

莫比乌斯超材料激发的新一代电路与系统

Möbius Metamaterial Inspired Next Generation Circuits and Systems

Ulrich L. Rohde, Brandenburgische Technische Universität;
Ajay K. Poddar, Synergy Microwave Corp.

从金属合金到塑料合成材料，科学家和工程师们为适应各种各样的应用场景提出了许多人工材料。超材料，是一种由传统材料组成的但是有着非传统结构的人工材料，拥有着从自然界无法轻易得到的独特性质，比如在选定频率范围内的负指数特征。¹⁻⁸通过调节超材料的形状、尺寸、几何结构、放置方向以及排布方式可以实现对其性质的调控，这些调控包括电磁波弯曲，或者将电磁波约束在一定的区域内，以及电磁波吸收，从而得到由传统材料无法获得的益处。

呈现出莫比乌斯对称性的超材料结构在新一代低剖面电子工业和节能电子工业方面是非常有前景的，因为其耦合强度和结构的大小可以调节。²在莫比乌斯超材料的技术中，其独特的场分布可以实现对拓扑结构的探测，并在倏逝模谐振的基础上提供很高的Q值。³一种多节点莫比乌斯超材料带线可以为多相位注入锁定实现多锁定节点，使并行信号源的解决办法变得更加简单。⁴基于莫比乌斯超材料的技术可以在许多方面实现能量

收集，如新一代的自旋电子器件、量子振荡器、射频识别、信号保留器件以及接近传感器；同时还能对地下探测提供更大的动态范围，探测被困受害者的心跳，以及在生物传感器方面的应用。⁵⁻⁶

莫比乌斯超材料结构的独特性质归因于其独特的拓扑结构和尺寸。它的相互作用力是纳米级别的，因此可以用量子力学来解释其界面动力学。同样的结构如果尺寸远大于其波长的话，将不再有同样的性质。莫比乌斯超材料的性质可以通过传统结构工程学和材料科学来描述。在纳米级别，一个莫比乌斯超材料的结构可以表现出相斥的卡西米尔力，⁹⁻¹¹这在实现反重力和悬浮方面有着重要的实际应用价值。¹²图1a给出了真空中平行平板间的卡西米尔力 F 。这个等效的力 F 与 A/d^4 成比例。其中 A 是平板的面积， d 是平板之间的距离。⁹这种卡西米尔力表现为吸引或者排斥取决于两个平板的排列方式。图1b给出了真空中平行平板间表现为吸引的卡西米尔力。¹¹图1c则给出了用卡西米尔力来平衡镜子

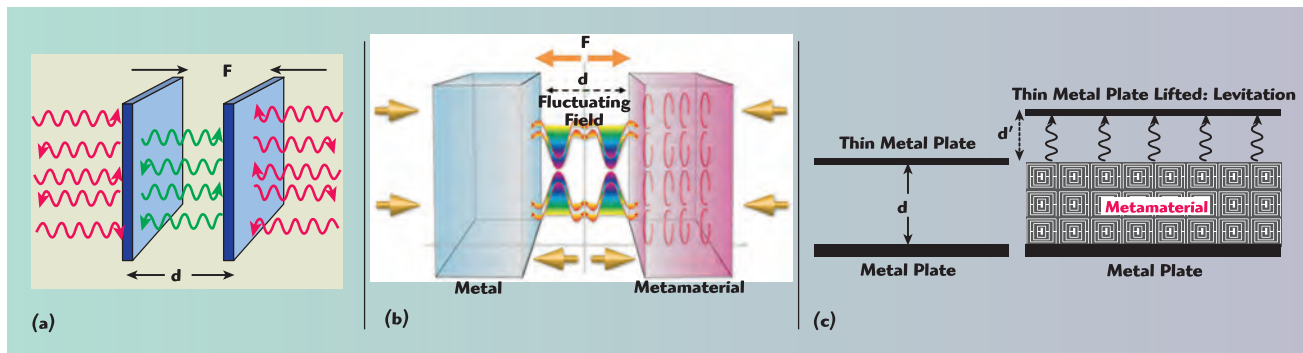


图1. (a) 真空中平行平板之间的卡西米尔力 (F)⁹; (b) 平行平板间相互排斥的卡西米尔力 (F)¹¹; (c) 使镜子悬浮的卡西米尔力¹²。

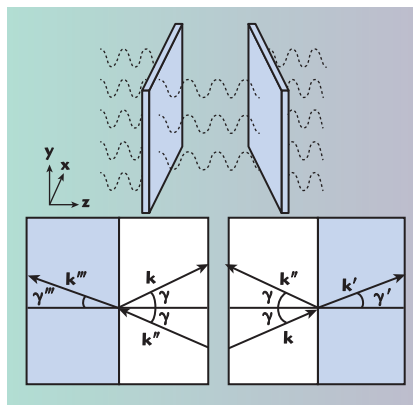


图2. 万有引力的卡西米尔效应¹³。

重力的示意图。¹²

卡西米尔力是由表面和周围电磁频谱的相互作用产生的，其依赖于表面和周围区域的完整的介电常数，并且这种依赖关系非常复杂。由于卡西米尔力的复杂性，通过改变材料、几何结构以及其他现象来调控它就会变得很有可能。同时，它还潜在地提供了中和或者部分抵消范德华力的可能。更理论地说，莫比乌斯超材料的结构可以产生很强大的卡西米尔效应（从没有到有力），可以传递物质，也就是说这种效应可以吸引或者排斥



图3. 物联网¹⁴。

物体。这样的特性可以被应用在许多现实场景中，包括自动聚焦相机透镜、高效伺服系统、硅阵列推进系统和高速铁路系统。一个表现为吸引力的卡西米尔力对于微机电系统工业的影响深远，也包括传感器中的静摩擦力预防、无接触轴承以及无接触功率传输等许多潜在的应用场景。¹⁰基于微机电系统的电子工业提供了一种物美价廉的解决办法，但是在微机电

系统开关器件中的静摩擦力会带来可靠性的问题，这一问题限制了其在高频方面的应用。

目前已有部分关于无静摩擦力的微机电系统横向开关技术的具有开创性贡献的工作，还包括它们在开关网络中的应用，以及在物联网应用中电控扫描相控阵天线中的相移器上的应用。在真空中，两个间隔纳米级别的表面间的

吸引力可以用卡西米尔力来解释，但是当考虑两个不同介电常数介质的表面时，还可以观察到等效斥力。¹¹⁻¹²这个现象同样可以在具有负介电常数的表面中观察到。这种现象能够被用来解决静摩擦力的问题，进而也诱发了新一代微机电系统中新的材料和加工方式。

莫比乌斯超材料结构有一个令人振奋的特点，即他们可以使光束弯曲，弯曲光束的方式和时空弯曲光束的方式在数学上是等效的，这就使得用来实现低成本引力波探测器的拓扑结构开发变得可能。图2给出了两个平板间表现为吸引力的卡西米尔效应。平板的折射率变化可以使引力波折射，其中 k 表示入射、透射以及反射引力波的波矢量， γ 是相对于表面所在平面的角度。¹³

关于卡西米尔效应及其应用和莫比乌斯超材料结构的未来应用的细节将在第二部分（计划在本刊16年9/10月刊发表）和第三部分（计划在本刊16年11/12月刊发表）做详细说明。本篇文章只简要描述莫比乌斯超材料结构在物联网、小卫星方面的应用，并举一些例子说明莫比乌斯变形和超

