

## 二维圆柱超材料隐身罩的设计和测试

王斌科, 王新华, 顾超, 屈绍波, 裴志斌, 刘嘉  
(空军工程大学理学院, 陕西西安 710051)

**摘要:**基于坐标变换实现隐身的设想,以方形开口谐振环(Split-Ring Resonators, SRRs)为微元主体,设计构造了二维圆柱形隐身超材料罩。利用 CST Microwave Studio 软件在 8.75 GHz 下对不同层超材料的结构单元的尺寸进行了优化设计,实现并加工制作了二维圆柱超材料隐身罩样品,通过自行设计的平面波导系统测试了其隐身效果。测试结果表明:利用所设计的超材料制作的隐身罩具有较好的隐身效果。该项研究具有一定的应用价值和实际可行性。

**关键词:**开口谐振环;磁导率;坐标变换;隐身罩

**DOI:**10.3969/j.issn.1009-3516.2010.01.010

**中图分类号:** TN01;O441 **文献标识码:** A **文章编号:**1009-3516(2010)01-0078-04

超材料(Metamaterials)<sup>[1]</sup>是指人们根据电磁学理论推导计算所设计制作出来具有非常规电磁属性的人造媒质或材料,在自然界中本身并不存在或没有被发现。由于超材料表现出许多与常规材料迥然不同的电磁性质,有着极为广阔的应用前景,因此,在固体物理、材料科学、光学和应用电磁学等领域引起普遍关注。

Pendry<sup>[2]</sup>提出基于坐标变换实现隐身的设想,并推导了实现特定结构隐身所要求的材料的介电常数和磁导率的分布方程——参数方程;2006年9月,美国 Duke 大学的 Cummer 等人<sup>[3]</sup>用数值模拟方法对圆柱隐身罩进行了全波仿真;2006年11月,Duke 大学的 Schurig 等人<sup>[4]</sup>设计了微波段的圆柱超材料隐身罩,并测试了其隐身效果;2007年,Zolla 等人<sup>[5]</sup>对圆柱超材料隐身罩进行了电磁分析;Ruan 等人<sup>[6]</sup>研究了细微扰动对圆柱隐身罩隐身效果的影响;Chen 等人<sup>[7]</sup>从基本电磁理论着手,运用 Mie 散射模型,严格地计算了整个空间的电磁场的解析表达式,证明了理想圆柱隐身罩的零散射截面特性;Cummer 等人<sup>[8]</sup>讨论了用实验来验证声学超材料隐身罩的可能性。

利用超材料实现隐身<sup>[9-10]</sup>,其隐身机理是透射。外部的雷达波在超材料罩中绕行并透射,如果透射率足够高,雷达就检测不到回波,这样就对罩内物体实现了隐身。传统的吸波隐身是通过吸波材料来吸收雷达波、减少回波的方法来实现的,利用这种方法虽然单基雷达接收不到回波,但可以通过双基雷达来确定其位置,从而不具有真正意义上的隐身。比较透波和吸波 2 种隐身机理,可以看出透波隐身在反雷达跟踪方面更有优势。

本文主要根据 Pendry 的理论和 Schurig 等人所做的工作,利用方形 SRRs 环作为基本的超材料结构单元对二维圆柱隐身所要求的超材料进行设计,并加工制作了二维圆柱超材料隐身罩样品。测试结果表明,基于超材料的透波隐身效果良好。

### 1 隐身罩的设计

#### 1.1 参数方程

利用坐标变换  $r' = \frac{b-a}{b}r + a, \theta' = \theta, z' = z$ , 其中  $r, \theta, z$  和  $r', \theta', z'$  为柱坐标,分别对应变换前后的坐标系;

\* 收稿日期:2009-06-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10474077;50632030);陕西省自然科学基金资助项目(2006E1135)

作者简介:王斌科(1964-),男,陕西岐山人,副教授,主要从事光电材料应用研究. E-mail:wbk93@163.com

$a, b$  分别为圆柱隐身罩的内外半径, 可以将原坐标系下的圆形区域 ( $0 < r < b$ ) 变换成新坐标系下的环形区域 ( $a < r' < b$ )。

根据 Pendry 等人的理论<sup>[2]</sup>, 采用坐标变换可以获得相应的二维圆柱隐身罩的参数方程如下:

$$\begin{cases} \epsilon_r = \mu_r = \frac{r-a}{r} \\ \epsilon_\theta = \mu_\theta = \frac{r}{r-a} \\ \epsilon_z = \mu_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \frac{r-a}{r} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \mu_z$  分别表示等效介电常数的径向, 极角方向和  $Z$  向分量;  $\mu_r, \mu_\theta, \epsilon_z$  分别表示对应的等效磁导率分量。根据电磁波的极化方式, 二维空间中的电磁波传播可以分为 TE 波极化和 TM 波极化。在 TE 波模式下, 有效的电磁参数可简化成 3 个, 即  $\mu_r, \mu_\theta, \epsilon_z$ 。相应的 TM 波模式下的有效电磁参数为  $\epsilon_r, \epsilon_\theta, \mu_z$ 。简单起见, 在这里只考虑 TE 波极化的情况。经过散射理论推导发现式(1)可以等效于以下 2 式:  $\mu_r \cdot \epsilon_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2$ ,  $\mu_\theta \cdot \epsilon_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2$ ; 从以上 2 式中, 可以作如下简化, 令  $\mu_\theta = 1$ <sup>[3]</sup>, 则可得相关的材料参数:

$$\begin{cases} \mu_r = \left(\frac{r-a}{r}\right)^2 \\ \mu_\theta = 1 \\ \epsilon_z = \left(\frac{b}{b-a}\right)^2 \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 二维圆柱隐身罩的整体结构设计

