

# 基于缺陷地慢波传输线结构的液晶移相器设计

李梓玲<sup>1</sup>, 冯 燕<sup>1</sup>, 司马博羽<sup>1</sup>, 许恒飞<sup>2</sup>, 王志诚<sup>3</sup>, 吴 文<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京, 210094; 2. 南京工程学院信息与通信工程学院, 南京, 211167;  
3. 上海无线电设备研究所, 上海, 200438)

**摘要** 为了实现低插损、大相位覆盖范围的加载缺陷地结构(DGS)的微带线液晶移相器, 利用 HFSS 仿真软件对 DGS 微带线液晶移相器进行建模和仿真, 通过改变 DGS 的形状来改变单个移相单元的色散特性, 提升单个单元的移相能力, 从而减少移相单元的使用数量, 降低移相器传输线整体插损。以哑铃型 DGS 的液晶微带线移相器作为参考标准, 比较了 5 种形状的 DGS(哑铃型、减少 DGS 面积、一阶分形、三角形、交叉型)的移相能力和插损差异。仿真结果表明: 下一阶分形和交叉型 DGS 微带线液晶移相器移相能力较好, 最后对不同介电常数的移相器进行仿具观察其 S 参数和移相能力, 进一步验证了这一结果。

**关键词** 缺陷地结构; 液晶; 移相器; 色散; S 参数

**DOI** 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.02.015

**中图分类号** TN623; TN823 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)02-0123-05

## A Microstrip Line Liquid Crystal Phase Shifter Based on Defective Ground Structure Slow Wave Structure

LI Ziling<sup>1</sup>, FENG Yan<sup>1</sup>, SIMA Boyu<sup>1</sup>, XU Hengfei<sup>2</sup>, WANG Zhicheng<sup>3</sup>, WU Wen<sup>1</sup>

(1. School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Information and Communication Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 3. Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200438, China)

**Abstract** In order to make a microstrip line liquid crystal phase shifter loaded with defective ground structure (DGS) good in performance, small in insertion loss, suitable in return loss, and larger in phase coverage, the DGS microstrip line liquid crystal phase shifter is modeled and simulated by utilizing HFSS simulation software for changing the phase shifting capability of a single phase shifting unit and changing the shape of the DGS, achieving the same performance with fewer phase shifting units. Taking a dumbbell DGS liquid crystal microstrip line phase shifter as a reference, the differences in phase shifting capability and insertion loss of five shapes of DGS (dumbbell, reduced DGS area, first-order fractal, triangular, and crossover) are compared. The first-order fractal and crossover DGS microstrip line liquid crystal phase shifters show that the phase shifting is good in capability in comparison, and finally the results are verified by simulating phase shifters with different dielectric constants to observe their S-parameters and phase

**收稿日期**: 2023-06-03

**基金项目**: 国家自然科学基金(62101262, 62201262)

**作者简介**: 李梓玲(1999-), 女, 江西九江人, 硕士生, 研究方向为液晶天线。E-mail: 2312524043@qq.com

**通信作者**: 司马博羽(1987-), 男, 江苏无锡人, 讲师, 博士, 研究方向为电磁场与微波技术。E-mail: smby@njst.edu.cn

**引用格式**: 李梓玲, 冯燕, 司马博羽, 等. 基于缺陷地慢波传输线结构的液晶移相器设计[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(2): 123-127. LI Ziling, FENG Yan, SIMA Boyu, et al. A Microstrip Line Liquid Crystal Phase Shifter Based on Defective Ground Structure Slow Wave Structure[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(2): 123-127.

shifting capability.

**Key words** defective ground structure (DGS); liquid crystal; phase shifter; dispersion; S-parameter

针对液晶的相对介电常数会随着液晶分子取向的变化而变化的现象,研究人员研制了一种可以从外部控制微波和毫米波传输线传输特性的设备——液晶移相器<sup>[1]</sup>。液晶移相器是利用液晶分子的光学特性来实现相位调制的器件。在偏置电压作用下,液晶分子指向发生偏转,等效介电常数随之变化。与在小型化微带传输线中广泛应用的 L-MSL 相比,DGS-MSL 具有损耗小、SW 范围更广和品质因数高等优点。此外,DGS-MSL 的电极宽度比 L-MSL 宽,这提高了它的功率处理能力并且降低了制造公差,尤其是在薄膜和高频应用中<sup>[2]</sup>。

