

文章编号: 1007-2780(2024)01-0017-08

基于聚合物分散液晶的频率可重构贴片天线

储怡冰¹, 项颖^{1*}, 张文慧^{1*}, 郝禄国¹, 江博韬¹, 陈凯¹,
高延子², 胡湧川², Michal KOHOUT³

(1. 广东工业大学信息工程学院, 广东广州 510006;

2. 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083;

3. Department of Organic Chemistry, University of Chemistry and Technology
Prague, CZ-16628 Prague, Czech Republic)

摘要: 本文设计了一种以液晶聚合物为介质基板的频率可重构天线, 通过调节贴片的位置及尺寸实现天线的阻抗匹配。制备聚合物分散液晶薄膜作为天线的介质, 并根据液晶与聚合物的比例分别为 7:3、6:4、5:5 这三种不同配比以及 50 μm 和 100 μm 两种不同膜的厚度来考察其效果。在电场作用下, 液晶微滴会沿着电场方向重新取向排列, 通过改变驱动电压的大小, 实现天线的频率可重构。经过对比分析得出, 液晶含量(质量分数)为 70% 的聚合物分散液晶薄膜具有最佳的效果, 在 48 V 的驱动电压下实现了 62 MHz 的频率连续调节, 天线的最大增益为 3.5 dBi。该基于液晶聚合物的频率可重构贴片天线结构简单、体积小、质量轻, 易于集成在各种移动设备中, 发展前景广阔。

关键词: 液晶聚合物; 频率可重构; 贴片天线

中图分类号: O753⁺.2 文献标识码: A doi: 10.37188/CJLCD.2023-0400

Patch antenna adjustable in frequency based on polymer dispersed liquid crystal

CHU Yibing¹, XIANG Ying^{1*}, ZHANG Wenhui^{1*}, HAO Lugu¹, JIANG Botao¹, CHEN Kai¹,
GAO Yanzi², HU Yongchuan², Michal KOHOUT³

(1. School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083, China;

3. Department of Organic Chemistry, University of Chemistry and Technology Prague, CZ-16628
Prague, Czech Republic)

Abstract: A frequency reconfigurable antenna with a liquid crystal polymer as the dielectric substrate is

收稿日期: 2023-12-10; 修订日期: 2023-12-23.

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52303220); 广东省自然科学基金(No. 2022A1515010777); 广东省科技计划(No. 2022A0505050072)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 52303220); Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 2022A1515010777); Science and Technology Plan of Guangdong Province (No. 2022A0505050072)

*通信联系人, E-mail: xiangy@gdut.edu.cn; zwh83@gdut.edu.cn

designed to realize the impedance matching of the antenna by adjusting the position and size of the patch. A polymer-dispersed liquid crystal film is prepared as the medium of the antenna, and its effect is examined on the basis of various liquid crystal to polymer ratios and film thicknesses. Under the action of an electric field, the formed liquid crystal microdroplets are reoriented and arranged along the direction of the electric field. The frequency reconfigurable antenna is then realized by changing the magnitude of driving voltage. After comparative analysis, it is concluded that the polymer-dispersed liquid crystal film with a liquid crystal content 70% (mass fraction) has the best effect, achieving continuous frequency adjustment of 62 MHz under a driving voltage of 48 V, and the maximum gain of the antenna is 3.5 dBi. This frequency reconfigurable patch antenna based on liquid crystal polymer is simple in structure, small in size, light in weight, and is easy to be integrated into a variety of mobile devices, which has a promising future for development.

Key words: liquid crystal polymer; frequency adjustable; patch antenna

1 引言

随着物联网和5G时代的潮流涌动^[1],移动终端正以前所未有的速度迈向小型化、超薄化和多功能化^[2]。天线作为通信系统中发射、接收信号的接口,在无线通信系统中起着至关重要的作用。在这个融合了信息、通信和智能的时代,设备所需的数量越来越多,平台的负载相应也越来越多,因此搭建天线的成本也就大幅提高。此外,多个天线搭载在一起会产生非常大的电磁干扰,严重影响天线的正常工作。为了减轻平台上所负载的天线重量,降低成本,提高频谱利用率,希望能用一个天线来实现多个天线的功能。传统天线固定的谐振频率和刚性结构无法满足目前的应用需求。可调谐天线具有在不改变自身结构尺寸的前提下获得较宽可用频段特性以及不同谐振频率的能力。这不仅可以满足系统小型化和在不同标准频段下的应用需求,提高频谱利用率,还可以降低无线终端系统的研制复杂度,从而降低通信系统的整体成本并减轻其重量。在当前的5G移动通信领域,需要的带宽更宽,频谱数量更高,越来越需要采用先进的可调谐天线技术来应对不断发展的需求。这些需求包括天线需要更小型、更容易集成,同时还需要能够覆盖多种不同频段。因此,设计多功能、能够适用于多个工作频段范围的可调谐天线变得至关重要^[3-4]。

