可基于现有液晶显示面板成熟生产线基础大规模生产，而目前55英寸LCD显示面板出厂成本已经低于100美元。其次，所需射频物料成本只有相同指标T/R组件相控阵天线的1/20到1/10，而且液晶相控阵天线成本也不像T/R组件相控阵天线成本一样与通道数成比例增加，液晶相控阵天线面板越大，成本相对也越低。

(2) 调测成本低

量产工艺成熟稳定后，液晶相控阵天线液晶面板加工一致性可以保证所有天线整机射频指标一致性，因而有效减少液晶相控阵天线出厂调测时间和难度，有效降低调测成本。

(3) 应用成本低

从各厂商公开指标可以看出，液晶相控阵天线整机功耗较相同指标的T/R组件相控阵天线明显降低，对于最终用户来说，可以有效降低电费成本。

因此，无论从成本分析，还是各厂商已经公布的目标产品定价来看，电磁调控液晶超材料相控阵天线短期内产品售价降到10万元以内几乎没有悬念，未来随着应用普及更有望降到万元级别。

4.5 技术发展趋势分析

由于电磁液晶移相技术在小型化、轻重量、低成

表2 液晶相控阵天线产品技术指标对比

厂商	Kymeta	Alcan Systems	北京华镁钛科技有限公司
工作频段	Tx 13.75 ~ 14.5 GHz	Tx 27.5 ~ 30 GHz	Tx 27 ~ 31 GHz
	Rx 10.7 ~ 12.75 GHz	Rx 17.7 ~ 20.2 GHz	Rx 17 ~ 21 GHz
极化方式	线极化可调	圆极化	圆极化
EIRP	45.5 dBW@90° (20 W BUC)	44.9 dBW@90° (6 W BUC) 41.4 dBW@55° (6 W BUC)	≥40 dBW@90°
G/T	11.25 dB/K@90°	≥10.8 dB/K@90° ≥7.3 dB/K@90°	≥8.5 dB/K@90°
第一旁瓣电平	—	≤-17 dB法向	≤-18 dB法向
跟踪精度	—	—	≤0.2°
扫描范围	方位0 ~ 360°	方位0 ~ 360°	方位0 ~ 360°
	离轴角大于±75°	离轴角大于±55°	离轴角大于±65°
功耗	200 W (典型) 600 W (峰值)	98 W (内置BUC、LNB)	小于180 W (内置BUC、LNB)
重量	32 kg	18 kg	小于8 kg
工作温度	-40 ~ 70 °C	-20 ~ 55 °C	-20 ~ 55 °C (宽温可定制)
外观尺寸	≤900 mm × 900 mm × 140 mm	≤550 mm × 995 mm × 90 mm	≤400 mm × 600 mm × 50 mm
电源输入	DC12 ~ 24 V	—	DC18 ~ 36 V

本、高性能等方面优势突出,未来,各厂商公司将基于该技术在新领域、新应用、新需求、新空间等发展方向继续探索,形成更多、更新、更突出的技术优势,有望在以下技术领域取得新的突破和创新。

(1) 多波束相控阵天线

随着通信频率向高频发展,性能突出的高集成度多通道移相器阵列是实现多波束相控阵天线的基本需求。各厂商将结合自身技术优势,努力探索集成化空间,积极突破高性能技术,降低高集成系统中的互扰,提升液晶多波束相控阵天线稳定性。

(2) 低时延技术

液晶移相器与传统硅基CMOS工艺T/R组件相比,液晶分子偏转时延引入的系统响应时间过长问题一直是液晶相控阵天线在快速响应系统中应用的瓶颈。各厂商将与材料及面板供应商一起探索快速响应液晶分子结构、超低液晶盒厚制成工艺等技术,加速解决响应时延问题,为该技术在更高需求的快速指向液晶相控阵天线应用提供支撑。

(3) 有源液晶相控阵方案

作为液晶分子的支撑材料,玻璃基板具有其他传统射频基板不具备的高平整度优势,未来有望在基于玻璃结构的有源放大、滤波、信号处理等技术领域取得突破,与电磁液晶移相技术一起实现高性能有源液晶相控阵方案。