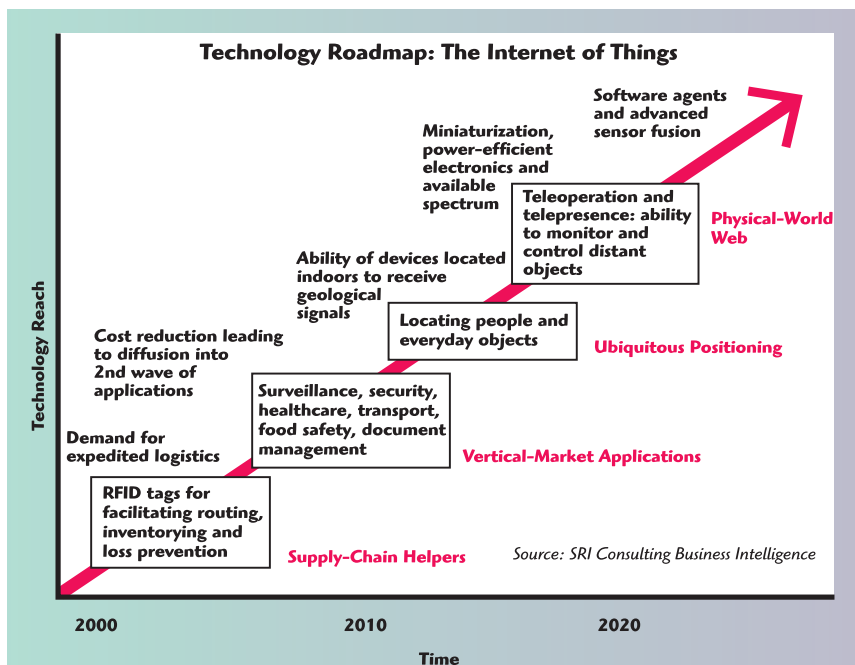


图4. 物联网技术发展路线图¹⁴。

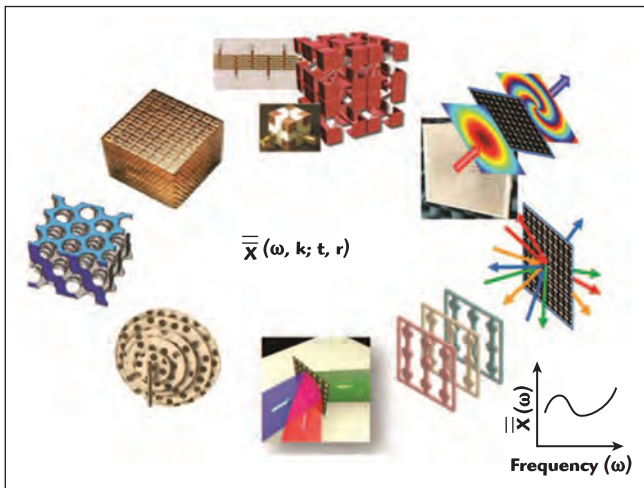


图5. 超材料工程的梗概⁸。

材料对称性在医学遥测技术、成像和传感器方面的应用。

物联网

物联网是物理对象的网络，这里的物理对象包括器件、交通工具、建筑或者其他被嵌入电子、软件、传感器和网络连通性的对象，这些对象可以收集并交换数据（如图3）。¹⁴物联网允许目标在穿过现有网络基础设施的情况下被遥感并遥控，为更直接地将物理世界集成到基于计算机的系统中创造了机会，这样就会带来更高的效率、准确率以及经济利益。当互联网在传感器和致动器帮助下扩张，它就成为了一个信息物理系统的典型例子，同时包含了许多诸如智能电网、智能家居、智能交通以及智慧城市等的技术。每一项都是独一无二的可以通过嵌入式计算系统辨认的，同时还可以在现有的互联网基础设施中互操作。

图4阐述了物联网技术的发展路线图。¹⁴现有技术无法满足物联网对于更快、更可靠、更普遍存在的无线系统的要求。数十年来的趋势是，人们将越来越多的目光放在数字信号

处理方面，光谱效率已经通过精密的调制、多路技术和多输入多输出方案被最大程度地提高。然而，这些方法现在都到达了它们的瓶颈，将频谱向毫米波和太赫兹波段移动也成为了一种必不可少的展宽频谱资源的方法。不幸的是，数字信号处理在这些频率并不适用，因为信号变化得太快以至于难以被数字化。由莫比乌斯超材料结构提供的对于电磁特性史无前例的控制为快速处理和低功率小型化电子技术克服技术瓶颈打开了新的大门。

最近发表的文献描述了一种对特高频电磁波进行实时模拟信号处理（R-ASP）方法，就是利用了超材料技术并结合了超快光学的概念。¹⁵⁻¹⁷建立一个特殊的超材料工程分支来关注和调控空间、时间以及时空中的电磁波是非常有必要的，它们可以用来实现不同种类的无限制数量的人工智能材料（如电磁带隙超材料、单负超材料、双负超材料、双各向同性超材料、双各向异性超材料以及手性材料）。这种技术适合于通信行业、医疗器械（生物医学、口腔和肿瘤学、超声波成像和核磁共振）、光学仪器、传感器（生物、薄膜、无线应变、航空与国防）、能量收集、运输、悬浮或反重力（表现为吸引力和排斥力的卡西米尔效应）。

物联网技术的发展蓝图支持这些应用场景。¹⁴图5描述了超材料工程的典型梗概，阐明了新一代电子

电路与系统的解决方案。⁸如图5所示， $\bar{\bar{\chi}}(\omega, \mathbf{k}; \mathbf{t}, \mathbf{r})$ 是张量的通用符号，表示超材料的介电常数张量（ $\bar{\bar{\epsilon}}$ ）、磁导率张量（ $\bar{\bar{\mu}}$ ）、磁到电的耦合张量（ $\bar{\bar{\xi}}$ ）和电到磁的耦合张量（ $\bar{\bar{\zeta}}$ ）， ω 是角频率（时间的倒数）， $\mathbf{k}$ 是空间频率（距离的

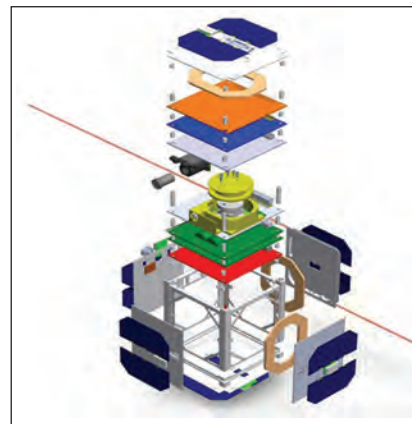


图6. 典型的CubeSat设计图（来源：ESTCube-1）¹⁸。

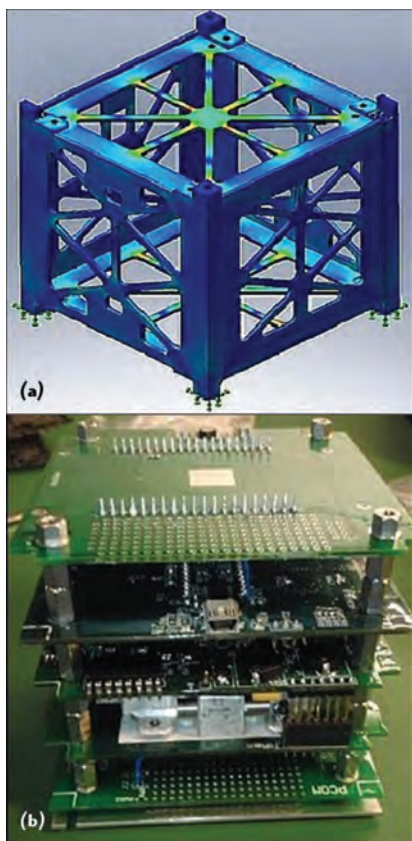


图7. (a) CubeSat总线结构；(b) 总线内部结构图（来源：Colorado Space Grant Consortium）¹⁹。

电路与系统的解决方案。⁸如图5所示， $\bar{\bar{\chi}}(\omega, \mathbf{k}; \mathbf{t}, \mathbf{r})$ 是张量的通用符号，表示超材料的介电常数张量（ $\bar{\bar{\epsilon}}$ ）、磁导率张量（ $\bar{\bar{\mu}}$ ）、磁到电的耦合张量（ $\bar{\bar{\xi}}$ ）和电到磁的耦合张量（ $\bar{\bar{\zeta}}$ ）， ω 是角频率（时间的倒数）， $\mathbf{k}$ 是空间频率（距离的

