2017年4月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2017)02-0187-05

太赫兹液晶反射阵列移相单元的设计与分析

葛 忆^a,夏天雨^b,杨 军^b,邓光晟^b,尹治平^b,桑 磊^a

(合肥工业大学 a.计算机与信息学院; b.光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘 要:为了满足高增益天线大的移相度和可工作在太赫兹频段,设计了一种基于液晶的双 偶极子反射移相单元结构。采用液晶的等效介电常数模型,在频率为335~345 GHz频段均产生360° 以上的相移,在342 GHz实现最大相移390°。为了减小液晶不均匀性对相移产生的影响,建立了单 元的精确模型,该模型在频率范围为330~338 GHz时均产生了250°以上的相移,在336 GHz实现最 大相移285°。与均匀液晶等效介电常数模型相比,产生最大相移的频率点发生了变化,并且产生 了最大为105°的移相差值,这在相控反射阵列天线的设计中是不可忽略的。

关键词:反射阵列;双偶极子;液晶;太赫兹;移相单元 **中图分类号:** TN823 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201702.0187

Design and analysis of Liquid Crystal-based reflectarray phase shifting cells in THz band

GE Yi^a, XIA Tianyu^b, YANG Jun^b, DENG Guangcheng^b, YIN Zhiping^b, SANG Lei^a (a.School of Computer and Information; b.Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei Anhui 230009, China)

Abstract: In order to make the high-gain antenna have a large phase shift and can work in the THz band, a reflectarray element based on Liquid Crystals(LC) is designed to operate in the frequency range from 270 GHz to 390 GHz. When the phases of reflectarray element are calculated with a constant value of the permittivity, the elements produce a dynamic phase range above 360° in 335–345 GHz, and achieve the maximum 390° at 342 GHz. Then, in order to reduce the influence of liquid crystal inhomogeneity on the phase shifting, an accurate model of liquid crystal-based reflectarray cells is established. The accurate modeling produces a dynamic phase range above 250° in 330–338 GHz, and achieves the maximum 285° at 336 GHz. Compared with the equivalent permittivity modeling, the accurate modeling has a maximum phase error of 105°, which cannot be ignored in the reconfigurable reflectarray antennas design.

Keywords: reflectarray; double dipole; Liquid Crystals(LC); terahertz; phase shifting cells

近年来,可调相控反射阵列天线越来越受研究者和设计人员的关注,相对于传统的相控阵天线而言,它具有 相对较低的成本,易于加工且物理尺寸小。若干电控设备(如 PIN 二极管、变容二极管)和微机电系统(Micro-Electro Mechanical Systems, MEMS)已经被用于设计可调相控反射阵列单元^[1-2],但是这些设备在毫米波和亚毫米波波段 有较高的寄生效应,不适合用于 100 GHz 以上的频段。

液晶是一种介于固态和液态之间的物质,具有双折射特性,通过施加在液晶盒上的电场或磁场的调制可以实现液晶双折射率的变化,目前已经被广泛用于可见光波段,在平面显示领域的应用研究已经比较成熟。液晶材料 在更长的波段内仍然保持着相当强的介电各向异性,可以由外加电场来调制其电磁特性,为在电磁波段工作的液 晶调制器件的研制提供了相应的材料基础。由于液晶具有成熟的工业技术基础,同时对电场比较敏感以及比较大 的双折射特性,能方便地通过改变外加电场或磁场实现谐调功能,使其在太赫兹领域有着广泛的应用前景,越来 越多地应用于电控移相器^[3-4]、滤波器^[5]、频率选择性表面^[6]和可重构反射阵列天线^[7-9]。

目前,设计液晶反射阵列移相单元时,都是把液晶材料看成是均匀同质的,使用液晶的等效介电常数进行分析,然而事实上,由于上层基板下表面的贴片不能完全覆盖单元表面,外加电压时,电场分布将会不均匀,从而

导致液晶分子定向的不均匀性,使得液晶的等效介电常数发生改变;另外,当外加电压时,液晶材料的各向异性 也会增大。作为可重构反射阵列天线的主要组成部分,反射阵列移相单元性能的好坏将直接影响天线的性能。如 果在电磁仿真中,不考虑液晶的不均匀性和各向异性,在计算反射场的相位时将会产生一些误差,这将会影响反 射阵列天线的性能。G. Pere-Palomino等提出了一种液晶相控反射阵列单元的精确电磁场模型^[10-11],对液晶进行 不均匀性分割,将其分成若干的小块区域,每个小块区域都被认为是各向同性且均匀分布的。该团队先后对 90~110 GHz 单偶极子反射阵列单元和 90~120 GHz 三偶极子反射阵列单元的不均匀性和各向异性进行了分析,移 相差值分别大于 60°和 100°。