目前的频率调节技术主要有以下3类:

(1)机械驱动:通过天线上面的开关,例如PIN开关^[5-6]、MEMS开关^[7-8]、场效应晶体管^[9-10]等开关的通断,实现天线工作结构的改变,从而

改变天线上面的电流分布,实现天线的频率可重构功能,但该类型的频率可重构天线存在工作频率不能连续可重构的缺点。

(2)集成电子器件:在天线结构中应用变容二极管^[11-13]。变容二极管的电容值可以通过其两端加载的偏置电压进行控制,通过调节变容二极管两端的偏置电压来调节电容量大小,从而调节天线的工作频率,但在面对电尺寸减小下出现的结构尺寸减小和寄生电流影响时,存在很大的加工难度。

(3)可调材料:通过外加电场调节特定材料的介电常数或透过率从而实现连续频率调节。最常用的可调材料是铁氧体^[14]、铁电体^[15]、半导体^[16-17]。目前这些材料调频的调优方法并未实现高性能和低成本,仍然存在一些材料和设计上的问题。生物聚合物^[18]作为一种可调材料虽然具有良好的柔性和可降解性,可制备柔性电子器件,但它的可降解性导致材料的稳定性、耐久性不佳。液晶材料^[19-22]是一种介于液态和固态之间的具有各向异性的高分子有机材料流体,具有损耗小、驱动电压低等诸多优点,并且能满足低介电常数的要求,其电控特性原理源自材料本身的各向异性,介电常数易于调控、对外场敏感性好,在微波、太赫兹频段都具有良好的物理特性。近些年,液晶材料在微波领域的可调应用受到了广泛关注,有越来越多的论文和研究报告在这方面进行了探讨。例如在天线^[23-24]、移相器^[25-27]、滤波器^[28-29]以及谐振器^[30]中的应用。哈尔滨工业大学的孟繁义教授在2016年所发表的文献^[24]中,仿真和研究了液晶这种新材料并应用在天线阵列上,使液晶层的介电常数(模拟偏置电压)在2.5~3.3

之间变化,在中心频率为 12.5 GHz 的单点频率中实现了 $-21^{\circ}\sim+15^{\circ}$ 的波束方向扫描。2021 年, Xiaoyu Li 等人通过在谐振单元中加载具有延迟线结构的液晶可调谐移相器,实现了对各独立单元反射相位的动态控制^[27]。

由于液晶材料往往呈现出液态,因此封装难度较大,不易进行加工。本文制备了一种聚合物分散液晶薄膜,该薄膜结合了聚合物优异的机械性能和热性能以及液晶的外电场响应特性,具有灵敏度高、响应时间快、制备过程简单等优点。采用的聚合材料解决了传统树脂材料在固化过程中因体积收缩而导致的液晶聚合物膜裂开或者是光电性能失效的问题。通过将该薄膜作为基材设计了一款频率可调微带天线,实现了较大范围的频率调控。由于薄膜是柔性固体,解决了传统液晶天线使用液态液晶封装难度大、成本高的问题。天线结构简单、体积小、质量轻,易于集成在各种移动设备中,在未来无线通信系统中具有广阔的发展前景。

2 柔性介质基板制作

本柔性介质基板所用的聚合物液晶膜使用的液晶为 GPX-6011, 聚合物单体材料由北京科技大学新材料技术研究院合成提供:BA(丙烯酸丁酯, CAS 编号:141-32-2)、BDDA(CAS 编号:1070-70-8)、IBOA(丙烯酸异冰片酯, CAS 编号:5888-33-5)、Irg651(安息香乙二醚, CAS 编号:24650-42-8)按质量比 3:3:9:1 混合制备而成。将液晶与聚合物单体按照一定的比例在常温通过磁力搅拌机均匀混合后,经过光照强度为 $150\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的紫外光曝光 5 min, 单体发生聚合反应,诱导发生相分离,形成微米级液晶微滴,分散在形成的聚合物中。微滴内的液晶分子随机排列,光通过时,微滴会对入射光产生强烈的散射。在此状况下,混合物聚合形成的薄膜呈现乳白色不透明状态,如图 1 左侧图形所示。当加一定的电压后,液晶微滴内的液晶分子会沿着外加电场方向进行统一的取向排列,此时液晶的寻常折射率与聚合物折射率匹配,光可以透过薄膜,因此薄膜呈现清亮透明状态,如图 1 右侧图形所示。

