

文章编号: 2095-4980(2017)05-0793-05

一种 C 波段压控超材料表面

周 礼, 杨 春, 何晓阳

(中国工程物理研究院 电子工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 提出了一种 C 波段透射率可调的压控超材料表面。该超材料表面由加载变容二极管的新型可调超材料单元构成, 通过直流偏置电压控制变容二极管的电容值, 调节超材料单元的电磁特性。通过仿真并计算超材料单元的散射系数、等效介电常数和等效磁导率, 该单元的可调谐振频段为 5.2~5.6 GHz。将压控超材料表面与微带天线相结合, 超材料表面透射率可改变天线远场辐射方向图, 通过其对远场辐射方向图的调节, 验证了可调超材料表面的性能。对设计的压控超材料表面加 0.5~10 V 的直流偏置电压, 该超材料表面工作频率为 5.4 GHz, 其透射率能有效调节 20 dB。

关键词: C 波段; 变容二极管; 透射率; 可调超材料

中图分类号: TN04

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201705.0793

A C-band voltage controlled metamaterial surface

ZHOU Li, YANG Chun, HE Xiaoyang

(Institute of Electronics Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: A C-band transmittance adjustable voltage controlled metamaterial surface is proposed. The metamaterial surface is composed of novel adjustable metamaterial units with varactor diodes. By adjusting the DC bias voltage, the capacitance value of the varactor diode is changed so that the electromagnetic properties of the metamaterial unit are adjusted. In this paper, the scattering parameters, effective permittivity and effective permeability of the metamaterial unit are simulated and calculated. The metamaterial unit is designed to resonate from 5.2 GHz to 5.6 GHz. In order to verify the property of the designed metamaterial unit, the voltage controlled metamaterial surface is adopted in adjusting the far-field radiation pattern of a microstrip antenna. The DC bias voltage of 0.5 V to 10 V is applied to the designed voltage controlled metamaterial surface operating at 5.4 GHz, and the transmittance changes about 20 dB by changing voltage.

Keywords: C-band; varactor diode; transmittance; tunable metamaterial

自 20 世纪末 Pendry 提出由金属棒与开口谐振环复合构成具有负介电常数和负磁导率的超材料^[1]以来, 超材料得到广泛关注和研究, 其在负折射、超级透镜、电磁隐身和亚波长成像等方面有很好的应用前景^[2-6]。然而, 超材料的电磁特性受其谐振结构固定的局限^[7-8]。为了使超材料电磁特性可调节, 在无源超材料单元结构上加载有源控制机制(如二极管、液晶、半导体), 构成电磁特性可调控的有源超材料^[9-13]。可调控的超材料构成折射率可调透镜, 运用于可重构天线和扫描天线系统中, 相对于复杂的微波馈电网络和移相器, 其结构更加简化^[14-15]。本文提出了一种新型压控超材料单元, 构建了 C 波段压控超材料表面, 并对其进行了建模和仿真验证, 为可重构天线、可调电磁屏蔽、可调电磁探测窗口和可调微波功分器等提供了新的思路。

1 压控超材料设计

1.1 压控超材料单元设计

本文提出的新型压控超材料单元如图 1(a)所示。此单元为双层谐振结构, 正反面结构尺寸相同, 共加载 4 个变容二极管, 正(反)面的 2 个变容二极管有相同偏置电压。此单元中谐振结构的物理特性可基于环形开口谐振

收稿日期: 2016-12-14; 修回日期: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61302047)

器^[1]和双层 I 形谐振单元^[16]进行理论分析。谐振结构中的方形双开口谐振环具有负磁导率特性,其谐振特性可通过变容二极管调节。单元整体谐振结构类似 I 型谐振单元,因此响应电磁波的电场沿 X 轴方向,磁场沿 Y 轴方向,波矢沿 Z 轴方向。

压控超材料单元受响应电磁波照射并加直流偏置电压时,双层谐振单元的等效电路如图 1(b)所示,单元正(反)面结构的等效电感记为 L ,正反面之间的等效电容记为 C_1 。