近些年缺陷地结构(defective ground structure,DGS)在微波毫米波领域的迅速发展和应用。除了哑铃型 DGS 基础结构,Lim 等在 2002 年还提出了螺旋型 DGS<sup>[3]</sup>。这种结构在传统哑铃型 DGS 两侧的矩形结构上加工出螺旋的形状,通过这种方法可以提高等效电路中的有效电感,降低衰减极点的频率,并且不再具有哑铃型的单极点带阻特性,可以在窄频带内具有更高的频率选择性,应用也要更加广泛<sup>[4]</sup>。另外,在 2009 年付树洪等将分形天线概念引入到 DGS 结构中,得到 Minkowski 分型哑铃 DGS,它对相同谐振频率时 DGS 的尺寸可以随之缩减,对微带电路的空间面积利用率提高<sup>[5]</sup>。

色散代表的是不同频率波的传播特性不同,即移相不同。在我们所实现的加载缺陷地结构的液晶移相器基础上,为了实现器件的小型化,进一步减小移相器的长度,我们可以通过改变移相器的色散特性,使移相器在同一工作频率下移相更多,能够在整体器件移相不变的情况下使用更少的移相单元,从而达到移相器整体尺寸的缩减。

然而,为了优化加载 DGS 液晶微带线移相器的色散同时保证相对的插损,使得整个模型在一定程度上实现小型化、低插损和高相位覆盖,提高此移相器在实际工作中应用价值,应该仔细选择 DGS 蚀刻的形状。

在本文中,首先尝试哑铃型 DGS、减少 DGS 面积、三角形 DGS、一阶分形 DGS 和交叉型 DGS 5 种形状的 DGS 的液晶微带线移相器进行了全面的比较。以哑铃型 DGS 作为参考,比较 5 种形状的色散和插损,发现一阶分形 DGS 和交叉型 DGS 得到的色散明显降低且插损改变在合理范围内。于是进一步研究在不同液晶介电常数下,哑铃型 DGS、一阶分形 DGS 和交叉型 DGS 液晶微带线移相器的

插损。

## 1 DGS 结构设计

在物理科学和电气工程中,色散关系描述波在介质中传播的色散现象的性质,将波的波长或波数与其频率建立了联系。色散的原因可能是几何边界条件或是波与传输介质间的相互作用。基本粒子即使在没有集合约束和其他介质存在下也会有非平凡的色散关系。

当不同波长的平面表现出不同的传播速度时,色散就会发生,如此造成混合各种波长的波包渐渐地在空间中扩展开来。

平面波的速率  $v$  为波长  $\lambda$  的函数:

$$v = v(\lambda) \quad (1)$$

波速、波长、频率  $f$  之间具有恒等式:

$$v(\lambda) = \lambda f(\lambda) \quad (2)$$

式中: $f(\lambda)$ 为该介质中的色散关系。色散关系中更常用角频率来表示,根据  $\omega = 2\pi f$  或者  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,上述公式可以表示为:

$$\omega(k) = v(k)k \quad (3)$$

式中: $\omega$ 为  $k$  的函数, $\omega(k)$ 为描述色散关系的标准写法,相速度  $\omega/k$  与群速度  $\frac{\partial \omega}{\partial k}$  可以更简便地在此色散关系中求得。因此所关注的平面波可以表示为:

$$A(x, t) = A_0 e^{2\pi i(x - vt)/\lambda} = A_0 e^{i(kx - \omega t)} \quad (4)$$

式中: $A$ 为波的振幅。

由以上表达式可得相位为:

$$\varphi = kx - \omega t \quad (5)$$

同一工作频率下的相位差为:

$$\Delta\varphi = k \Delta x \quad (6)$$

式中:波数  $k$  的物理意义为单位长度上的弧度,指平面波。

相位常数  $\beta$  为传播常数的虚部,表示传输线上传播的电磁波单位长度上的相位变化量。与  $k$  表达的是同一物理意义,只是指代的对象不同。而对一般有耗媒质,不再提波数  $k$ ,只定义有耗媒质的复传播常数,所以相位差公式可以代替为:

$$\Delta\varphi = \beta \Delta x \quad (7)$$

综上所述,在研究色散曲线时,实际研究的是波数和频率之间的关系,根据理论可以知道,对于传输线而言,波数与相位常数相统一,可转换为研究相位

常数与频率的关系。在 HFSS 仿真中,无法直接把相位常数作为变量,所以根据式(7),可将自变量转换为设置相对平面的相位差,通过设置不同相位差得到的谐振频率来得到相位差与频率的关系,从而得到表征电磁结构色散特性的布里渊图。