当外电场撤去后,液晶聚合物薄膜又恢复为基态的乳白色不透明状态。因此通过外加电压的

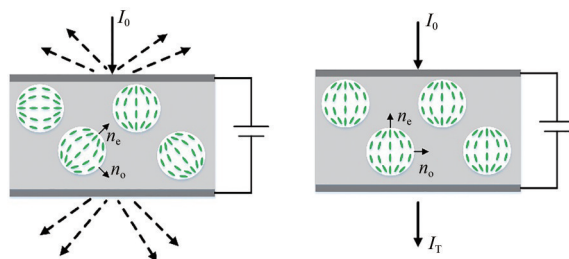


图1 液晶聚合物薄膜的液晶分子取向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of liquid crystal molecule deflection of liquid crystal polymer film

通断可以实现该聚合物薄膜的介电常数连续可调。制作出的乳白色液晶聚合物薄膜如图 2(a) 所示,图 2(b) 为给夹在两片 ITO 导电玻璃中的液晶聚合物薄膜施加电压前,薄膜不透光的状态;图 2(c) 为给夹在两片 ITO 导电玻璃中的液晶聚合物薄膜施加电压后,薄膜呈现清亮透明的状态。

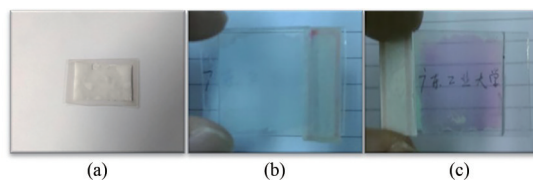


图2 100 μm 厚度、液晶含量(质量分数)为 70% 的聚合物薄膜示意图。(a) 液晶聚合物薄膜;(b) 施加电压前;(c) 施加电压后。

Fig. 2 Schematic diagram of a 100 μm thick polymer film with 70% liquid crystal content (mass fraction). (a) Liquid crystal polymer films; (b) Before voltage applied; (c) After voltage applied.

液晶与单体按 5:5、6:4、7:3 这 3 种配比,分别制备 50 μm 和 100 μm 两种厚度的液晶聚合物薄膜,施加不同大小的电压,在偏光显微镜(POM)下观察在化学聚合过程中,液晶被析出形成富含液晶的微滴大小和分布状态。实验结果表明,液晶含量(质量分数) $\leq 50\%$ 时,液晶分子不易从聚合物中析出,形成的液晶微滴较少,并且液晶颗粒分散,相互远离,液晶聚合物薄膜在视觉上表现为较为透明的状态。随着液晶含量的增加,液晶微滴析出增多,液晶聚合物薄膜在视觉上表现为乳白色不透明状态,给液晶聚合物薄膜施加电压后变透明,对比度逐渐增大。而当液晶含量高于 75% 时,与单体混合搅拌时无法变为澄清透明状态,此外聚合时液晶会无法分散成独立的颗