倒数)， t 是时间（直接时间）， r 是距离（直接距离）。将不同的依赖关系（ $\omega, k; t, r$ ）和双各向异性（ $\bar{\epsilon}, \bar{\mu}, \bar{\xi}, \bar{\zeta}$ ）结合起来，就实现了一个虚拟的无限制数量的特有类型的超材料。⁸

CUBESAT（美国的一种小卫星）

卫星在建立通信网络中起到了决定性的作用，这些卫星通常很贵，体积很大并且需要花费好几年的时间去建立。为了保证低成本，像CubeSat一样的小卫星相比于他们的大尺寸同行给人们带来了巨大的回报。小型卫星位于海拔200到2000公里的近地轨道上。近地轨道（相对与地球表面）上的小型卫星的速度大约在每秒7.5公里，因此轨道周期大约在90分钟。

CubeSat的定义来自于其形状和重量。它是小型卫星家族中的一员：皮卫星（picosatellite）小于1千克，纳卫星（nanosatellite）的重量在1到10千克之间，微卫星（microsatellite）的重量在10到100千克之间。图6给出了一个CubeSat典型的CAD模型（10cm × 10cm × 10cm）。¹⁸图7是一个典型的总线结构，图8给出了实际运行中的CubeSat以及它在近地轨道上的位置。²⁰CubeSat的基本子系统有遥感、追踪和控制（TTC），发电和配电（PGD），数据命令和处理（DCH），海拔决定和控制（ADC）以及有效载荷。

小型卫星的每个单元都花费得更少，制造一个传统卫星的钱可以造许多CubeSat。尽管CubeSat成本低，但

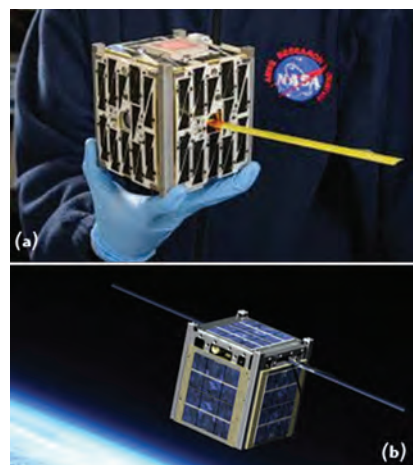


图8. (a) CubeSat的硬件实体；(b) 近地轨道上的CubeSat（来源：NASA）²⁰。

是它没有单独的负荷能力。一个可能的划算的选择是发射许多CubeSat，如图9所示，并建立一个小型卫星的网络，使得它们可以完成一个大卫星能完成的任务。这样的好处是，如果

来自 L-3 NARDA-MITEQ... 可靠的 可 变 衰 减 器 产 品



微型
可变

宽带
可变

高功率
可变

创新的射频可变衰减器产品

L-3 Narda-MITEQ拥有当今市场上超新、超全和超可靠的衰减器产品线，适合要求严苛的航空、国防和测试应用。我们的解决方案包括微型、宽带和高功率产品，都可现货供应。

- 微型可变产品——超低的最小插入损耗、小而紧凑的外壳，衰减可调范围高达30dB、工作温度可高达105℃。
- 宽带可变产品——连续流畅运行，衰减可调范围高达20dB
- 高功率产品——在功率高达500W时的衰减可调范围高达10 dB或20dB

请访问 nardamiteq.com 或致电
001-631-231-1700 了解我们的所有产品。



Narda-MITEQ

[f](https://www.facebook.com/L3com) [in](https://www.linkedin.com/company/L3com) L3com.com

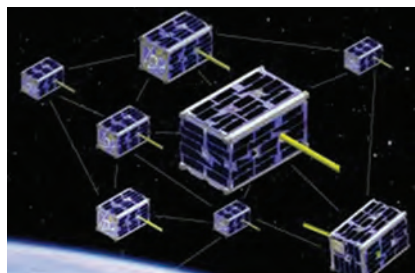


图9. CubeSat的网络 (来源: NASA)²⁰。

有一个CubeSat失效了, 网络仍然可以被重建, 然而如果只有一个大卫星的话, 那么这个卫星的失效就意味着整个任务的失败。图10描绘了CubeSat的启动发射概念,¹⁹⁻²²图11则给出了通信线路的原理图。²³

通信线路中的天线尺寸对于小型卫星来说是一个限制。传统口径天线(比如反射板、喇叭天线、阵列)的最大增益是由口径面积决定的。为了达到预期效果, 一般需要相对较大的尺寸, 然而这会使得它们不利于空间应用。通过智能材料的优化, 可以使天线的性能更好或者有效减小天线的尺寸, 这样就可以减少将这些天线放入空间中的成本。更轻巧的天线可以最直接地减轻卫星的重量, 很多节能天线减小了所需蓄电池和太阳能电池的尺寸和重量。填充有超材料的具有低指数电磁特性的喇叭天线如图12所示。这种天线在尺寸上相对较小, 但仍然不适合小型卫星(如CubeSat)应用。²⁴

为了小型卫星而正在进行的小型化低指数超材料透镜天线的研究正面临着许多挑战, 比如带宽和效率。超材料透镜拥有着类似低等效折射率($0 < n < 1$)材料所具有的特性, 通过分散技术就可以得到一个相

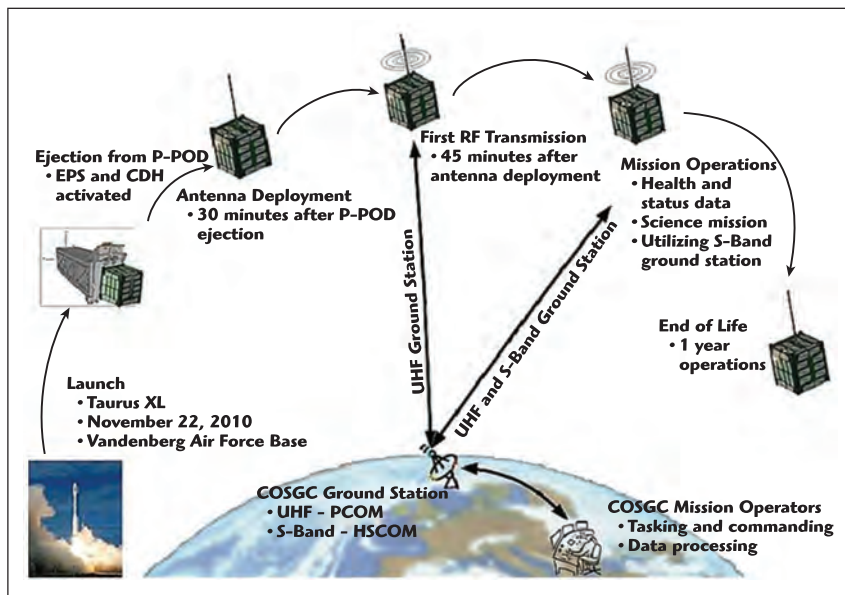


图10. CubeSat发射运作概念 (来源: Colorado Space Grant Consortium)²¹。

对宽带的低折射率区域。在低方向性的天线前面放置低指数超材料透镜, 就可以在远场产生一个高度平行的波束。低指数超材料透镜可以由x-y平面的双开口谐振环来得到低磁导率的响应, x-z和y-z平面的两端负载的偶极子可以提供低介电常数响应。