图 1 分别为哑铃型 DGS、减少 DGS 面积、一阶分形 DGS、三角形 DGS 和交叉型 DGS 微带线液晶移相器的三维模型和主视图。图 2 为 67 个单元的液晶微带线移相器模型图。

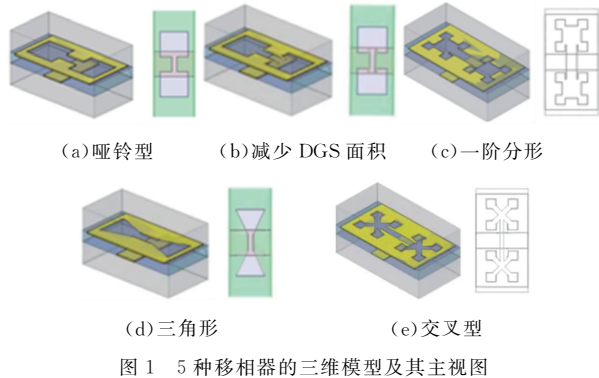


图 1 5 种移相器的三维模型及其主视图

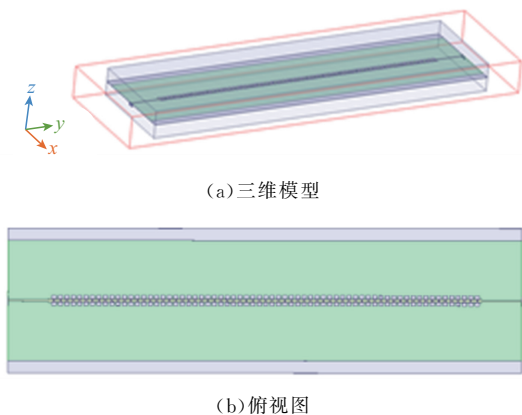


图 2 67 个单元 DGS 的液晶移相器模型

图 1 中单元结构的上下两层用玻璃作为顶部和底部基板,其相对介电常数为 5.5,紧挨下层玻璃的是金属微带线,上层玻璃下方的是不同形状的 DGS,最中间填充的是液晶层,其介电常数为 3.6,介电损耗正切为 0.01。

## 2 HFSS 仿真

使用 HFSS 软件,在 30~40 GHz 范围内中心频率为 35 GHz 对模型进行仿真。仿真分 2 步:第 1 步对单元结构进行仿真,设置主从边界用来模拟周期结构,还需要设置两边界之间的相移,即相位差,仿真得到其色散曲线,仿真结果见图 3;第 2 步对共有 67 个单元的 DGS 的液晶微带线移相器进行仿真,在 30~40 GHz 以 0.1 间隔扫描,波端口激励,得到它们的 S 参数,所得结果见图 4。

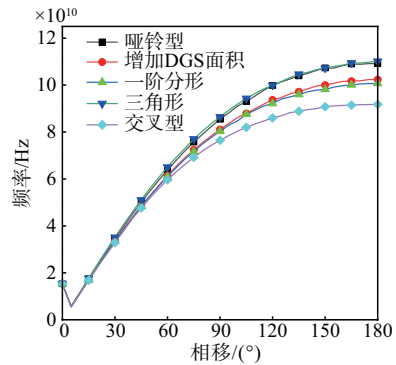
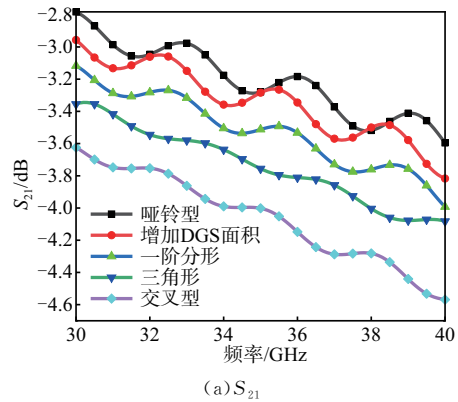
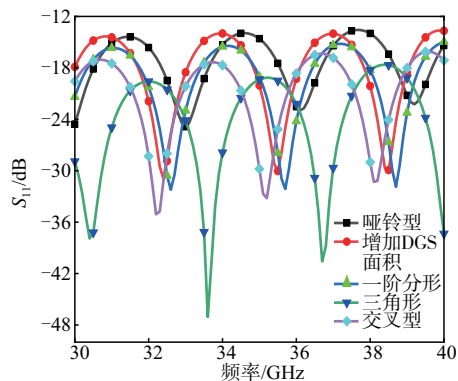