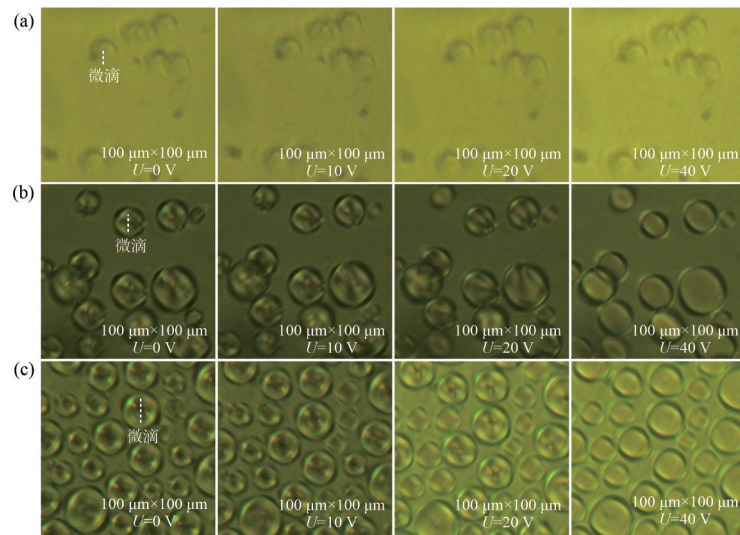


图3 50 μm 厚度的液晶聚合物薄膜在偏光显微镜下的图像。(a) 液晶含量为50%；(b) 液晶含量为60%；(c) 液晶含量为70%。
Fig. 3 Polarizing microscope images of 50 μm thick liquid crystal polymer film. (a) Liquid crystal content 50% (mass fraction); (b) Liquid crystal content 60%; (c) Liquid crystal content 70%.

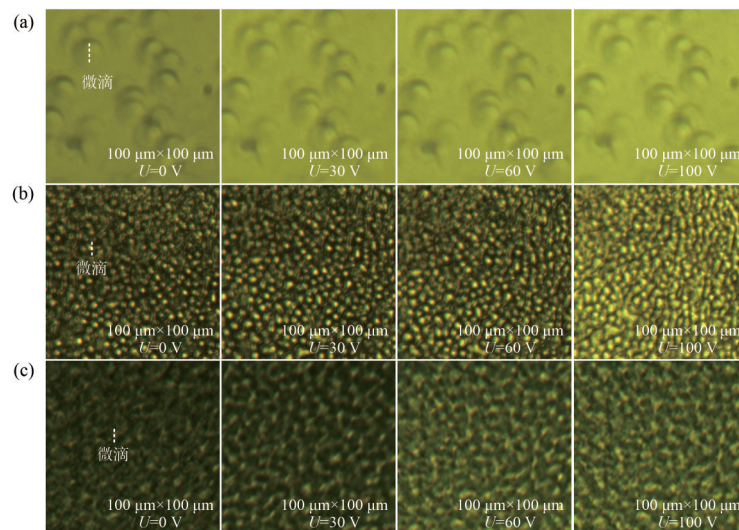


图4 100 μm 厚度的液晶聚合物薄膜在偏光显微镜下的图像。(a) 液晶含量为50%；(b) 液晶含量为60%；(c) 液晶含量为70%。
Fig. 4 Polarizing microscope images of a 100 μm thick liquid crystal polymer film. (a) Liquid crystal content 50%; (b) Liquid crystal content 60%; (c) Liquid crystal content 70%.

粒,互相团聚或是连结成片,聚合效果较差。

实验表明,100 μm 厚的聚合物液晶膜在未被施加电压时透光率较50 μm 厚膜小,由乳白色不透明状态转变为透明状态需要的驱动电压更高。这是由于膜厚越大,垂直于液晶膜表面方向上的液晶微滴越多,液晶微滴的散射效果越强,因此呈现为膜越厚透光率较低。当膜厚较小时,膜内的电场对液晶微滴的作用力较强,液晶分子的指向矢量容易扭转为平行于电场方向,因此变透明需要的电压较小。当膜厚增大时,电场对液晶微滴

的作用力较小,液晶微滴的指向矢不易朝电场方向排列,导致变透明需要的驱动电压较高。

3 天线结构和测试

3.1 天线结构

如图5所示,该3层结构中的基板均采用镀铜FR4基板,最上层板的上表面矩形贴片中间引出一条铜线用于连接SMA接口馈电。中间层矩形框内为液晶聚合物薄膜。第一层板下表面镀尺

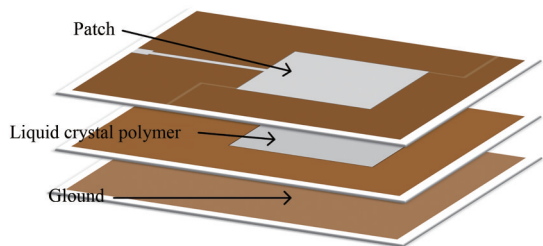


图5 天线的几何结构

Fig. 5 Geometry of patch antenna

寸与矩形槽大小相同的铜,并引出铜线用于外接电源为液晶聚合物薄膜提供高电位。最下层为接地板,该接地板与第二层液晶膜下表面直接接触,为液晶膜提供低电位,与第一层板下表面高电位形成电势差,产生电场,进而通过改变外接偏置电压,实现液晶聚合物的介电常数调控。微带贴片天线的谐振频率计算公式如式(1)所示:

$$f_r = \frac{c}{2l\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1)$$

其中: f_r 表示微带贴片天线的谐振频率, c 表示光速, l 表示微带贴片天线的长度, ϵ_r 表示微带贴片天线的相对介电常数。由此可得,微带贴片天线的谐振频率会随着微带贴片天线的相对介电常数的变化进行改变,因此可以通过调节外接偏置电压使液晶分子的指向矢由杂乱无章状态扭转为平行于电场方向,改变了液晶聚合物薄膜的介电常数,进而控制微带贴片天线的谐振频率产生变化。

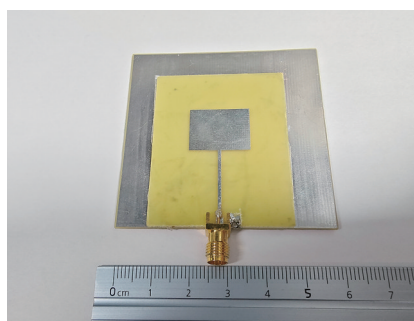


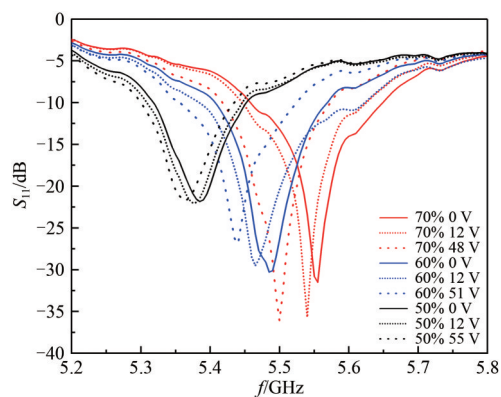
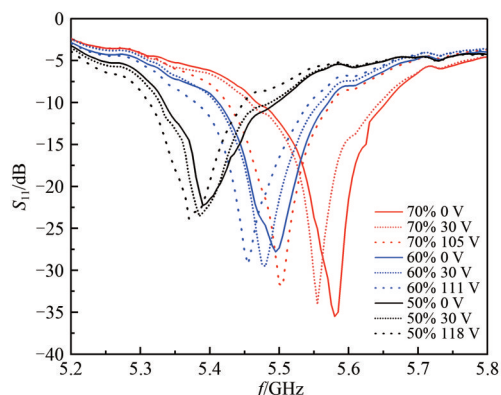
图6 天线实物图

Fig. 6 Antenna physical image

3.2 天线的S参数

通过输入匹配来评估天线性能,分别测试了液晶含量为50%、60%、70%,液晶聚合物薄膜厚度为50 μm 、100 μm 下的天线的回波损耗,以及给天线施加电压下的谐振频率偏移量。使用安

捷伦E5071C矢量网络分析仪进行回波损耗的测量,分别测试厚度为50 μm 、100 μm ,液晶含量分别为70%、60%、50%的液晶聚合物薄膜天线的回波损耗,如图7、图8所示。随着液晶含量的提高,天线谐振频率往高频方向偏移,液晶含量从50%提高到70%时,50 μm 的液晶聚合物薄膜天线谐振频率偏移178 MHz,100 μm 的液晶聚合物薄膜天线谐振频率偏移191 MHz。在施加电压后,天线谐振频率向左偏移,液晶含量越高,谐振频率偏移量越大,加电后的厚度为50 μm 、液晶含量为70%的液晶聚合物薄膜天线谐振频率向左偏移了62 MHz,加电后的厚度为100 μm 、

图7 厚度为50 μm ,液晶含量分别为70%、60%、50%的液晶聚合物薄膜天线的回波损耗。Fig. 7 Antenna return loss of liquid crystal polymer film with thickness of 50 μm , liquid crystal content of 70%, 60%, 50%, respectively.图8 厚度为100 μm ,液晶含量分别为70%、60%、50%的液晶聚合物薄膜天线回波损耗。Fig. 8 Antenna return loss of liquid crystal polymer film with thickness of 100 μm , liquid crystal content of 70%, 60%, 50%, respectively.