正面 2 个变容二极管分别记为 C_{v1}, C_{v2} , 由于外加相同偏置电压,电容值相同, $C_{v1}=C_{v2}$ 。同理,反面 2 个变容二极管分别记为 C_{v3}, C_{v4} , 且 $C_{v3}=C_{v4}$ 。单元的谐振频率表示为:

$$f = 1 / \left(2\pi \sqrt{\frac{4LC_1C_{v1}C_{v3}}{C_1(C_{v1} + C_{v3}) + 4C_{v1}C_{v3}}} \right) \quad (1)$$

谐振频率 f 随 C_{v1} 与 C_{v3} 的升高而降低。因此,提出的压控超材料单元可通过变容二极管上的偏置电压调节。

1.2 压控超材料表面设计

基于提出的压控超材料单元,构建了压控超材料表面,如图 2 所示。此超材料表面包含 64 个单元,共 8 行,每行 8 个单元间相互连接,同一行内超材料单元共用一直流偏置电压。若对每行加载相同偏置电压,超材料表面等效为均匀介质;若加不同电压,则等效为非均匀介质。

2 压控超材料仿真

2.1 压控超材料单元仿真与计算

压控超材料单元仿真模型的正视图和详细尺寸如图 3 所示。此单元结构的周期长度为 10 mm,介质板采用 RogersDuroid 5880,厚度 1 mm,介电常数 2.2。变容二极管选择 Philips 公司的 BB143 型变容二极管,该型号变容二极管尺寸小,可工作在 C 波段,在 0.5~10 V 直流偏置电压下,其电容在 6.5~1.5 pF 范围内变化。使用 ANSYS-HFSS 仿真软件对超材料单元建模时,采用 4 个集总参数电容(C_{v1}, C_{v2}, C_{v3} 和 C_{v4})代表 BB143 型变容二极管。

进行全波仿真与分析时,入射电磁波波矢量 \mathbf{K} 沿 Z 轴方向,电场方向沿 X 轴方向,磁场方向沿 Y 轴方向,二极管由离散变化的电容代替,电容 C_{v1}, C_{v2}, C_{v3} 和 C_{v4} 的变化范围均设置为 2~6 pF,同时设置 $C_{v1}=C_{v2}$, $C_{v3}=C_{v4}$ 。边界条件的设置:沿 X 轴方向的平面设置电边界,沿 Y 轴方向的平面设置磁边界,沿 Z 轴方向的平面设置波端口,端口阻抗为自由空间波阻抗 376.7 Ω 。

超材料单元的等效介电常数(ϵ)和等效磁导率(μ)根据等效本构参数反演算法^[17],表示为:

$$\epsilon = n / z; \mu = nz \quad (2)$$

$$n = \frac{1}{kd} \left[\pm \arccos \left(\frac{1 - S_{11}^2 + S_{21}^2}{2S_{21}} \right) + 2m\pi \right] \quad (3)$$

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (4)$$

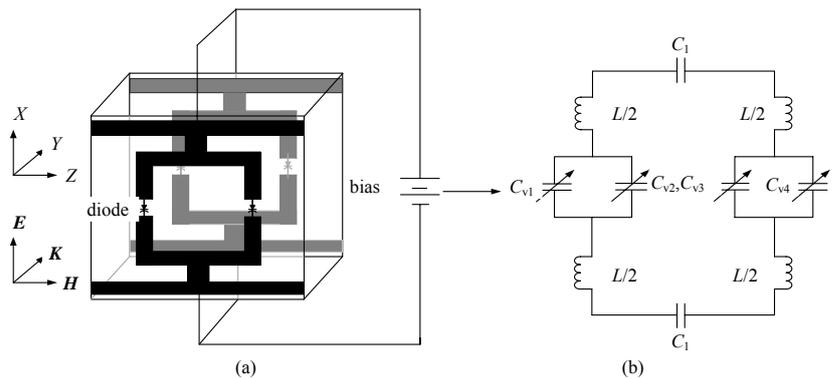


Fig.1 (a) voltage-controlled metamaterial unit; (b) resonant circuit
图 1 (a) 压控超材料单元; (b) 谐振电路

