

超材料圆柱壳电磁隐身效果数值仿真研究

张介秋¹, 陈必武¹, 赵威², 马华¹

(1. 空军工程大学理学院, 陕西西安 710051; 2. 西安电子科技大学天线与微波技术国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要:以无限长超材料圆柱壳为理论模型,研究隐身超材料这种新型人工复合材料。基于Pendry坐标变换法,在压缩柱坐标系中,分析理想超材料电磁参数分布特性。为满足透波隐身,圆柱壳材料相对电容率和磁导率均是二阶旋转对称张量,在内界面处各向异性程度最高,参数径向分量趋于无限大,强烈抑制该方向电磁波的传播。运用全波仿真方法,从场总能量密度分布角度,比较研究了理想超材料与分层超材料、有耗超材料圆柱壳的电磁隐身效果,结果表明超材料具有良好的透波隐身性能。最后,针对隐身结构实际使用环境,对各向同性介质空间隐身圆柱壳的参数设置作了说明。

关键词:隐身超材料;各向异性程度;隐身效果;全波仿真

中图分类号: O044 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2008)03-0067-04

超材料是近十年来国际上的新兴研究热点之一。超材料通常是指具有天然材料所不具备的超常物理性质的人工复合结构或复合材料^[1]。在国内外,负折射率介质^[2-4]、隐身超材料^[5-6]研究发展迅速,在微波段用SRR结构模拟电磁隐身结构已获得实验成功^[7]。目前,隐身超材料的设计方法日趋成熟,主要有Pendry坐标变换法^[8]和光路映射法^[9]。进一步对隐身超材料的特殊电磁性质、复杂电磁环境下隐身效能以及具体物质载体的研究成为热点问题^[10]。

1 隐身超材料

1.1 透波隐身

超材料隐身技术采用的是透波隐身原理。简单理想隐身模型是一定厚度的无限长超材料圆柱壳,内置任意物体。当圆柱壳介质电磁参数满足需要的分布规律时,垂直入射的外界电磁波进入超材料壳后,被引导而弯曲并绕过内部物体,最后在超材料壳的外表面按原来入射的方向出射,这样,壳内任何形状的物体都不会被探测到,从而达到隐身目的。

1.2 理想隐身圆柱壳介质电磁参数

以无耗超材料圆柱壳为隐身模型,其内外界面半径分别为 R_1 和 R_2 ,电磁波垂直入射时可以降为二维情况进行分析。在笛卡儿坐标系 $S(x, y, z)$ 中建立压缩柱坐标系 $S(\rho, \phi, z)$,基矢为 $\hat{\rho}, \hat{\phi}, \hat{z}$ 。基于Maxwell方程形式不变性^[11],运用空间坐标变换方法,将圆域($\rho \leq R_2$)变换到环域($R_1 \leq \rho \leq R_2$),推导出自由空间中隐身圆柱壳介质的材料方程,将相对电容率张量 $\bar{\epsilon}_r$ 、相对磁导率张量 $\bar{\mu}_r$ 记成柱坐标 (ρ, ϕ, z) 形式^[8]为

$$\bar{\epsilon}_r = \begin{bmatrix} \epsilon_\rho & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_\phi & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_z \end{bmatrix}, \quad \bar{\mu}_r = \begin{bmatrix} \mu_\rho & 0 & 0 \\ 0 & \mu_\phi & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2007-09-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10474077);空军工程大学理学院首批科技资助项目

作者简介:张介秋(1962-),男,广东澄海人,教授,博士生导师,主要从事电子材料、高精度谐波分析等研究。

E-mail: chenbiwu@gmail.com

在数值上 $\epsilon_p = \mu_p = 1 - \frac{R_1}{\rho}$, $\epsilon_\phi = \mu_\phi = \frac{1}{\epsilon_\rho}$, $\epsilon_z = \mu_z = \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1}\right)^2 \epsilon_\rho$, 即理想隐身圆柱壳介质参数满足旋转对称性。根据(1)式, 在外界面 R_2 处, 介质参数张量分量满足关系 $\epsilon_\phi = \epsilon_\rho = \frac{1}{\epsilon_z}$, 是完美匹配边界条件, 因此电磁波入射时不发生反射现象。