随着 ϵ 和 μ 逐渐趋近于0, 通带会变得很窄, 但是天线的平行度和方向性得到了提高, 因此可以通过软件无线电集成, 使变化的通信系统更容易拥有非凡的频率和极化敏感度。这在CubeSat的应用中非常有用, 因为多功能小型化天线是人们一直以来的目标。

智能莫比乌斯超材料结构支撑着小型化多功能天线的发展, 同时高效太阳能发电板和特高频率电磁波的实时模拟信号处理性能也和它有关。利用莫比乌斯拓扑结构实现的可调超材料可以在很小的尺寸条件下实现宽带可调, 同时保证在整个通信频带的在用信道的瞬时带宽很窄。同时调节超材料和天线给人们提供了一种动态调节工作信道的可能, 还可以得到几乎任意极化的响应。这样做主要的挑战是要提出一种方法, 来衡量这些超材料和相关天线结构在低频的时候能否工作, 在工作的同时还保持着实际的

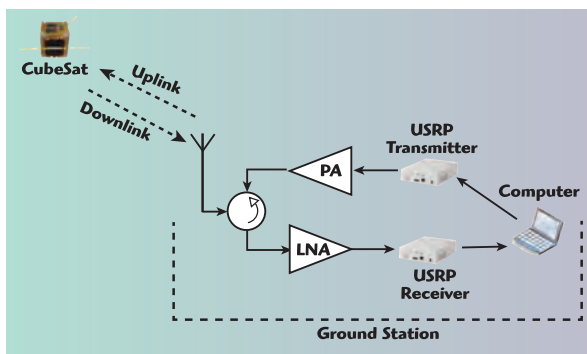


图11. 一个普通CubeSat通信系统的原理图。²³

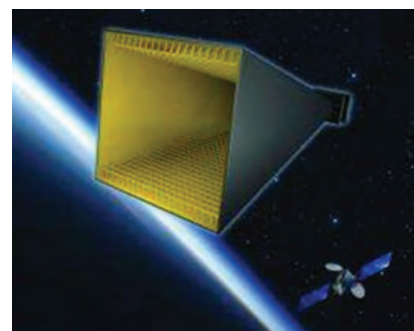


图12. 用于卫星通信的典型的填充了超材料的馈电喇叭天线。²⁴



图13. 扭曲一次的莫比乌斯带（上）；扭曲一次的中间收缩的莫比乌斯带（中）；扭曲三次的莫比乌斯带（下）。

物理尺寸和重量。莫比乌斯超材料的技术使得在低频实现小型化平面天线成为可能，并且天线的性能不受影响。

莫比乌斯变换：超材料的对称性

莫比乌斯带的概念是基于一种现象，即可以经历整个环而不必跨越其边缘。这种莫比乌斯带永远没有终点，在时空域给出了无限长路径的概念。无限的概念不是空无或者空间，应该说是一种没有起点也没有终点的概念（如图13所示）。这种一次扭转的莫比乌斯带中间收缩，就像数学上的无穷大符号。因为时空是弯曲的，所以一定能像莫比乌斯带本身一样回到原点并且没有边界。我们的宇宙可以被想象成一个莫比乌斯带的副本，这个莫比乌斯带由空间中震动的弦进行多次扭曲构成，在一个弯曲的回路里旋转，正如经历它自己的起点，同时永恒的在时空中动态的循环。这些“弦”在多维空间中震动，可以在三维空间中根据他们如何震动来判断是

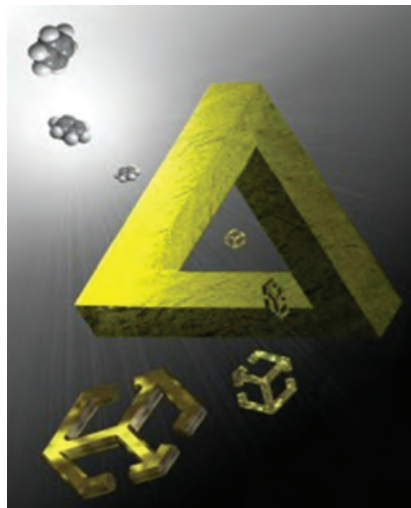


图14. 超分子剪刀器中的莫比乌斯带的对称性。²⁷

哪一种物质，如光或者重力。图13还给出了扭曲三次的莫比乌斯带（扭曲可以被定义为结）。

对于工程师来说，多结点的莫比乌斯带的表面在工业、医药和空间应用方面是为新一代电子电路和系统探索复杂几何形状和拓扑的启动平台。拓扑学是一个研究在连续变形条件下特定性质不变性的科学领域，例如拉伸、弯曲或者扭曲基础几何形状。拓扑学的对称被定义为一种性质，当系统经历一种变化（变形、扭曲或拉伸）的时候才存在的性质。莫比乌斯带的变形仅仅在其测量属性上发生变化，这是违反休克尔法则的。²⁵比如一些纳米结构，它们在经历了变形之后还可以拥有完全一样的弹性性能。

非常有趣的是，我们可以注意到，莫比乌斯变换为了实现超材料的多种独特的性质，可以允许复杂的几何形状出现。超材料可以通过导线或谐振环结构的阵列或者复合左右手传输线谐振器来实现。这两种实现方法的主要区别是耦合动力，导线或谐振环结构的耦合方式属于松耦合，复合左右手传输线谐振器结构的耦合方式是紧耦合。由于导线或谐振环会有一

些部分没有耦合，所以工作带宽是由发生响应的导线或谐振环结构相关的品质因数和损耗决定的。减小损耗和提高品质因数是——一直以来的挑战。在基于复合左右手传输线谐振器的结构中，谐振器的耦合强度非常强，相比于那些基于导线或者谐振环的结构有效地增加了工作带宽。⁷

拓扑学上的莫比乌斯超材料对称性是由莫比乌斯变换 $f(z)$ 得到的，公式如下：²⁶

$$f(z) = \frac{az + b}{cz + d};$$

$$(a, b, c, d \in \mathbb{C} \text{ and } ad - bc \neq 0) \quad (1)$$

$$z \in \mathbb{C} \rightarrow z = r[\cos(\theta) + i\sin(\theta)] \quad (2)$$

其中 a, b, c, d 是复数，并且公式1并不是分母的倍数（也就是说）。从公式2可以得到莫比乌斯变换 $f(z)$ 的性质如下：

- 1) $f(z)$ 可以由一组映射关系来表示（缩放： $z \rightarrow tz$ ，平移： $z \rightarrow z + p$ ，旋转： $z \rightarrow e^{i\theta} z$ ，复共轭 $z \rightarrow \bar{z}$ ，倒数： $z \rightarrow \frac{1}{z}$ ），其中 $t, p \in \mathbb{C}$ ；
- 2) $f(z)$ 在 $\mathbb{C}$ 上一一映射并且连续；
- 3) $f(z)$ 将圆或线映射为线或圆；
- 4) $f(z)$ 是保角变换。