本文首先设计了工作于 340 GHz 的一种基于液晶的双偶极子反射移相控制单元,采用液晶的等效介电常数 进行仿真分析,然后又采用精确模型法对双偶极子模型进行精确建模,修正等效介电常数模型的结果,将等效介 电常数模型和精确模型的仿真结果进行比较分析。

1 设计原理

1.1 液晶反射移相单元的移相原理

利用液晶材料介电常数电控可调的性质来实现对反射电磁波相位的控制。当反射阵列单元金属贴片外加偏置 电场时,金属贴片与接地板之间会形成电场,造成液晶分子的排列方向会随着电压的大小变化而有序改变,使得 液晶材料的等效介电常数发生改变,从而改变单元中贴片的谐振频率,进而发生相移的变化。

图 1 是一个基于液晶的双偶极子反射阵列移相单元结构,该反射阵列单元由石英晶片、印刷电路、聚合物涂 层、液晶材料和金属接地板构成。2 个石英板之间的间隙构成了液晶盒,其距离就是液晶的厚度;当在印刷电路 上施加电压时,它和金属接地板之间就会形成电场,该电场将影响液晶分子的排列方向,液晶分子的排列方向随 电场大小而改变,当偏置电压大于某一门限电压 U_{th}后,则液晶分子排列方向垂直于基板平面,此时液晶层的等 效介电常数为 ε_{//}。当未在印刷电路上施加外加电压时(偏置电压为 0 V),上层基板下表面的和下层基板上表面的

聚合物涂层将会约束液晶分子, 聚合物涂层可使液晶分子在无偏 置电压的情况下分子的取向平行 于石英基板,此时液晶的介电常 数为 ε_{\perp} ,该聚合物涂层非常薄, 对电磁场基本无影响;当外加偏 置电压在 0 V 与 $U_{\rm th}$ 之间变化,液 晶层的等效介电常数也在 ε_{\perp} 和 $\varepsilon_{//}$ 之间变化,从而改变贴片的谐振频 率,达到移相目的。

1.2 液晶材料不均匀性原理

当未加电压时,液晶分子定 向在聚合物涂层的约束下是均匀 分布的,因此不具有不均匀性; 当外加电压时,由于贴片不能完 全覆盖单元表面,电场分布不均 匀造成了液晶分子定向的不均 匀,从而导致液晶具有不均匀性。 对于一个周期环境,静电场的分 布不仅与外加电压有关,而且与 贴片之间的间隔大小有关。如果







Fig.2 Structure of the reflectarray unit cell with the bias voltage under a polarizing microscope 图 2 加电后偏光显微镜下的反射单元结构

贴片之间的间隔足够大,贴片之间的电容耦合效应可忽略不计。反之,如果间隔较小,则耦合效应较为显著。不加电,不产生不均匀性。事实上,为了获得所需相移,基于液晶的反射阵列的每个单元都被施加不同的电压值,每个单元上的静电场的改变都是由施加在该单元和相邻单元上的电压值共同作用的结果,这将导致液晶层的不均匀性。图2是反射阵列单元加电后在偏光显微镜下的照片,可以看出液晶分子取向是不均匀的。

2 双偶极子液晶反射阵列单元设计

第2期

由于没有精确地分析表达式去设计反射阵列单元,设计人员可根据以下2个设计准则逐个优化参数,得到满 足设计要求的单元尺寸:a)反射阵列单元贴片的长度增加,其谐振频率将会降低,贴片长度大小可用来调整谐 振频率,使设计获得需要的谐振频率;贴片的宽度大小对谐振频率有很细微的影响,基板厚度与贴片宽度产生相 同的影响。b)液晶基板宽度减小,动态移相范围将增大,但损耗也将会增加,此准则可用来获得所需要的移相 范围。