液晶含量为 70% 的液晶聚合物薄膜天线谐振频率向左偏移了 72 MHz。不同厚度和液晶含量的液晶聚合物薄膜天线的 -10 dB 阻抗带宽始终大于 130 MHz, 在带宽内的电压驻波比 (VSWR) 均小于 2, 说明天线辐射性良好。

对比 50 μm 、100 μm 厚度的液晶聚合物薄膜天线的性能。如表 1 和表 2 所示, 在施加电压前和施加电压后二者谐振频率相近, 100 μm 厚度的液晶聚合物薄膜天线在施加电压后的谐振频率偏移量稍多一点, 多偏移 10 MHz, 但是基于 100 μm 厚度的液晶聚合物薄膜微带贴片天线需要的驱动电压较基于 50 μm 厚的液晶聚合物薄膜天线高 50 V 以上。

综合对比, 液晶含量为 70%, 厚度为 50 μm

表 1 50 μm 厚度液晶薄膜天线的性能

Tab. 1 Performance of 50 μm thickness liquid crystal thin film antenna

液晶含量/%	谐振频率/GHz	施加电压后频率/GHz	频率偏移量/MHz	驱动电压/V
70	5.558	5.496	62	48
60	5.480	5.441	39	51
50	5.38	5.367	13	55

表 2 100 μm 厚度液晶薄膜天线的性能

Tab. 2 Performance of 100 μm thickness liquid crystal thin film antenna

液晶含量/%	谐振频率/GHz	施加电压后频率/GHz	频率偏移量/MHz	驱动电压/V
70	5.579	5.507	72	105
60	5.495	5.450	45	111
50	5.389	5.372	17	118

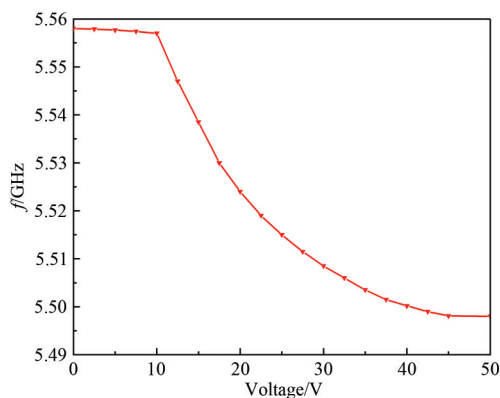


图 9 谐振频率随偏置电压的变化

Fig. 9 Variation of resonant frequency with bias voltage

的基于该液晶聚合物薄膜基材的微带贴片天线具有最佳的效果, 该天线谐振频率为 5.558 GHz, 谐振深度为 -31 dB, 阻抗匹配较好, 在 5.45~5.65 GHz 范围内天线谐振深度在 -10 dB 以下, 带宽为 200 MHz, 施加电压后可以实现 62 MHz 频率连续可调。施加电压后的天线谐振频率随着电压不断增大而变化的图像如图 9 所示。

3.3 动态响应时间

经过对比测试, 液晶含量为 70%、厚度为 50 μm 的基于该液晶聚合物薄膜基材的频率可重构微带贴片天线的效果最佳。我们将天线中的聚合物分散液晶薄膜更换为传统的 E7 液晶, 施加 20 V 的偏置电压, 将两种基材的天线频率偏移的动态响应时间做对比, 如表 3 所示。可以看出, 该液晶聚合物天线相较于传统的以 E7 液晶为介质的天线在施加和撤销电压时可以较大程度地缩短响应时间。