从1) 到4) 可以看到，这组公式是一系列映像变换的组合，同样的元素有同样的映像，倒数由倒数函数给出。莫比乌斯组由那些线性变换组合而成，线性变换从一个开放单位集合 $\mathbb{D} = \{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$ 一一映射到它本身。这些变换和它们的逆变换在 $\mathbb{D}$ 上是解析的并且可以映射到它的边界，单位在 $S^1 = \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}$ 上循环。该集合的自同构有如下形式：

$$f(z) = e^{i\varphi} \frac{\alpha - z}{1 - \bar{\alpha}z} \quad (3)$$

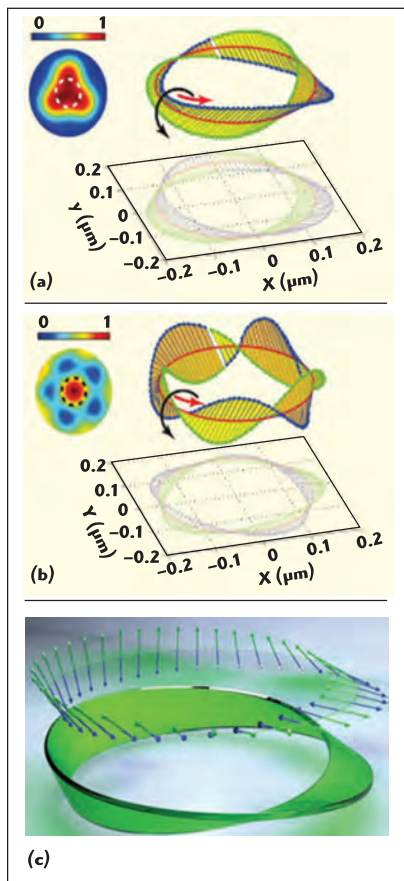


图15. 莫比乌斯带周围观察到的光学偏振扭曲的数学计算和实验结果：(a) 单结点；(b) 多结点；(c) 偏振扭曲。²⁸

$$z = M(w) = \frac{e^{j\psi} w + \alpha}{1 - \bar{\alpha} e^{j\psi} w} \quad (4)$$

$$w = M^{-1}(z) = e^{-j\psi} \frac{z - \alpha}{1 - \bar{\alpha} z} + \alpha \quad (5)$$

其中 $\varphi \in \mathbb{R}$, $\psi \in \mathbb{R}$, and $\alpha \in \mathbb{D}$

从等式1到等式5可以看出，莫比乌斯变换可以被用来实现莫比乌斯超材料的对称性，这种变换已经在许多领域受到了广泛的关注，比如超分子领域、光学偏振、DNA传感以及用于节能电子器件和仪器的高频器件。²⁶⁻³⁵

实例：莫比乌斯超材料对称性

苯超分子

在超材料中发现的电磁对称性可以等效于莫比乌斯带中的结构对称性，用扭曲的次数来控制超级原子之

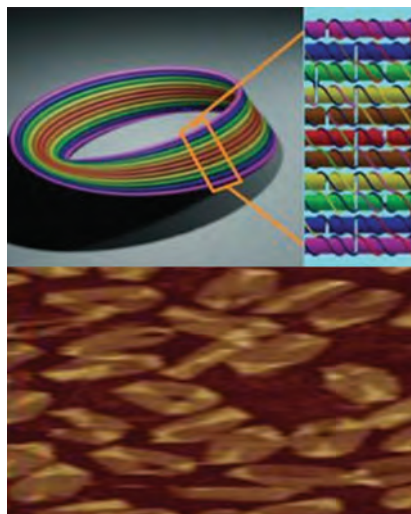


图16. 典型的莫比乌斯DNA带的纳米架构：有颜色的莫比乌斯带（左上）；莫比乌斯带截面（右上）；DNA图像（下）。²⁹

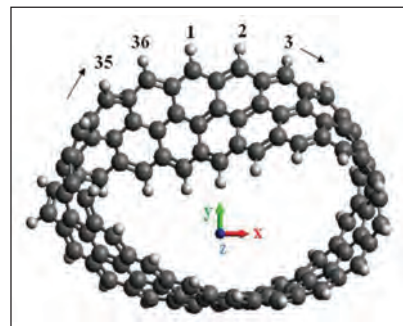


图17. 石墨烯莫比乌斯结构，长 $L=18$ ，宽 $N=3$ 。莫比乌斯轴和边界碳原子指数数如图所示。³¹

间的电磁耦合的符号变化。图14给出了金属和介质中的超材料莫比乌斯对称性。²⁷如图14所示，多维空间中的莫比乌斯机制将普通的苯分子转换成了具有莫比乌斯对称性的超级分子，这是一种拓扑学上的现象，即产生了一个半扭曲的带子，它有两个面但是只有一个边。超分子工具模型如图14，是一个3体系统，就像一个修剪器，金属的谐振超原子按照耦合的谐振环谐振器排列（成为超分子），通过三个120度的旋转具有了拓扑上的莫比乌斯周期对称性（ C_3 对称性）。莫比乌斯扭曲是由组成部分的超原子之间的电磁耦合常数的符号变化导致的。²⁷一个有趣的现象是，不同的耦合符号具有一定的谐振频率，这些频

率只依赖于变化的次数，而和扭曲的位置无关。因此可以确定这就是莫比乌斯对称性。

偏振光

图15给出了由电磁波形成的人工莫比乌斯带，它说明了“一束光可以被控制，所以它的极化扭曲遵循莫比乌斯带的轮廓。”²⁸在一个莫比乌斯轮廓周围产生电磁波是非常有趣的，可以提高对光的偏振和复杂光束工程的基础理解，这些都是发展亚波长成像中光学微纳加工结构所必须的。像图15给出的那样，一个典型的莫比乌斯带表面是由一束光的极化状态组成的，具有非零的曲率，呈现出空间对称性。

DNA带传感器

图16是一个莫比乌斯DNA带的纳米结构，其中每一个有颜色的条带都表示不同的DNA双螺旋。这样的纳米结构可以被用在高灵敏度的生物和化学传感器件中。²⁹

莫比乌斯超材料石墨烯

最近石墨烯吸引了人们的很多注意，因为它具有独特的结构和非常优秀的电子光学特性。³⁰单层石墨烯具有像一张薄纸或沿石墨烯平面有很大模量的塑料的性质，它非常容易被弯曲。这种独特的性质使得石墨烯可以缠绕在碳纳米管的中间而不会发生形变，同时它独特的性质可以使其被用作一种构建莫比乌斯带的材料，用于微波和光学器件。莫比乌斯石墨烯的能带隙和内聚能如图17所示，依赖于莫比乌斯带的宽度，随着带宽的增加而增加，可以用如下公式表示：³¹

$$E_{C_0}^{r(M)} = \frac{E_{SCF}^{r(M)} - N_c \times E_{SCF}^C - N_H \times E_{SCF}^H}{\Sigma(N_c + N_H)} \quad (6)$$

其中，上标 $r(M)$ 对应石墨烯带

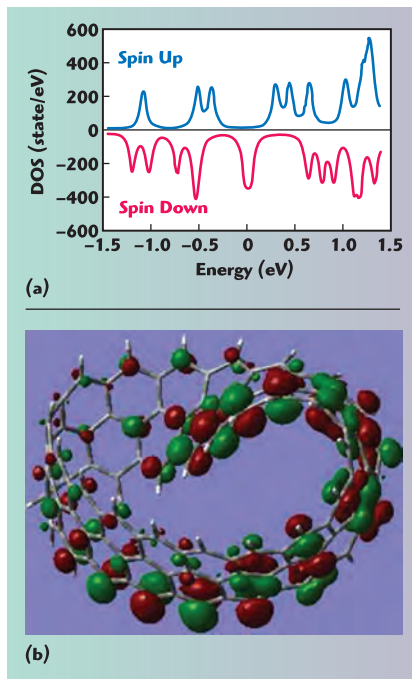


图18. (a) 石墨烯莫比乌斯带自旋依赖的状态密度图，该状态密度是以电子能量为自变量的函数。
(b) $E=0$ eV 情况下的分子轨道。³¹

(莫比乌斯带)， N_C 是碳原子的数量， N_H 是氢原子的数量， $E_{CO}^{(M)}$ 是石墨烯带的自洽场能量， E_{SCF}^C 和 E_{SCF}^H 分别是碳原子和氢原子的自洽场能量。