图 3 色散曲线



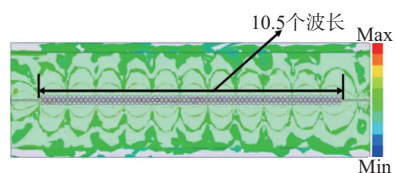
(a)  $S_{21}$



(b)  $S_{11}$

图 4 移相器 S 参数

当 DGS 液晶移相器在 35 GHz 工作时,以哑铃型 DGS 作为参考,比较 5 种液晶移相器的色散曲线和 S 参数。从上述仿真结果可以看出三角形 DGS 移相器的色散比哑铃型 DGS 移相器还要高,因此不作继续研究;减少 DGS 面积和一阶分形 DGS 色散降低,且降低数值相差不大,考虑到减少 DGS 面积工艺更加复杂,于是只对一阶分形移相器继续研究;交叉型 DGS 移相器色散曲线对比哑铃型 DGS 移相器的色散有显著下降,故对其继续研究。进一步观察哑铃型、一阶分形、交叉型 DGS 移相器的电场分布情况,如图 5 所示。



(a) 哑铃型

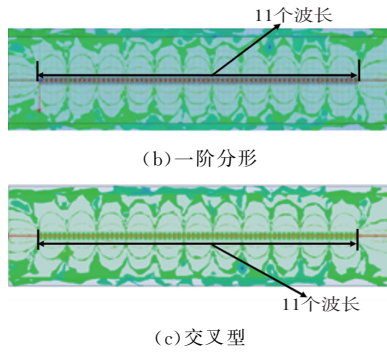


图 5 不同液晶移相器的电场分布

由 3 种移相器的电场分布可以发现,对于移相性能,67 个单元的哑铃型移相器有 10.5 个波长,一阶分形和交叉型移相器有 11 个波长,比哑铃型移相器多 0.5 个波长。于是,在达到相同效果下,一阶分形和交叉型移相器的尺寸能够做到更小。一阶分形和交叉型移相器的移相能力都比哑铃型移相器的移相能力好。于是进一步研究在不同的液晶介电常数的情况下,哑铃型 DGS、一阶分形 DGS 和交叉型 DGS 液晶微带线移相器的 S 参数和移相情况,相对介电常数  $\epsilon$  为 2.35~3.6。仿真结果如图 6~图 11 所示。