仿真时使用液晶参考文献[8]中的液晶材料 GT3-23001 设置介电常数,将未加电时液晶的介电常数记为 ε_{\perp} ,加电后液晶的介电常数记为 $\varepsilon_{//}$,则介电常数和损耗正切值分别设置为: $\varepsilon_{//}=2.47$,tan $\delta_{//}=0.03$, $\varepsilon_{\perp}=3.26$,tan $\delta_{\perp}=0.02$,石英基板的介电常数和损耗正切值分别为 $\varepsilon_{rs}=3.78$ 和 tan $\delta_{s}=0.002$;贴片被印刷在上层石英基板的下表面,材料为铜,厚度为 500 nm,电导率设置为 $\sigma=5.8\times10^7$ 。根据上述准则对各参数进行优化,经过优化后模型尺寸数据为: $L_{x1}=35 \ \mu m, L_{y2}=203 \ \mu m, L_{y2}=215 \ \mu m, P_x=420 \ \mu m, P_x=35 \ \mu m, h_{lc}=35 \ \mu m, h_{s}=360 \ \mu m, D=80 \ \mu m$ 。

数值计算中将液晶基板介电常数 2 个极端值状态,看成是 2 个不同介电常数均匀同质的不同物质分别进行仿 真,从而可得出反射移相单元的特性。图 3 是双偶极子单元结构的移相特性曲线,从仿真结果可以看出该单元结 构在 335~345 GHz 范围内均实现了 360°以上的移相范围,其中在 342 GHz 时移相度达到最大,为 390°,最大损 耗为–15 dB。



图 3 反射阵列移相单元反射系数的幅值和相位

3 考虑液晶材料各向异性与不均匀性模型设计

目前对液晶微波器件的研究一般是把液晶当成是均匀的、各项同性的材料进行仿真分析,其介电常数在 2 个极端值 *ε*_⊥和 *ε*_{//}之间变化。但是构成谐振单元的导体贴片不能完全覆盖单元表面的结构,加电后的静电场和 RF 场将会有 3 个矢量分量,这将产生 2 个方面的影响:一方面由于液晶分子不能被均匀定向,将使液晶材料具有不 均匀性;另一方面还增加了液晶各向异性的影响。如果在电磁场模拟时不考虑液晶的不均匀性和各向异性的影响, 计算反射场的相位将产生一些误差。根据 G. Pere-Palomino 等的精确电磁场模型,对该结构液晶取向的不均匀性 和各向异性的影响进行分析,接下来的设计中将采用精确模型法对结构进行仿真,进而与等效介电常数模型法比 较分析。

1) 考虑各向异性

仿真分析时,将液晶材料类型设置为各向异性。聚合物涂层使分子定向在 x 方向,因此 2 个极端状态的介电 常数张量值分别为^[11]:

$$\overline{\overline{\varepsilon}}_{\perp} = \overline{\overline{\varepsilon}} \left(U = 0 \right) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{//} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\perp} \end{pmatrix}$$
(1)

$$\overline{\overline{\varepsilon}}_{I/I} = \overline{\overline{\varepsilon}} \left(U >> U_{\text{th}} \right) = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{I/I} \end{pmatrix}$$
(2)

为了分析液晶不均匀性的影响,将液晶分成近似可看作是均匀同 质材料的若干小块,为了简化模型,此处只考虑 x(或 y)轴上的不均匀 性,分区域块模型见图 4。RR 区域由于离偶极子比较远,可近似看 成是未加电状态,即此处介电常数可近似认为是 ε₁,因此是均匀区域; BR 区域由于是处于 2 个偶极子下面和偶极子之间的区域,且两偶极 子的间距不大,因此可看成是电压达到饱和时的状态,故也是均匀区 域; R_i(*i*=1,2,3,4)被认为是不均匀区域,因此建模时需将其分成若干小 的区域块,每个子区域块可看成是液晶分子均匀分布。





4 仿真结果分析

图 5 为精确模型端口反射系数的幅值与相位特性曲线。由图 5(a)可以看出:相比等效介电常数模型,当考 虑各向异性与不均匀性的精确模型,介电常数 ε₁=3.26 时,反射系数的谐振频率增加;介电常数 ε_{//}=2.47 时,反 射系数的谐振频率减小。从仿真结果还可以看出该单元结构在 330~338 GHz 范围内都实现了 250°以上的移相范 围,其中 336 GHz 的移相度最大,为 285°。等效介电常数反射阵列单元模型产生的最大移相度为 390°。可见, 当在导电贴片和接地板之间逐渐加大电压,使其达到饱和状态时,由液晶的各向异性和不均匀性产生的移相差值 达到 105°,而且产生最大移相度的频率点也会改变,这将会影响反射移相器在反射阵列天线设计应用中的性能。