莫比乌斯石墨烯的磁矩和旋性是非常有趣的。一个石墨烯莫比乌斯带在有外部电场的情况下，能保持它金属的表面状态。在有非常高的电场情况下，莫比乌斯带会发生自旋翻转。和石墨烯纳米带相反，石墨烯莫比乌斯带在有外部电场存在时，会表现出一半的半导体特性。图18给出了一个石墨烯莫比乌斯带的典型轨道和自旋相关的态密度(DOS)。莫比乌斯石墨烯的铁磁性和自旋翻转性质在自旋电子器件和量子振荡器方面的应用是非常具有吸引力的。³¹

图19给出了莫比乌斯分子环的特

征，这些特征可以支撑超材料的应用(负介电常数和负磁导率)。³²两个能带由他们不同的伪自旋标签 $\sigma = \uparrow$ 和 $\downarrow$ 来表示。解谐 $\Delta\omega = \omega - \Delta_0$ 。³²莫比乌斯分子环和普通的环轮烯的区别在于它们的边界条件。负指数性质为超材料提供了很多非凡的特质，比如图像隐身、亚波长成像和提高Q值的倏逝场放大。

图20描述了石墨烯莫比乌斯带的应用，用来实现微电子器件。³⁰⁻³⁵它阐明了由莫比乌斯超材料带线实现的新一代微波器件，是通过由莫比乌斯变换支配的电磁耦合动力学来实现的。

如图20所示，石墨烯纳米带组成的圆柱形的闭合环状结构有两个边界，表现出反铁磁特性(零磁矩)，

微波设计的最新专著



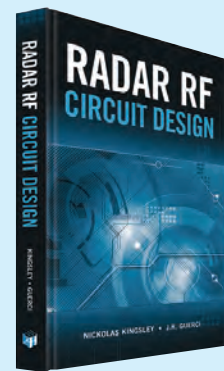
半导体控制器件建模

Robert H. Caverly
精装 · 290页 · 2016版
ISBN: 978-1-63081-021-4
189美元 / 140英镑



微波回传电子学

Vittorio Camarchia, Roberto Quaglia,
and Marco Pirola
精装 · 356页 · 2016版
ISBN: 978-1-63081-015-3
179美元 / 133英镑



雷达射频电路设计

Nickolas Kingsley and Joseph R. Guerri
精装 · 316页 · 2016版
ISBN: 978-1-60807-970-4
169美元 / 128英镑

美国: 致电: 1-800-225-9977 (在美国或加拿大),
或 1-781-769-9750, 分机4030
传真: 1-781-769-6334
电子邮件: artech@ArtechHouse.com

英国: 致电: +44 (0)20 7596 8750
传真: +44 (0)20 7630-0166
电子邮件: artech-uk@ArtechHouse.com

查看详细介绍和订购, 请访问:

ArtechHouse.com

价格不包含运费和税费。



ARTECH HOUSE
BOSTON | LONDON

685 Canton Street, Norwood, MA 02062 USA
16 Sussex Street, London SW1V 4RW UK

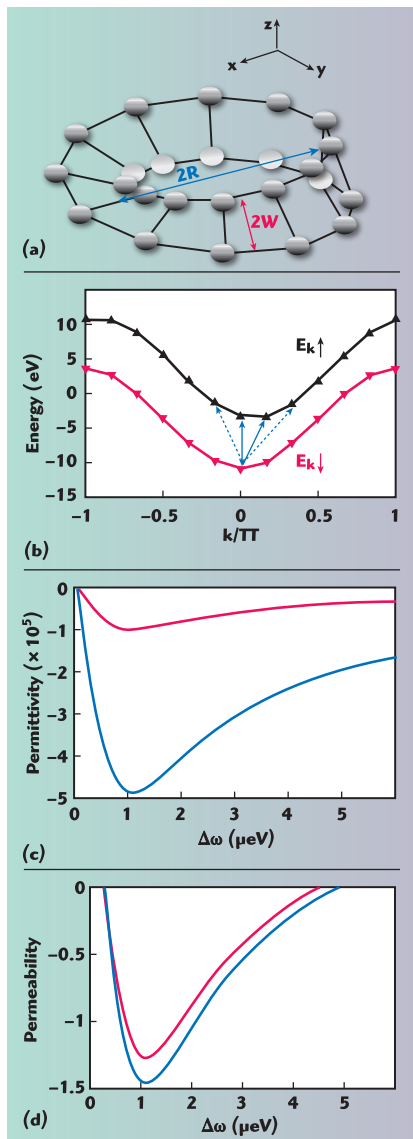


图19. (a) 由碳原子组成的莫比乌斯分子环；(b) 分子环的能量谱 E_k ；(c) 相对介电常数，以 $\Delta\omega$ 为自变量；(d) 相对磁导率，以 $\Delta\omega$ 为自变量。³²

然而，石墨烯纳米带组成的莫比乌斯闭合环状带线只有一个边界，表现出铁磁性（非零磁矩）。有Z形边界的石墨烯纳米带结构在它的边界表现出磁性。这些带线最稳定的状态是呈现反铁磁性，这样就导致在相对的边界点的磁矩是反向的，减小了带线的总磁矩。然而，一个石墨烯莫比乌斯带只有一个连续的边界，因此在相对的边界之间没有磁抵消，这样就会导致非零磁矩。

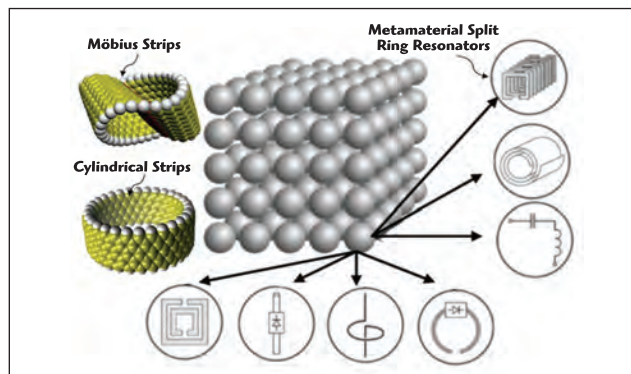


图20. 由石墨烯组成的莫比乌斯超材料带线的结构，可用于微电子器件中。³⁰

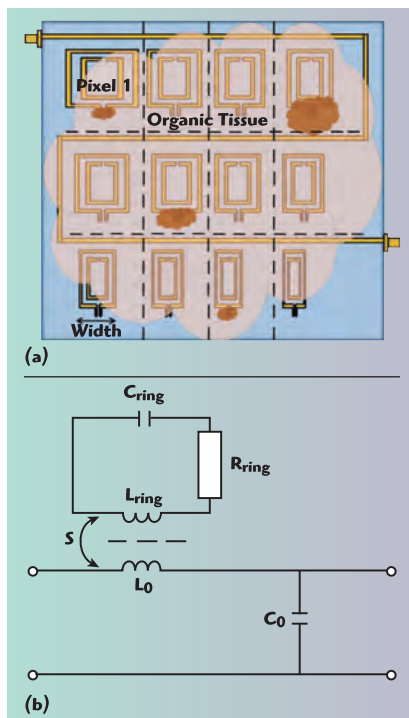


图21. (a) 超材料微带耦合开口谐振环传感器阵列；(b) 微带单元负载的开口谐振环的等效电路图。²⁷⁻²⁸

医学遥测

医学遥测系统在近年来明显地增加了，因为这对早期诊断疾病和持续性的监测生理机能是非常重要的。微波天线和传感器都是这些遥测系统的关键部分，因为它们提供了病人和基站之间的通信。工业、科学和医学（ISM）无线电频段是无线电频谱的一部分，这部分频谱是国际上专门为工业、科学和医学领域的射频能量应用保留的而不是用于通信的。通过