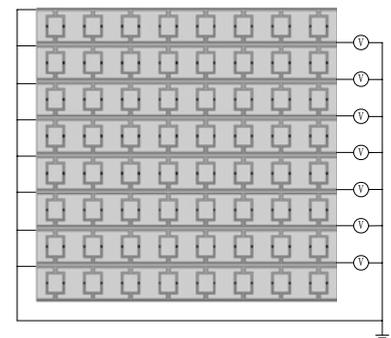


Fig.2 Voltage-controlled metamaterial surface
图 2 压控超材料表面

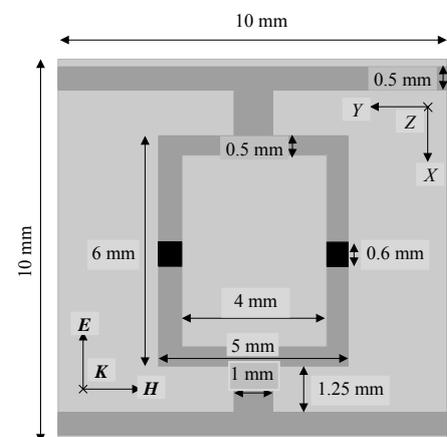


Fig.3 Metamaterial unit
图 3 超材料单元

式(2)~式(4)中: n 为折射率; z 为阻抗; k 为传播常数; d 为单元周期尺寸; S_{11} 为反射参数; S_{21} 为传输参数。由式(2)~式(4)计算得到超材料单元的等效介电常数 ϵ 和等效磁导率 μ 。

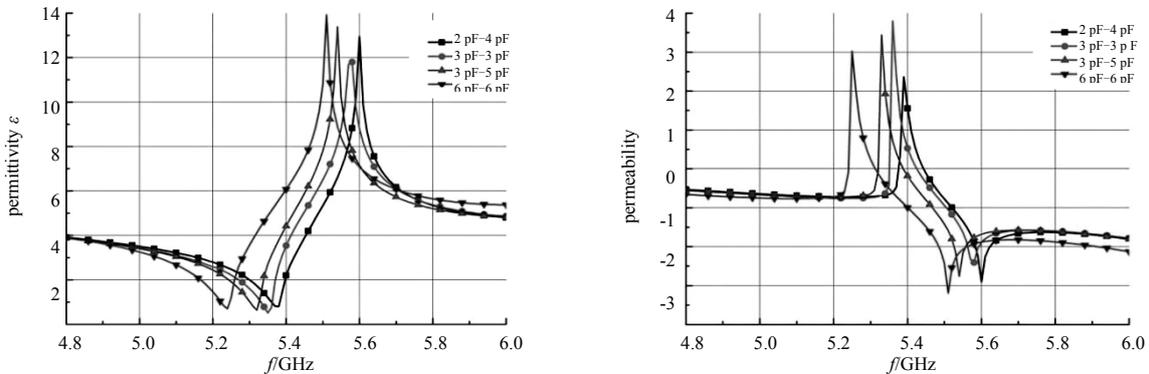


Fig.4 Effective permeability and effective permittivity
图 4 等效磁导率和等效介电常数

如图 4 所示,超材料单元正面电容设置为 $C_{v1}=C_{v2}=2$ pF,反面电容设置为 $C_{v3}=C_{v4}=4$ pF 时,记为曲线 2 pF-4 pF。由于超材料单元结构的谐振特性,其等效介电常数在 5.2~5.6 GHz 区域附近有谐振变化,数值先逐渐升高,再逐渐降低;等效磁导率在 5.2~5.6 GHz 区域内,数值先从负值突变为正值,再逐渐降低为负值。相应的 S_{21} 参数曲线如图 5 所示,在 5.2~5.4 GHz 区域内,有“通带”随电容设置的变化而偏移,在此“通带”区域内的等效磁导率 μ 和等效介电常数 ϵ 均为正值。在 5.4~5.6 GHz 区域内,随着介电常数的逐渐升高,磁导率逐渐降低为负值, S_{21} 参数曲线逐渐降低,呈现为“阻带”。对于 5.4 GHz 频率附近,超材料单元透射率可通过电容变化实现近 20 dB 的有效调节。