经过仿真优化参数, 可得到当  $a = 27.07 \text{ mm}, b = 52.55 \text{ mm}$  时隐身效果比较理想。将二维圆柱隐身罩设计成 9 层均匀分布圆环结构, 见图 1。根据式(2)可以计算出各层超材料的介电常数和磁导率张量, 见表 1。

表 1 各层的介电常数和磁导率张量

Tab.1 The permittivity and permeability tensors of the invisible cloak layer

电磁参数	层数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu_\theta$	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\epsilon_z$	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25
$\mu_r$	0	0.011	0.036	0.068	0.102	0.137	0.171	0.204	0.235

### 1.3 超材料设计

如图 2 所示, 采用方形 SRRs 作为基本的结构单元, 其结构参数是根据表 1 的结果, 采用 CST Microwave Studio 软件进行超材料的设计和优化, 最后选取和表 1 结果匹配最好的结构单元, 其相关参数为: 周期为  $a = 3.33 \text{ mm}$ , SRRs 的外环边长为  $r$ , 线宽为  $c$ , 开口宽度为  $w$ , 环间距  $d = 0.18 \text{ mm}$ , 板材选用高频板 Rogers RT5870 ( $\epsilon_r = 2.33$ )。

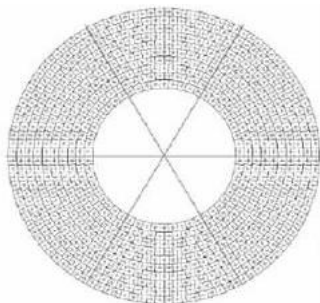


图 1 超材料罩整体结构示意图  
Fig.1 The structure illumination of the invisible cloaks

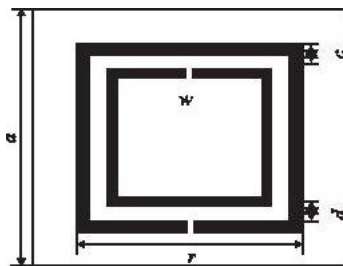


图 2 超材料结构单元示意图  
Fig.2 The unit cell illumination of the meta-material structure

根据表 1 中各层超材料介电常数和磁导率张量的要求,利用 CST Microwave Studio 软件在 8.75 GHz 下对各层超材料结构单元的尺寸进行优化设计,最终数据见表 2。

表 2 8.75 GHz 下各层 SRRs 的尺寸与对应的介电常数和磁导率张量

Tab.2 The dimension and the corresponding permittivity and permeability tensors of the SRRs layers at 8.75 GHz

数据	层数								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$w$	0.12	0.117	0.117	0.2	0.15	0.15	0.15	0.155	0.15
$c$	0.2	0.197	0.189	0.165	0.165	0.165	0.142	0.129	0.114
$r$	3.04	3.04	3.04	3.045	3.05	3.05	3.05	3.055	3.055
$\mu$	0.001 3	0.012	0.036	0.068	0.101	0.137	0.171	0.204	0.235
$\epsilon_z$	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25	4.25

## 2 测试系统

测试系统由矢量网络分析仪、平板波导系统、二维运动平台和控制计算机组成。该系统放置于测试平台上,计算机在整个测试系统中是控制中心,控制着二维平台的运动和网络分析仪对平板波导内电磁场幅度和相位的测试,见图 3。

为了测试二维圆柱隐身罩的隐身效果,将一个半径为 27 mm 的铜柱放在二维圆柱隐身罩的中央,整体放置于平板波导中。平板波导由上下 2 块平行金属板构成,两板间距 11 mm(隐身罩的高度是 10 mm)。上金属板设置一个同轴探测天线,用来测试平板波导内的场分布,下金属板固定在一个二维运动平台上,通过二维运动平台的运动来实现对平板波导内各个位置电磁场的测试。电磁波通过连接在平板波导前方的同轴波导转换器馈入。平板波导左右及后部放置有吸波材料,用来消除波导边缘的影响,尽可能使平板波导内部为均匀传播的平面波。计算机控制着二维平台的运动,并记录矢量网络分析仪的测试数据。

利用表 2 设计的超材料,加工并制作了二维超材料隐身罩样品,见图 4。用上述的测试方法对二维圆柱隐身罩样品进行了测试,得到 8.75 GHz 下平板波导内电磁场的相位分布图,见图 5。