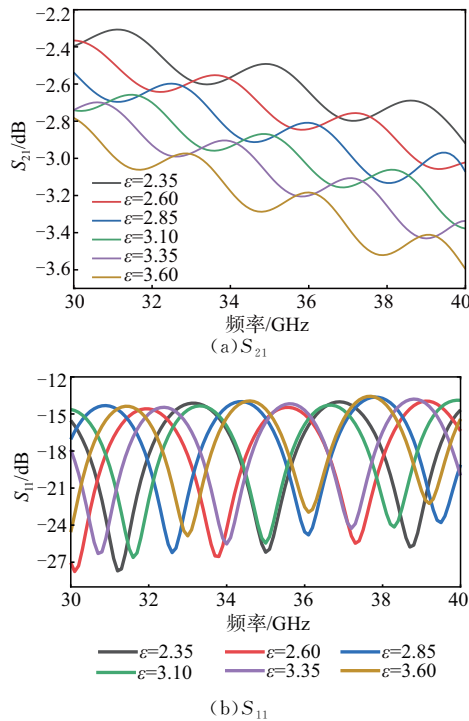


图 6 哑铃型 DGS 不同相对介电常数的 S 参数

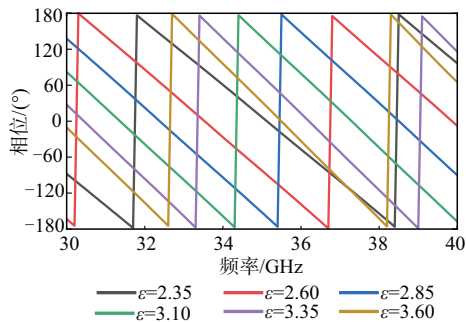


图 7 哑铃型 DGS 不同相对介电常数下相位随频率的变化

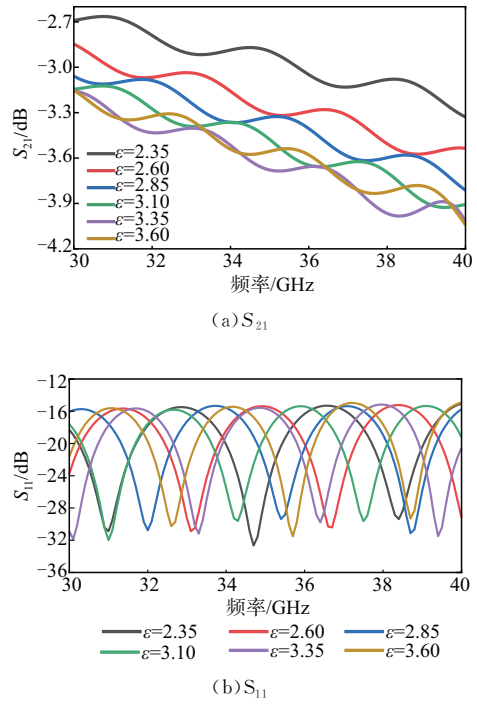


图 8 一阶分型 DGS 不同相对介电常数的 S 参数

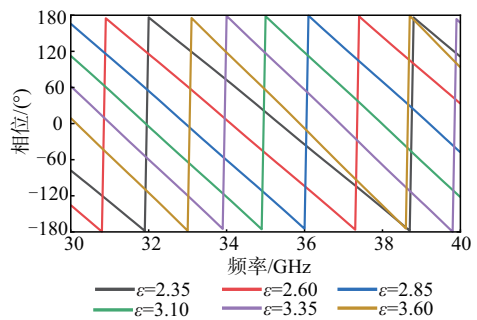


图 9 一阶分型 DGS 不同相对介电常数下相位随频率的变化

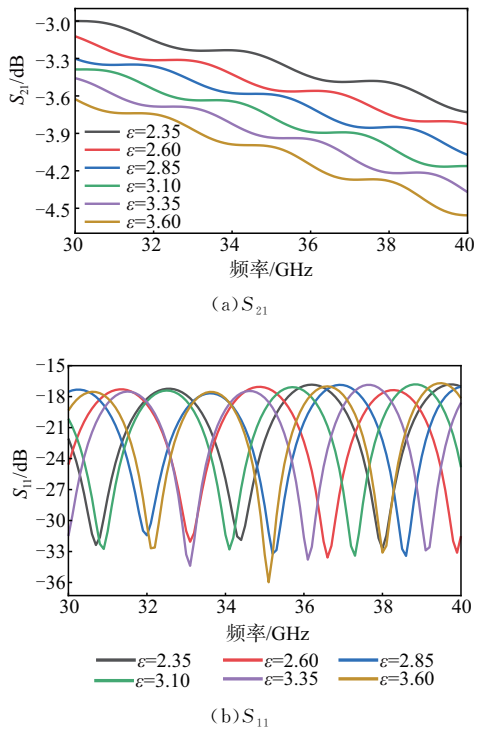


图 10 交叉型 DGS 不同相对介电常数下的 S 参数

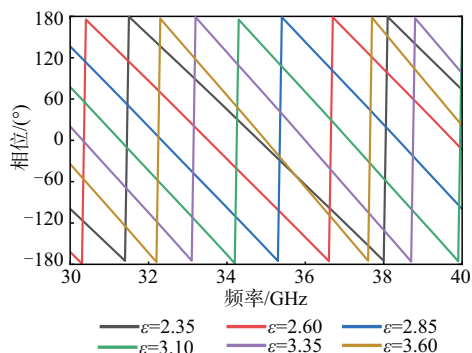


图 11 交叉型 DGS 不同相对介电常数下相位随频率的变化

由上述仿真的结果可以发现,在不同介电常数液晶情况下,哑铃型、一阶分形和交叉型微带线液晶移相器的移相能力都能有  $360^\circ$  ( $-180^\circ \sim 180^\circ$ );在工作频率 35 GHz 下,3 种移相器的回波损耗  $S_{11}$  都小于  $-15$  dB,一阶分形和交叉型的插损  $S_{21}$  都有所降低。因此,可以验证前面所说的一阶分形和交叉型移相器色散降低是可靠的。