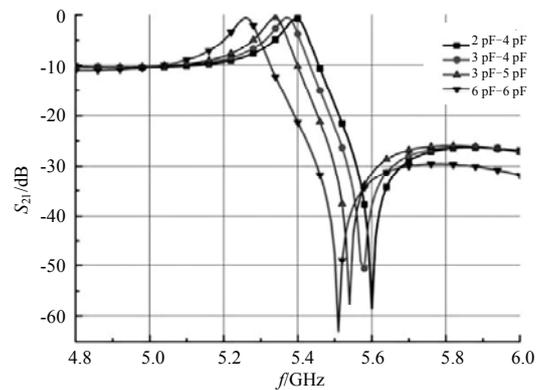


Fig.5 S_{21} parameters of metamaterial unit
图 5 超材料单元 S_{21} 参数

2.2 压控超材料表面仿真

由于在 5.4 GHz 频率附近,超材料单元的透射率可通过电容变化实现最有效的调节,在压控超材料表面的仿真过程中,借助微带天线,辐射 5.4 GHz 电磁波照射超材料表面。超材料表面与微带天线相距约为半波长 30 mm,在 ANSYS-HFSS 仿真软件中建立的模型如图 6 所示。微带天线金属贴片尺寸为 17.6 mm×22.1 mm,介质板为 RogersDuroid 5880,厚度 1 mm,介电常数 2.2,工作频率 5.4 GHz,其 S_{11} 参数如图 7 所示。

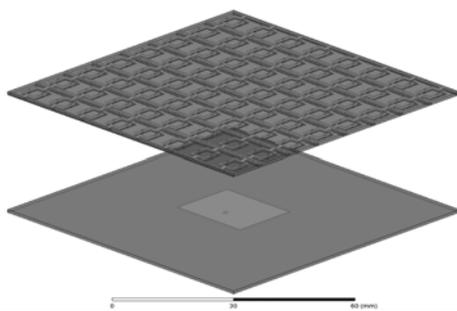


Fig.6 Metamaterial surface and microstrip antenna model
图 6 超材料表面与微带天线模型

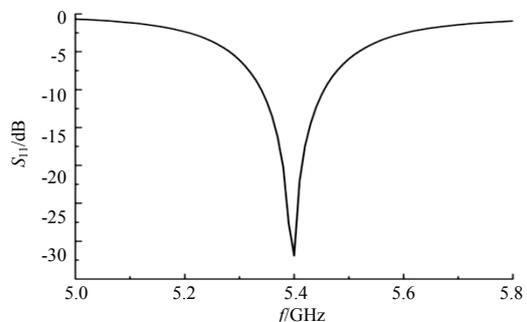


Fig.7 S_{11} parameters of microstrip antenna
图 7 微带天线 S_{11} 参数

进行全波仿真时,可调超材料表面受微带天线产生的 5.4 GHz 电磁波照射,设置电容在 2~6 pF 范围内离散

变化,得到图 8 所示的远场辐射方向图。正面电容为 2 pF,反面电容为 4 pF 时(图中曲线 2 pF-4 pF),方向图主瓣增益最大,为 13.96 dB;正反两面电容同为 6 pF 时(图中曲线 6 pF-6 pF),方向图主瓣增益最小,为-6.65 dB。4 种电容设置(2 pF-4 pF,3 pF-3 pF,3 pF-5 pF 和 6 pF-6 pF)对辐射方向图有明显调节。将可调超材料单元 S_{21} 参数的变化量 Δ_1 与可调超材料表面远场辐射方向图增益变化量 Δ_2 进行对比,如表 1 所示。电容设置变化时,超材料表面远场辐射方向图增益可调近 20 dB,与超材料单元的透射率调节量基本相同。验证了压控超材料表面的透射率可调节性能,以及压控超材料单元设计的正确性。