表 3 动态响应时间

Tab. 3 Dynamic response time

天线调谐介质	施加电压响应时间/s	撤销电压响应时间/s
E7	1.7	15
液晶聚合物(含量 70%)	0.8	4

3.4 天线增益方向图

我们测试了该天线的增益方向图, 如图 10 和图 11 所示。图 10 测试的是磁场矢量所在的平面方向图, 图 11 测试的是电场矢量所在的平面方向

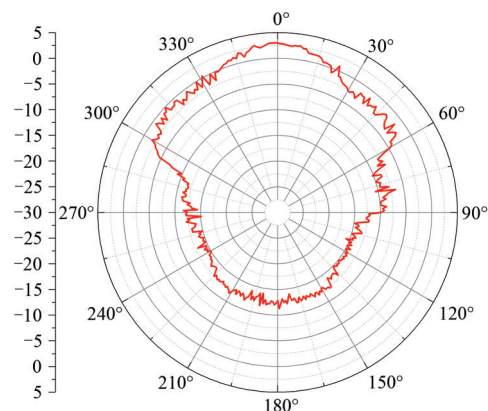


图 10 H 面方向图

Fig. 10 H-plane radiation pattern

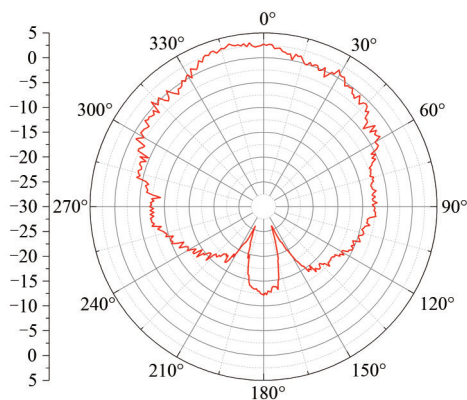


图 11 E面方向图

Fig. 11 E-plane radiation pattern

图。由于暗室测试设备中转台的影响,在 90° 和 270° 之间的辐射能力较弱。天线的最大增益为 3.5 dBi ,总体上辐射特性可以满足频率可重构天线的要求。

4 结 论

本文提出了一种用于频率可调天线的异质基板,阐述了基于液晶聚合物基板的微带贴片天线设计和制造过程,并测试了不同浓度和厚度的基于液晶聚合物薄膜的贴片天线回波损耗,综合分析得出最佳浓度和厚度的液晶聚合物薄膜。液晶含量为 70% ,厚度为 $50\ \mu\text{m}$ 的液晶聚合物薄膜在 $0\sim 48\text{ V}$ 之间的驱动电压下可以实现 62 MHz 连续可调,解决了传统天线频率不可调或不可连续调节的问题。该天线的最大增益为 3.5 dBi ,具有尺寸小、重量轻的优点。该天线使用的液晶聚合物基板是柔性固体,易于封装。基本满足频率可重构天线的要求。该液晶聚合物基板具有柔性,施加偏置电压可以变为透明,在未来的柔性透明天线方面具有良好的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] MALAR K A, GANESH R S. Novel aperture coupled fractal antenna for internet of wearable things (IoWT)[J]. *Measurement: Sensors*, 2022, 24: 100533.
- [2] 姜菲,陈益. 一种双频段集成多功能天线[J]. *无线通信技术*, 2023, 32(1): 20-24.
JIANG F, CHEN Y. A dual-band integrated multi-function antenna [J]. *Wireless Communication Technology*, 2023, 32(1): 20-24. (in Chinese)
- [3] JIN P, ZIOLKOWSKI R W. Broadband, efficient, electrically small metamaterial-inspired antennas facilitated by active near-field resonant parasitic elements [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(2): 318-327.
- [4] WONG H, LUK K M, CHAN C H, *et al.* Small antennas in wireless communications [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(7): 2109-2121.
- [5] THAO H P, VAN SON T, VAN DOAI N, *et al.* A novel frequency reconfigurable monopole antenna using PIN Diode for WLAN/WiMAX applications [C]. 2015 International Conference on Communications, Management and Telecommunications. Danang, Vietnam: IEEE, 2015: 167-171.
- [6] QIN P Y, GUO Y J, WEILY A R, *et al.* A pattern reconfigurable U-slot antenna and its applications in MIMO systems [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 60(2): 516-28.
- [7] SIEW E, CHAN K Y, CAI Y, *et al.* RF MEMS-integrated frequency reconfigurable Quasi-Yagi folded dipole antenna [C]. Asia-Pacific Microwave Conference 2011. Melbourne, VIC, Australia: IEEE, 2011: 558-561.
- [8] ZOHUR A., MOPIDEVI H., RODRIGO D, *et al.* RF MEMS reconfigurable two-band antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 72-75.
- [9] FARZANEH S, SEBAK A R. Microwave sampling beam former-proto type verification and switch design [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(1): 36-44.
- [10] HINSZ L, BRAATEN B D. A frequency reconfigurable transmitter antenna with autonomous switching capabilities [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(7): 3809-3813.
- [11] SAM S, LIM S. Compact frequency-reconfigurable half-mode substrate-integrated waveguide antenna [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2013, 12: 951-954.
- [12] ABOUFOUL T, ALOMAINY A, PARINI C. Reconfiguring UWB monopole antenna for cognitive radio applications using GaAs FET switches [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 392-394.
- [13] YANG X L, LIN J C, CHEN G, *et al.* Frequency reconfigurable antenna for wireless communications using GaAs FET switch [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, 14: 807-810.
- [14] DIXIT L, POURUSH P K S. Radiation characteristics of switchable ferrite microstrip array antenna [J]. *IEE*