由图 5 可见,在 8.75 GHz 下电磁波绕过罩内物体向前传播,且出射电磁波的波前形状基本不变,说明在该频率下圆柱隐身罩对罩内物体具有较好的隐身效果。

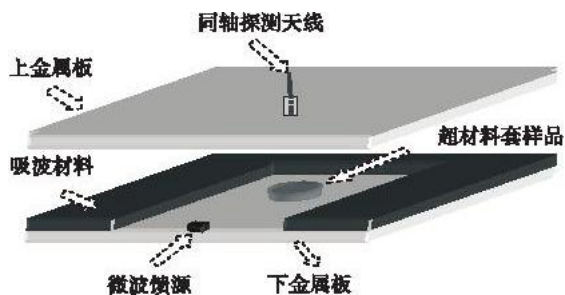


图 3 测试原理示意图

Fig.3 The illumination of the measurement principle

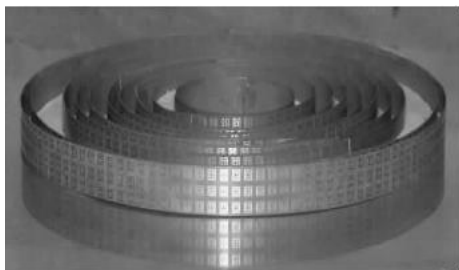


图 4 二维圆柱超材料隐身罩样品

Fig.4 The two-dimensional cylindrical meta-material invisible cloak sample

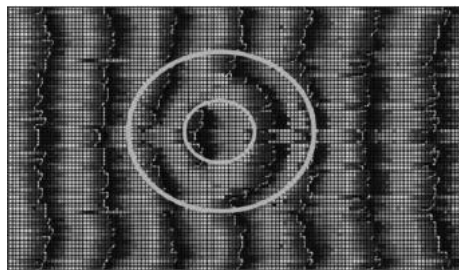


图 5 8.75 GHz 下平板波导内电磁场的相位分布图

Fig.5 The phase distribution of the electromagnetic field in the plane wave-guide at 8.75 GHz

## 3 结论

本文主要根据 Pendry 的理论和 Schurig 等人所作的工作,利用方形的 SRRs 环作为基本的超材料结构单元设计了二维圆柱隐身所要求的超材料,并用它构造了二维圆柱超材料隐身罩样品。测试结果表明:J. B.

Pendry 等人的理论是正确的,根据其理论设计的隐身罩具有一定的隐身效果。

### 参考文献:

- [ 1 ] Lai A, Itoh T, Caloz C. Composite Transmission Line Metamaterials [J]. Microwave Magazine, IEEE, 2004, 5(3):34 – 50.
- [ 2 ] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling Electromagnetic Field [J]. Science, 2006, 312:1780 – 1782.
- [ 3 ] Cummer S A, Popa B L, Schurig D, et al. Smith, Full – wave Simulations of Electromagnetic Cloaking Structures [J]. Phys Rev E, 2006, 74:036621.
- [ 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 ] Zolla F, Guenneau S, Nicolet A, et al. Electromagnetic Analysis of Cylindrical Invisibility Cloaks and the Mirage Effect [J]. Optics Letters, 2007, 32(9):1069 – 1071.
- [ 6 ] Ruan Zhichao, Yan Min, Neff Curtis W, et al. Ideal Cylindrical Cloak: Perfect but Sensitive to Tiny Perturbations [J]. Physical Review Letters, 2007, 99(11):113903.
- [ 7 ] Kemp B A, Grzegorzczak T M, Kong J A. Optical Momentum Transfer to Absorbing Mie Particles [J]. Phys Rev Lett, 2006, 97 (13):133902.
- [ 8 ] Steven A Cummer, David Schurig. One Path to Acoustic Cloaking [J]. New Journal of Physics, 2007, 9(3):45.
- [ 9 ] 裴志斌, 顾超, 屈绍波, 等. 自由空间法测试超材料的电磁参数[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9(5):67 – 70.  
PEI Zhibin, GU Chao, QU Shaobo, et al. Measurement of Electromagnetic Parameters of Metamaterials by Free – Space Method [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(5):67 – 70. (in Chinese)
- [ 10 ] 张介秋, 陈必武, 赵威, 等. 超材料圆柱壳电磁隐身效果数值仿真研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2008, 9 (3):67 – 70.  
ZHANG Jieqiu, CHEN Biwu, ZHAO Wei, et al. Numerical Analysis of Metamaterial Cylindrical Shells Electromagnetic Invisibility Performance [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(3):67 – 70. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## The Design and Measurement of Two – dimensional Cylinder Metamaterial Cloak

WANG Bin – ke, WANG Xin – hua, GU Chao, QU Shao – bo, PEI Zhi – bin, LIU Jia  
(Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Based on the coordinate transformation theory, this paper utilizes the square Split – Ring Resonators as the unit cell main body and designs a two – dimensional invisible cloak. The CST Microwave Studio is used to optimize the different layers' structure of the invisible cloak with the frequency of 8.5 GHz. The designed two – dimensional invisible cloak is fabricated and measured by the plane wave – guide system. The measured result verifies that the cloak made by the designed metamaterial has a better invisible capability. This research gives a realizable way which makes the things inside the cloak unable to be detected.

**Key words:** split ring resonators; permeability; coordinate transformation; cloak