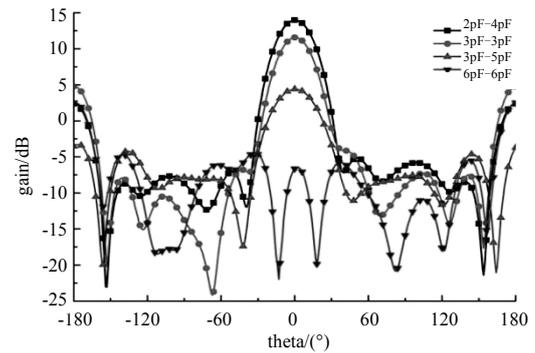


Fig.8 Far-field radiation pattern
图 8 远场辐射方向图

表 1 仿真参数对比

Table1 Simulation parameters comparison

front capacitance-back capacitance (pF-pF)	metamaterial unit S_{21} parameters/dB	metamaterial surface pattern main lobe gain/dB	variation of the S_{21} parameter Δ_1 /dB	variation of the main lobe gain Δ_2 /dB
2-4	-0.75	13.96	-	-
3-3	-3.45	11.45	-2.70	-2.51
3-5	-10.29	4.40	-9.54	-9.56
6-6	-21.28	-6.65	-20.53	-20.61

3 结论

本文设计了一种由新型 C 波段压控超材料单元构成的透射率可调超材料表面。通过理论分析、仿真建模以及数值计算,对比验证了压控超材料单元设计的正确性。此压控超材料表面工作频率为 5.4 GHz,透射率能有效调节 20 dB,为可重构天线、可调电磁屏蔽、可调电磁探测窗口和可调微波功分器等方面提供了新的思路。

参考文献:

- [1] PENDRY J B,HOLDEN A J,ROBBINS D J,et al. Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1999,47(11):2075-2084.
- [2] PENDRY J B. Negative refraction makes a perfect lens[J]. Physical Review Letters, 2000,85(18):3966-3969.
- [3] PENDRY J B,SCHURIG D,SMITH D R. Controlling electromagnetic fields[J]. Science, 2006,312(5781):1780-1782.
- [4] SCHURIG D,MOCK J J,JUSTICE B J,et al. Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies[J]. Science, 2006, 314(5801):977-980.
- [5] CHEN H S,WU B I,ZHANG B L,et al. Electromagnetic wave interactions with a metamaterial cloak[J]. Physical Review Letters, 2007,99(6):063903.
- [6] CHEN H T,PADILLAL W J,ZIDE J M O,et al. Active terahertz metamaterial devices[J]. Nature, 2006,444(30):597-600.
- [7] TRETYAKOV S,MASLOVSKI S. Veselago materials:what is possible and impossible about the dispersion of the constitutive parameters[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2007,49(1):37-43.
- [8] TRETYAKOV S,MASLOVSKI S,SOCHAVA A,et al. The influence of complex material coverings on the quality factor of simple radiating systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005,53(3):965-970.
- [9] ZARGHOONI B,DADGARPOUR A,DENIDNI T A. Reconfigurable metamaterial dipole antenna[C]// 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Memphis,TN,USA:IEEE, 2014:537-538.
- [10] KAPITANOVA P V,SLOBOZHANYUK A P,BELOV P A,et al. Microwave metamaterials with competing light-controllable nonlinear response[C]// 2013 European Microwave Conference. Nuremberg,Germany:IEEE, 2013:533-536.
- [11] KOWERDZIEJ R,PARKA J,OLIFIERCZUK M,et al. Simulation of tunable metamaterial with nematic liquid crystal layers[C]// 2012 19th International Conference on Microwaves Radar & Wireless Communications. Warsaw,Poland:IEEE, 2012:343-345.
- [12] 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 and Wireless Propagation Letters, 2014,13(4):1581-1584.
- [13] FAN K,ZHAO X,ZHANG J,et al. Flexible and tunable metamaterials at terahertz frequencies[C]// the 17th International Conference on Solid-State Sensors,Actuators and Microsystems. Barcelona,Spain:IEEE, 2013:2225-2228.