5 结束语

综上所述,电磁调控液晶超材料相控阵天线不仅具有优秀的性能指标,还可以利用现有液晶显示面板生产线开展批量生产,因此具备良好的低成本产业化基础,且其结构一致性高,面板结构稳定,避免传统T/R组件烦琐的调试过程,缩短产品生产周期,未来有大规模降低成本的潜力,有望使产品价格降到消费者能接受的水平。以高、中、低轨卫星星座系统为重要组成部分的天地一体化信息网络,已成为我国十三五规划纲要部署的重大项目和“新基建”的重点发展方向^[27-29],带动了国内低成本相控阵天线的研发热潮,液晶相控阵和低成本T/R组件相控阵是目前有可能推动相控阵天线的普及应用,进而推动天地一体化信息网络打开大规模用户市场的两条技术路线。从成本、大规模量产的角度,电磁调控液晶超材料相控阵天线更具优势,既有望解决卫星互联网、5G等领域核心器件产业化瓶颈,还可引领技术创新,同步跟进国际前沿技术,规避国际形势风险对高端芯片产业链的影响,提升自主可控能力。

当然,电磁调控液晶超材料面临一些不足。由于超材料单元的均一分布,目前电磁调控液晶超材料的 τ

值(相对介电常数可调率)还比较小,对波前的强度、偏振和相位等调控能力还比较弱,仍需深入研究;液晶材料的旋转粘滞特性带来的毫秒级波束切换响应时间问题,目前在期待液晶原料厂商的不断更新迭代或者系统级方案,而液晶材料在零下40℃低温结晶问题,尽管可以通过成熟的盒内加温技术解决,但液晶原料性能的改进和提高迫在眉睫。

参考文献:

- [1] VESELAGO V G. The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ [J]. Physics-Uspekhi, 1968, 10 (4): 509-514.
- [2] SMITH D R, PADILLA W J, VIER D C, et al. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. Physical Review Letters, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [3] MITTRA R, CHAN C H, CWIK T. Techniques for analyzing frequency selective surfaces-a review[J]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(12):1593-1615.
- [4] YANG F, RAHMAT-SAMII Y. Electromagnetic band gap structures in antenna engineering[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2009.
- [5] FEI P, WEN X, ZHANG P, et al. A wideband single-layered circular polarizer with centrosymmetric dual-loop elements[C]// Proceedings of the 46th European Microwave Conference. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1271-1274.
- [6] FERESIDIS A P, GOUSSETIS G, WANG S H, et al. Artificial magnetic conductor surfaces and their application to low-profile high-gain planar antennas[J]. IEEE Transactions Antennas Propagation, 2005, 53(1): 209-215.
- [7] MAUNE H, JOST M, REESE R, et al. Microwave liquid crystal technology[J]. Crystals, 2018(8): 355.
- [8] 杨帆, 许慎恒, 刘骁, 等. 基于界面电磁学的新型相控阵天线[J]. 电波科学学报, 2018, 33(3): 256-265.
YANG F, XU S H, LIU X, et al. Novel phased array antennas based on surface electromagnetics[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2018, 33(3): 256-265.
- [9] BOYARSKY M, SLEASMAN T, PULIDO-MANCERA L, et al. Synthetic aperture radar with dynamic metasurface antennas: a conceptual development[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2017, 34(5): A22.
- [10] ZHANG X G, YU Q, JIANG W X, et al. Polarization-controlled dual-programmable metasurfaces[J]. Advanced science, 2020, 7(11).
- [11] LIU S, CUI T J, XU Q, et al. Anisotropic coding metamaterials