### 3 结语

本文提出了 5 种形状的 DGS 微带线液晶移相器,通过 HFSS 仿真得到各个移相器的色散曲线和  $S$  参数。对仿真结果进行分析发现,一阶分形和交叉型微带线移相器在显著降低色散的同时插损也保持在一定的范围,能够实现在减少移相器的长度同时还能达到相同的效果。

#### 参考文献

[1] 朱立. 基于液晶材料的电控天线阵[D]. 成都:电子科技大学,2021.

[2] WANG D, POLAT E, TESMER H, et al. Highly Miniaturized Continuously Tunable Phase Shifter Based on Liquid Crystal and Defected Ground Structures[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2022, 32(6): 519-522.

[3] KIM C S, LIM J S, NAM S, et al. The Equivalent Circuit Modeling of Defected Ground Structure with Spiral Shape[J]. 2002 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2002(3): 2125-2128.

[4] 魏巍. 用于无线通信的夹叉型和 DGS 结构微波滤波器设计[D]. 北京:北京邮电大学,2011.

[5] 付树洪,童创明. 一种分形 DGS 单元结构设计及其在微带电路中的应用[J]. 空间电子技术, 2009, 6(1): 73-78.

[6] FRANC A L, KARABEY O H, REHDER G, et al. Compact and Broadband Millimeter-Wave Electrically Tunable Phase Shifter Combining Slow-Wave Effect with Liquid Crystal Technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 2013, 61(11): 3905-3915

[7] BULJA S, MIRSHEKAR-SYAHKAL D, JAMES R, et al. Measurement of Dielectric Properties of Nematic Liquid Crystals at Millimeter Wavelength [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(12): 3493-3501.

[8] LIM J S, LEE Y T, KIM C S, et al. A Vertically Periodic Defected Ground Structure and Its Application in Reducing the Size of Microwave Circuits[J]. Microwave & Wireless Components Letters IEEE, 2002, 12(12): 479-481.

[9] KIM C S, PARK J S, AHN D, et al. A Novel 1-D Periodic Defected Ground Structure for Planar Circuits [J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters, 2000, 10(4): 131-133.

[10] KARABEY O H, GOELDEN F, GAEBLER A, et al. Tunable Loaded Line Phase Shifters for Microwave Applications[C]// 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Baltimore, MD: IEEE, 2011: 1-4.

[11] BULJA S, MIRSHEKAR-SYAHKAL D, JAMES R, et al. Measurement of Dielectric Properties of Nematic Liquid Crystals at Millimeter Wavelength[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(12): 3493-3501.

[12] YANG D K, WU S T. Fundamentals of Liquid Crystal Devices [M]. New York: John Wiley & Sons, 2006: 33-36.

[13] FRITZSCH C, GIACOMOZZI F, KARABEY O H, et al. Advanced Characterization of a W-band Phase Shifter Based on Liquid Crystals and MEMS Technology [J]. International Journal of Microwave And Wireless Technologies, 2012, 4(3): 379-386.

[14] DEO P, MIRSHEKAR-SYAHKAL D, SEDDON L, et al. Microstrip Device for Broadband (15-65 GHz) Measurement of Dielectric Properties of Nematic Liquid Crystals[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(4): 1388-1398.

[15] WANG D W, POLAT E, TESMER H, et al. A Compact and Fast  $1 \times 4$  Continuously Steerable End-Fire Phased-Array Antenna Based on Liquid Crystal [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(10): 1859-1862.

[16] WANG D, POLAT E, TESMER H, et al. Wideband Evaluation of Two Types of Slow-Wave Microstrip Lines[J]. Electronics Letters, 2022, 58(4): 156-158.

[17] JAKOBY R, GAEBLER A, WEICKHMANN C. Microwave Liquid Crystal Enabling Technology for Electronically Steerable Antennas in SATCOM and 5G Millimeter-Wave Systems [J]. Crystals, 2020, 10(6): 514.

(编辑:徐楠楠)