- [14] YU H,DING X,WU Q,et al. Broadband two-dimensional planar Luneburg lens composed of gradient index metamaterials[C]// 2014 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Memphis,TN,USA:IEEE, 2014:773-774.
- [15] AGHANEJAD I,ABIRI H,YAHAGHI A. Design of high-gain lens antenna by gradient-index metamaterials using transformation optics[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2012,60(9):4074-4081.
- [16] WANG D X,RAN L X,CHEN H S,et al. Active left-handed material collaborated with microwave varactors[J]. Applied Physics Letters, 2007,91(16):77.
- [17] SMITH D R,SCHULTZ S,MARKOS P,et al. Determination of effective permittivity and permeability of metamaterials from reflection and transmission coefficients[J]. Physical Review B, 2002,65(19):195104-1-195104-5.

作者简介:



周 礼(1992-),男,四川省绵阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为超材料研究、电磁场与微波技术.email:zhouli0073@163.com.

杨 春(1973-),男,陕西省宝鸡市人,博士,研究员,主要研究方向为电磁场与微波技术.

何晓阳(1983-),男,湖北省咸宁市人,博士,副研究员,主要研究领域为共形天线、太赫兹技术等.

第九届中国卫星导航学术年会(CSNC2018)征文通知(第1号通知)

中国卫星导航学术年会(China Satellite Navigation Conference, CSNC)是一个开放的学术交流平台。旨在加强学术创新,促进卫星导航系统的合作与交流;加强技术创新,促进卫星导航系统的工程建设;加强理论创新,促进卫星导航理论进步;加强应用创新,促进卫星导航产业的科学发展。第九届中国卫星导航学术年会将由中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心主办。会议于2018年5月在中国哈尔滨召开,涵盖学术交流、高端论坛、展览展示和科学普及等内容,欢迎国内外广大科技工作者及各界人士积极参加并向会议投稿。

一、征文议题

S01 卫星导航应用技术; S02 导航与位置服务; S03 卫星导航信号及抗干扰技术; S04 卫星轨道与钟差; S05 精密定位技术; S06 时空基准与时频技术; S07 卫星导航增强技术; S08 测试评估技术; S09 用户终端技术; S10 多源融合导航技术; S11 PNT 新概念、新方法及新技术; S12 政策法规、标准化及知识产权

二、征文要求

1. 来稿未曾公开发表过,且内容不超出12个大会议题范畴,具备真实性和原创性。论文摘要及全文请勿涉及国家秘密,提交时须出具单位非涉密证明。文责自负。
2. 凡投稿论文被录用且未作特殊声明者,视为已同意授权出版。
3. 论文摘要及全文请登录会议网站“论文提交”系统进行提交,不接受邮件方式投稿,提交全文前必须先提交摘要。摘要为中英文双语,要求字数在400~600字之间,包括研究背景、方法、目的和结果等。全文要求中英文版本同时提交,中英文全文模板和非涉密证明模板请从年会网站(<http://www.beidou.org>)下载区下载,中文全文不超过5页,英文全文不超过10页。
4. 摘要提交截止时间:2017年10月31日
5. 全文提交时间:2017年11月1日—12月1日
6. 录用通知发放时间:2018年1月初

三、论文出版

1. 本届年会优秀论文(英文)将在施普林格(Springer)知名丛书《Lecture Notes in Electronic Engineering》中结集出版,并被EI检索。
2. 年会也推荐部分优秀论文(英文)至《Advances in Space Research》期刊发表,被SCI检索。推荐至《Advances in Space Research》中的优秀论文将不同时推荐至年会EI论文集收录。
3. 年会收录的论文将制作光盘出版,并录入中国知网(CNKI)中国重要会议论文全文数据库和万方数据支持服务平台。

四、联系方式 电话/传真: +86 10 82178658/82178034 会议网址: <http://www.beidou.org> (请留意本网站最新消息) 电子邮箱: csnclw@beidou.org

中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心
中国卫星导航学术年会组委会
二〇一七年七月