- Proceedings-Microwaves, Antennas and Propagation*, 2000, 147(2): 151-155.
- [15] JIANG H, PATTERSON M, BROWN D, *et al.* Miniaturized and reconfigurable CPW square-ring slot antenna loaded with ferroelectric BST thin film varactors [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2012, 60(7): 3111-3119.
- [16] PERRUISSEAU-CARRIER J, TAMAGNONE M, GOMEZ-DIAZ J S, *et al.* Resonant and leaky-wave reconfigurable antennas based on graphene plasmonics [C]. 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). Orlando: IEEE, 2013:136-137.
- [17] 夏昉,高诗语,许子英,等. 中国石墨烯行业发展现状与趋势预测[J]. *应用化学*, 2023, 40(12):1737-1740.
XIA F, GAO S Y, XU Z Y, *et al.* China graphene industry development status and trend forecast [J] *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(12): 1737-1740. (in Chinese)
- [18] AGA P S JR, TELEK B A, LOMBARDI III J P, *et al.* Dielectric tunability of DNA biopolymer films with varying amounts of hexadecyl trimethyl ammonium chloride [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(3): 463-469.
- [19] ZHAO X, ZHOU J, LI J, *et al.* Spontaneous helielectric nematic liquid crystals: Electric analog to helimagnets [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2021, 118(42): e2111101118.
- [20] SLUCKIN T J. The liquid crystal phases: physics and technology [J]. *Contemporary Physics*, 2000, 41(1): 37-56.
- [21] PAPANICOLAOUN C, CHRISTOU M A, POLYCARPOU A C. Frequency-agile microstrip patch antenna on a biased liquid crystal substrate [J]. *Electronics Letters*, 2015, 51(3): 202-204.
- [22] POLYCARPOU A C, CHRISTOU M A, PAPANICOLAOU N C. tunable patch antenna printed on a biased nematic liquid crystal cell [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(10): 4980-4987.
- [23] LIU L, LANGLEY R J. Liquid crystal tunable microstrip patch antenna [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(20): 1179-1181.
- [24] MA S, YANG G H, MENG F Y, *et al.* Electrically tunable array antenna with beam steering from backfire to endfire based on liquid crystal miniaturized phase shifter [C]. 2016 IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). Miami:IEEE, 2016.
- [25] DOLFI D, LABEYRIE M, JOFFRE P, *et al.* Liquid crystal microwave phase shifter [J]. *Electronics Letters*, 1993, 29(10): 926-928.
- [26] GOELDEN F, GAEBLER A, GOEBEL M, *et al.* Tunable liquid crystal phase shifter for microwave frequencies [J]. *Electronics Letters*, 2009, 45(13): 686-687.
- [27] LI X Y, WAN Y L, LIU J, *et al.* Broadband electronically scanned reflectarray antenna with liquid crystals [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2021, 20(3): 396-400.
- [28] GOELDEN F, GAEBLER A, KARABEY O, *et al.* Tunable band-pass filter based on liquid crystal [C]. German Microwave Conference Digest of Papers. Berlin:IEEE, 2010: 98-101.
- [29] FRITZSCH C, BILDIK S, JAKOBY R. Ka-band frequency tunable patch antenna [C]//*Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*. Chicago: IEEE, 2012: 1-2.
- [30] YAGHMAEE P, FUMEAUX C, BATES B, *et al.* Frequency tunable S-band resonator using nematic liquid crystal [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(13): 798-800.

作者简介:



储怡冰,男,硕士研究生,2021年于广东工业大学获得学士学位,主要从事液晶微波器件的制备和研究。E-mail: 1875566130@qq.com



张文慧,女,硕士,讲师,2007年于南京邮电大学获得硕士学位,主要从事数据通信及光纤通信方面的研究。E-mail: zwh83@gdut.edu.cn



项 颖,男,博士,教授,2000年于中山大学获得博士学位,主要从事液晶非线性光学和流体效应方面的研究。E-mail: xiangy@gdut.edu.cn