Fig.5 Amplitude and phase of reflection coefficient for reflectarray cell with and without inhomogeneity and the anisotropy 图 5 考虑不均匀性和各向异性与未考虑不均匀性和各向异性反射系数的幅值和相位

5 结论

本文设计了一种基于液晶的双偶极子太赫兹频段反射移相控制单元,仿真获得了随液晶介电常数变化的反射 电磁波相位和幅度的曲线。采用液晶的均匀等效介电常数时,在频率范围为 335~345 GHz 时,均产生了 360°以 上的相移,在 342 GHz 实现最大相移 390°,最大损耗为-15 dB,该移相单元可以满足相控反射阵列天线的要求。 但在实际中外加偏置电场时,液晶不仅会产生不均匀性,各向异性也会增大,不得不考虑由各向异性和不均匀性 产生的移相差值。通过建立双偶极子液晶反射阵列单元的精确模型及计算分析,该精确模型在频率为 330~ 338 GHz 时均实现 250°以上的移相,在 336 GHz 实现最大相移 285°。与均匀液晶等效介电常数模型相比,精确 模型最大相移的频率点发生了变化,并且产生了最大为 105°的移相差值,这在相控反射阵列天线的设计中是不 可忽略的。

参考文献:

- [1] BARBA M,CARRASCO E,PAGE J E,et al. Electronic controllable reflect array elements in X band[J]. Journal of RF-Engineering and Telecommunications, 2007,61(9/10):203-206.
- [2] PERRUISSEAU-CARRIER J,SKRIVERVIK A K. Monolithic MEMS-based reflect array cell digitally reconfigurable over a 360° phase range[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2008,56(7):138-141.

- [3] BULJA S,MIRSHEKAR-SYAHKAL D,YAZDANPANAHI M,et al. Liquid crystal based phase shifters in 60 GHz band[C]// The 3rd European Wireless Technology Conference. [S.l.]:IEEE, 2010:37-40.
- [4] 杜亦佳,苏伟. 太赫兹移相器研究现状[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(4):496-500. (DU Yijia,SU Wei. Research status of terahertz phase shifter[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(4):496-500.)
- [5] LAN Y,XU Y H,WANG C S,et al. X-band flexible bandpass filter based on ultra-thin liquid crystal polymer substrate[J]. Electronics Letters, 2015,51(4):345-346.
- [6] DICKIE R,BAINE P,CAHILL R,et al. Electrical characterisation of liquid crystals at millimetre wavelengths using frequency selective surfaces[J]. Electronics Letters, 2012,48(11):611-612.
- [7] HU W F,CAHILL R,ENCINAR J A,et al. Design and measurement of reconfigurable millimeter wave reflect array cells with nematic liquid crystal[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008,56(10):3112-3117.
- [8] PEREZ-PALOMINO G, ENCINAR J A, DICKIE R, et al. Preliminary design of a liquid crystal-based reflect array antenna for beam-scanning in THz[J]. Antennas and Propagation Society International Symposium(APUSURSI), 2013:2277-2278.
- [9] BILDIK S,DIETER S,FRITZSCH C,et al. Reconfigurable folded reflectarray antenna based upon liquid crystal technology antennas and propagation[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015,63(1):122-132.
- [10] PEREZ-PALOMINO G,Florencio R,Encinar J A,et al. Accurate and efficient modeling to calculate the voltage dependence of liquid crystal-based reflect array cells[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014,62(5):2659-2668.
- [11] PEREZ-PALOMINO G, Encinar J A, BARBA M. Accurate electromagnetic modeling of liquid crystal cells for reconfigurable reflect arrays[C]// Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation(EUCAP). Rome, Italy:[s.n.], 2011:997-1001.

作者简介:

第2期



葛 忆(1990-),女,安徽省阜阳市人,在 读硕士研究生,主要研究方向为基于液晶的太 赫兹反射移相器.email:735195415@qq.com. 夏天雨(1992-),男,合肥市人,在读硕士研 究生,主要研究方向为器件测试.

杨 军(1978-),男,安徽省淮南市人,副 研究员,硕士生导师,主要研究方向为毫米波太 赫兹器件.

尹治平(1980-),男,湖南省常宁市人,副研 究员,主要研究方向为微波成像技术、微带无源 器件和天线.

邓光晟(1982-),男,重庆市人,博士,助理研究员,主 要研究方向为太赫兹真空电子器件.

桑 磊(1983-),男,合肥市人,博士,副教授,硕士生 导师,主要研究方向为射频电路与天线.