一些超材料的使用，比如缝隙微带天线中的电磁带隙结构，可以使天线效率得到提高，还可以获得更好的回波损耗特性。³⁶

癌症是非正常（恶性）细胞不受控的生长。

利用超材料组成的结构设计的集成化微波结构可以得到一些经济划算的器件，使人体内部的畸形可以被精确地局部化。癌症检测背后的基本原理是，生物组织中水含量的微小变化都会导致它们的介电常数（ ϵ ）和导电性（ σ ）的变化。³⁷恶性细胞相比于正常的组织，具有非常高的水含量。因此一个肿瘤块的介电常数和导电率在微波频段也比那些正常的组织要高。有一种被提出的生物传感器由互补的金属化超材料谐振器阵列组成。选择开口谐振环（SRR）的原因是它们对于电磁场的响应很强烈。

³⁷一个电磁源产生的电磁波打在一个超材料阵列上，同时需要放置一个探测器来探测电磁波经历了阵列之后的信号。在没有任何材料被检测的情况下，生物传感器具有一个特定的谐振频率。³⁷当有材料被检测时，介电常数的变化作用于谐振器的电容响应，这样就会使得传感器的谐振频率具有很高的敏感度。因此，谐振频率的变化和响应的形状在肿瘤探测方面是非常重要的。图21a给出了一个典型的超材料耦合开口谐振环组成的传感器，该传感器由12个开口谐振环组成。图21b则给出了传感器中的一个单元。

假设一个器官组织和开口谐振



轻松提取,

省力50%*

*实验室测试证明,新款BRUTE™166升储物桶,提取垃圾袋时,比传统BRUTE™储物桶省力高达50%。



BRUTE™

乐柏美商务用品 Brute 储物桶

WWW.RCPWORKSMARTER.CN

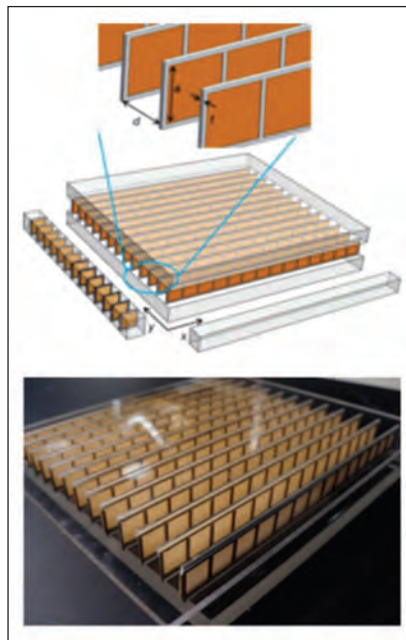


图22. 声学双曲超材料的物理结构图。

环的外层环相接触,由于有效介电常数的改变,它会改变谐振环的电容值。这样的话,组织之间的不同,比如一些非正常的情况,就可以被检测到。³⁸一个负载为微带线的开口谐振环在准静态条件下的等效电路图在图21b中给出。³⁹开口谐振环在传输线旁边,通过磁耦合的方式被耦合能量,耦合因子为S,其中 L_0 和 C_0 分别对应开口谐振环的总电感和电容。由等效电路可以得到等效的具有洛伦兹色散特性的磁导率:⁴⁰

$$\mu_{\text{eff}} = -j \frac{Z_1}{\omega p} = \frac{L_0}{p} \left(1 + \frac{\omega^2 S^2}{\omega_{0m}^2 - \omega^2 + j\omega\delta} \right) \quad (7)$$

其中, p 是细胞的净长度。

声学成像

声学成像工具在医疗诊断和检测结构完整性方面都具有很大的应用价值,这里的结构包括上到飞机下到大桥的所有结构。医务人员和结构工程师通常需要注意成像的声音和治疗

的目的。超材料为研究者在某个角度上提供了更多控制的可能,这个角度正好是声波可以穿过的角度。图22给出了一个典型的超材料的声学双曲结构,它是由纸和铝做的应用于声学成像的一种结构。声学双曲超材料(AHM)结构允许人们对声波进行调控,而不仅仅局限于通过声波聚焦和控制声波穿过超材料的角度来提高两倍的声学成像分辨率。⁴¹从一个方向来看,它具有正密度,和声波垂直相交。但是从另一个垂直的方向来看,超材料又具有负的密度。这就可以有效地使声波在一些角度发生弯折,而且弯折方向是和基础物理学预测的方向相反的。这种特性有许多有用的应用,举例来说,它可以被用来提高声学成像的质量。传统上来说,当所成像物体的尺寸小于半个声波波长的时候,声学成像就无法分辨了。也就是说,一个100kHz的声波,在空气中传播的时候波长是3.4mm,因此它的成像分辨率就被限制在1.7mm。

总结

莫比乌斯超材料的结构的独特性质为新发明打开了新的一扇门,未来将会一直不停地出现新的潮流。我们可以说未来是具有莫比乌斯表面的形式的。本篇文章中,我们简要介绍了卡西米尔效应。有关卡西米尔效应以及莫比乌斯超材料结构在未来的应用的更多细节,将在第二部分和第三部分中详细讨论。(尹佳媛译) ■

参考文献

1. U. L. Rohde and A. K. Poddar, "Möbius Strips and Metamaterial Symmetry: Theory and Applications," *Microwave Journal*, Vol. 11, No. 57, November 2014, pp. 76-88.
2. U. L. Rohde and A. K. Poddar, "Metamaterial Resonators: Theory and Applications," *Microwave Journal*, Vol. 57, No. 2, December 2014, p. 74.

从产品 到解决方案

RF 微波 毫米波

Ducommun (杜克曼)是一个
成立于1849年, 营额七亿美元
员工五千的美国上市公司。

在标准及定制毫米波放大器
产品的设计, 测试和制造方
面, Ducommun 积累了45
年的经验

Ducommun

• 大功率, 单一直流供电/内部偏置电路



32-36 GHz 3-W 功率放大器

- AHP-34043530-01
- 增益: 30 dB (最小值)
- 增益平坦度: ± 2.0 dB (最大值)
- 功率: 34 dBm (P1dB), 35 dBm (Psat)



26-40 GHz 低噪声放大器

- ALN-33144030-01
- 增益: 30 dB (最小值)
- 增益平坦度: ± 1.0 dB (最大值)
- 噪声系数: 4.0 dB (典型值)

欲了解更多信息,
请联系我们的销售团队
☎ +1 (310) 513-7256
✉ rfsales@ducommun.com
📱 微信号: rfsalesducommun