- and their powerful manipulation to differently polarized terahertz waves[J]. *Light: Science & Application*, 2015, 5 : e16076.
- [12] YANG X M, ZHOU X Y, CHENG Q, et al. Diffuse reflections by randomly gradient index metamaterials[J]. *Optics Letter*, 2010, 35:808-810.
- [13] LIER E, WERNER D H, SCARBOROUGH C P, et al. An octave-bandwidth negligible-loss radiofrequency metamaterial[J]. *Nature Materials*, 2011, 10 : 216-222.
- [14] JIANG W X, QIU C W, HAN T C, et al. Broadband all-dielectric magnifying lens for far-field high-resolution imaging[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25 : 6963-6968.
- [15] SILVA A, MONTICONE F, CASTALDI G, et al. Performing mathematical operations with metamaterials[J]. *Science*, 2014, 343:160-163.
- [16] CARR E F, SPENCE R D. Influence of a magnetic field on the microwave dielectric constant of a liquid crystal[J]. *Chem Phys*. 1954, 22(9):1481-1485.
- [17] CARR E F. Microwave dielectric measurements in liquid crystals[J]. *Chem Phys*, 1957, 26(2):420-422.
- [18] GOELDEN F, GAEBLER A, GOEBEL M, et al. Tunable liquid crystal phase shifter for microwave frequencies[J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(13):686-687.
- [19] JIANG D, LI X, FU Z, et al. Millimeter-wave broadband tunable band-pass filter based on liquid crystal materials[J]. *IEEE Access*, 2019(99):1-1.
- [20] MAASCH M, ROIG M, DAMM C, et al. Voltage-tunable artificial gradient-index lens based on a liquid crystal loaded fishnet metamaterial[J]. *IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters*, 2014, 13:1581-1584.
- [21] FRITZSCH C, BILDIK S, JAKOBY R. Ka-band frequency tunable patch antenna[C]//*Antennas & Propagation Society International Symposium*. Piscataway: IEEE Press, 2012.
- [22] HOLGER M, MATTHIAS J, ROLAND R, et al. Microwave liquid crystal technology[J]. *Crystals*, 2018, 8(9):355.
- [23] BILDIK S, DIETER S, FRITZSCH C, et al. Reconfigurable folded reflectarray antenna based upon liquid crystal technology[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2014, 63(1):122-132.
- [24] JOHNSON M C, BRUNTO S L, KVNDTZ N B, et al. Sidelobe canceling for reconfigurable holographic metamaterial antenna[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2015, 63(4):1881-1886.
- [25] REESE R, JOST M, POLAT E, et al. A millimeter-wave beam-steering lens antenna with reconfigurable aperture using liquid crystal[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, 67(99):5313-5324.
- [26] STEVENSON R, SAZEGAR M, BILY A, et al. Metamaterial surface antenna technology: Commercialization through diffractive metamaterials and liquid crystal display manufacturing[C]//2016 10th International Congress on Advanced Electromagnetic Materials in Microwaves and Optics (METAMATERIALS). Piscataway: IEEE Press, 2016.
- [27] 吴曼青, 吴巍, 周彬, 等. 天地一体化信息网络总体架构设想[J]. *卫星与网络*, 2016(3):30-36.
- WU M Q, WU W, ZHOU B, et al. Overall framework design of space-ground integrated information network[J]. *Satellite & Network*, 2016(3): 30-36.
- [28] 吴巍. 天地一体化信息网络发展综述[J]. *天地一体化信息网络*, 2020, 1(1): 10-26.
- WU W. Survey on the development of space-intergrated-ground information network[J]. *Space-Intergrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(1): 10-26.

[作者简介]



修威 (1972-), 男, 国防科技大学博士生, 主要研究方向为阵列天线技术、空间信号获取和极化信息处理。



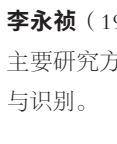
杨光 (1977-), 男, 北京华镁钛科技有限公司副经理、研究员, 主要研究方向为卫星通信和5G应用。



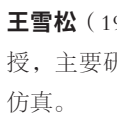
田海燕 (1987-), 男, 北京华镁钛科技有限公司技术总监、博士后, 主要研究方向为毫米波天线、阵列天线技术。



庞晨 (1986-), 男, 国防科技大学电子科学学院讲师, 主要研究方向为相控阵雷达极化信息精确获取、极化抗干扰、极化特征提取与识别。



李永祯 (1977-), 男, 国防科技大学电子科学学院研究员, 主要研究方向为雷达极化信息处理、空间电子对抗、目标检测与识别。



王雪松 (1972-), 男, 博士, 国防科技大学电子科学学院教授, 主要研究方向为雷达目标识别、雷达电子战建模评估与仿真。