联系方
式

- U. L. Rohde and A. K. Poddar, "Metamaterial Möbius Strip Resonators for Tunable Oscillators, Part 3," Microwave Journal, Vol. 58, No. 1, January 2015, p. 64.
- A. Poddar, "Slow Wave Resonator Based Tunable Multi-Band Multi-Mode Injection-Locked Oscillator," Habil Thesis, BTU Cottbus, Germany, 2014.
- U. L. Rohde, A. K. Poddar and D. Sundararajan, "Real Time Signal Retention Device Using Co-Planar Waveguide (CPW) as Möbius Strip," IEEE MTT-S Digest, June 2013, pp. 1-3.
- U. L. Rohde, A. K. Poddar and D. Sundararajan, "A Novel Möbius-Coupled Printed Resonator Based Signal Sources," IEEE MTT-S Digest, June 2013, pp. 1-3.
- C. Caloz, "Perspectives on EM Metamaterials," Materials Today, Vol. 12, No. 3, March 2009, pp. 12-20.
- C. Caloz, "Tomorrow's Metamaterials: Manipulation of Electromagnetic Waves in Space, Time and Space-time," February 2016, <http://arxiv.org/pdf/1602.04340.pdf>.
- A. Lambrecht, "The Casimir Effect: A Force From Nothing," Physics World, September 2002, <https://www.physics.ohiostate.edu/~jay/631/Casimir%20effect.pdf>.
- R. Zeng, Y. Chen and Y. Yang, "Stable Multilayer Structure Based on Restoring Casimir Forces," European Physical Journal B, Vol. 86, No. 398, September 2013, pp. 1-6.
- F. Intravaia and C. Henkel, "Can Surface Plasmons Tune the Casimir Forces Between Metamaterials?," New Frontiers in Casimir Force Control, Poster, September 2009, <http://cnls.lanl.gov/casimir/PostersSF/Intravaia-SantaFe-poster.pdf>.
- U. Leonhardt and T. G. Philbin, "Quantum Levitation by Left-Handed Metamaterials," New Journal of Physics, Vol. 9, August 2007.
- J. Q. Quach, "Gravitational Casimir Effect," Physical Review Letters, Vol. 114, February 2015.
- "Internet of Things," Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Internet_of_Things.
- C. Caloz, "Metamaterial Dispersion Engineering Concepts and Applications," Proceedings of the IEEE, Vol. 99, No. 10, October 2011, pp. 1711-1719.
- B. E. A. Saleh and M. C. Teich, Fundamentals of Photonics, 2nd ed., Wiley, 1994, Chap. 22.
- C. Caloz, S. Gupta, Q. Zhang and B. Nikfal, "Analog Signal Processing," IEEE Microwave Magazine, Vol. 14, No. 6, September 2013, pp. 87-103.
- "ESTCube-1," Wikipedia, <https://en.wikipedia.org/wiki/ESTCube-1>.
- "Hermes CubeSat Mission," Earth Observation Portal, <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/h/hermes>.
- "CubeSats," NASA, www.nasa.gov/mission_pages/cubesats/index.html.
- "NASA CubeSat launch," Southgate Amateur Radio News, http://southgatearc.org/news/january2010/nasa_cubesat_launch.htm.
- G. L. Skrobot, "Project ElaNa and NASA's CubeSat Initiative," Proceedings of the Cal Poly 2010 CubeSat Developer's Workshop, April 2010.
- O. Ceylan, A. Caglar, H. B. Tugrel, H. O. Cakar, A. O. Kisilal, K. Kula and H. B. Yagci, "Small Satellites Rock," IEEE Microwave Magazine, Vol. 17, No. 3, March 2016, pp. 26-33.
- "Metamaterials Approach Makes Better Satellite Antennas," phys.org, January 2011, <http://phys.org/news/2011-01-metamaterials-approach-satellite-antennas.html>.
- E. Hückel, "Grundzüge der Theorie Ungesättigter und Aromatischer Verbindungen," Zeitschrift für Elektrochemie und Angewandte Physikalische Chemie, Vol. 43, No. 9, September 1937, pp. 77-85.
- S. A. Marvel, R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, "Identical Phase Oscillators with Global Sinusoidal Coupling Evolve by Möbius Group Action," American Institute of Physics, Vol. 19, No. 4, October 2009, pp. 043104-1-11.
- C. W. Chang, M. Liu, S. Nam, S. Zhang, Y. Liu, G. Bartal, and X. Zhang, "Optical Möbius Symmetry in Metamaterials," Physical Review Letters, Vol. 105, December 2010, pp. 23550-1-4.
- T. Bauerl, P. Banzer, E. Karimi, S. Orlov, A. Rubano, L. Marrucci, E. Santamato, R. W. Boyd and G. Leuchs, "Observation of Optical Polarization Möbius Strips," Science, Vol. 347, No. 6225, February 2015, pp. 964-966.
- D. Han, S. Pal, Y. Liu and H. Yan, "Folding and Cutting DNA into Reconfigurable Topological Nanostructures," Nature Nanotechnology, Vol. 5, October 2010, pp. 712-717.
- X. Wang, X. Zheng, M. Ni, L. Zou and Z. Zeng, "Theoretical Investigation of Möbius Strips Formed from Graphene," Applied Physics Letters, Vol. 97, September 2010.
- H. Mazidabadi, H. Simchi and M. Esmailzadeh, "Electronic and Magnetic Properties of Graphene Möbius Strips: Density Functional Theory Approach," Journal of Nanoscience and Nanotechnology, Vol. 3, No. 5, September 2014, pp. 268-273.
- Y. N. Fang, Y. Shen, Q. Ai and C. P. Sun, "Negative Refraction Induced by Möbius Topology," Cornell University Library, January 2015.
- A. Poddar, "Slow Wave Resonator Based Tunable Multi-Band Multi-Mode Injection-Locked Oscillator," Habil Thesis, BTU Cottbus, Germany, 2014.
- G. Li and E. Afshari, "A Low Phase Noise Multi-Phase Oscillator Based on Left-Handed LC-Ring," IEEE Journal of Solid State Circuits, JSSC. Vol. 45, No. 9, September 2010, pp. 1822-1833.
- A. Rofougaran, J. Rael, M. Rofougaran and A. Abidi, "A 900 MHz CMOS LC Oscillator with Quadrature Outputs," IEEE International Solid State Circuits Conference, February 1996, pp. 392-393.
- H. Kumar, R. K. Kanth, P. Liljeberg and H. Tenhunen, "Metamaterial Based Slotted Patch Antenna," IEEE 10th International Conference on Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services, Vol. 1, October 2011, pp. 43-46.
- L. La Spada, F. Bilotti and L. Vegni, "Metamaterial Biosensor for Cancer Detection," IEEE Sensors, October 2011, pp. 627-630.
- M. Puentes, M. Maasch, M. Schubler and R. Jakoby, "Frequency Multiplexed 2-Dimensional Sensor Array Based on Split-Ring Resonators for Organic Tissue Analysis," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 60, No. 6, June 2012, pp. 1720-1727.
- J. Baena, J. Bonache, F. Martín, R. Sillero, F. Falcone, T. Lopetegui, M. Laso, J. Garcia-Garcia, I. Gil, M. Portillo and M. Sorolla, "Equivalent Circuit Models for Split-Ring Resonators and Complementary Split-Ring Resonators Coupled to Planar Transmission Lines," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 53, No. 4, April 2005, pp. 1451-1461.
- A. Trehan and N. Nikolova, "Summary of Materials and Recipes Available in the Literature to Fabricate Biological Phantoms for RF and Microwave Experiments," Ph.D. dissertation, McMaster University, ON, Canada, 2009.
- C. Shen, Y. Xie, N. Sui, W. Wang, S. A. Cummer and Y. Jing, "Broadband Acoustic Hyperbolic Metamaterial," Physical Review Letters, Vol. 115, December 2015.