2 隐身超材料介质特性

隐身圆柱壳介质电磁参数的柱坐标表示式(1)中, 理想隐身超材料是双各向异性材料, 介质相对电磁参数都为二阶实对称张量, 各分量均是半径 ρ 的函数, 且呈连续非均匀分布。当超材料圆柱壳结构参数为 $R_1 = 0.6 \text{ m}$ 、 $R_2 = 1 \text{ m}$ 时, 观察式(1)相对电容率 $\bar{\epsilon}_r$ 、相对磁导率 $\bar{\mu}_r$ 的分量与归一化半径 ρ/R_2 的关系, 如图 1 所示。可见, 在圆柱壳任意半径 ρ 处, 各分量大小始终满足关系 $\epsilon_\phi \geq \epsilon_z \geq \epsilon_\rho$, 特别地, 在圆柱壳内界面 R_1 处, ϵ_ϕ 趋于无穷大值, ϵ_ρ 、 ϵ_z 等于零。

对于超材料的各向异性, 定义各向异性程度因子 AD 如下:

$$AD = \frac{\epsilon_\phi}{\epsilon_\rho} = \left(1 + \frac{R_1}{\rho - R_1}\right)^2 \geq 1 \tag{2}$$

由式(2)可知, 理想隐身超材料是高度双各向异性介质, 因子 AD 是半径 ρ 的递减函数, 在内界面 R_1 处 AD 趋于无穷大, 强烈抑制电磁波沿柱坐标系基矢 $\hat{\rho}$ 方向的传播。图 2 为数值变化情况。

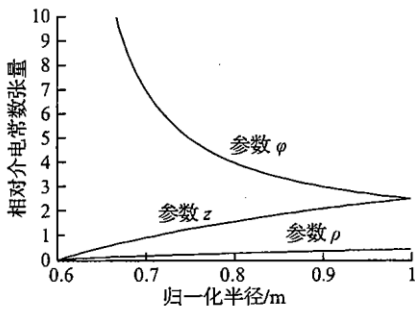


图 1 隐身圆柱壳介质电磁参数分布
Fig. 1 Distribution of ideal metamaterial cylindrical shell's material parameters

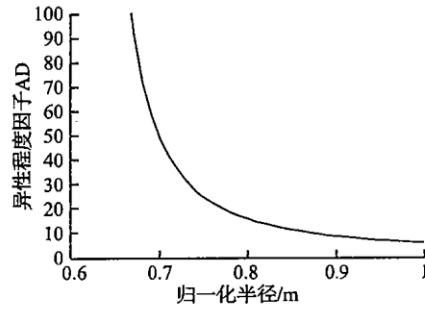


图 2 超材料各向异性程度因子 AD
Fig. 2 Metamaterial's anisotropic degree AD

3 圆柱壳隐身效果仿真

基于 Maxwell 方程的 Pendry 坐标变换法, 理论推导适应于所有频段的电磁波, 运用全波仿真方法^[12]和 COMSOL Multiphysics 软件 RF(Radio Frequency)功能模块, 观察 0.6 GHz 平面 TE 波经超材料圆柱壳的传播轨迹, 从等相位面、相对总能量密度分布方面分析隐身效果。

3.1 仿真模型

平面电磁波垂直圆柱壳轴线方向入射时, 建立仿真模型如图 3 所示, 超材料圆柱壳横截面参数与图 1 对应结构一致, 计算矩形区域高为 4 m, 宽为 5 m, 圆柱壳置于区域中心。平面波从电磁计算区域的左侧端口入射, 入射能量功率量级为 1 W, 从右侧端口出射。同时, 为模拟无限空域, 将上下边界设置成完美磁导边界 $\hat{n} \times \bar{H} = 0$, 圆柱壳内外界面设置成连续边界 $\hat{n} \times (\bar{H}_1 - \bar{H}_2) = 0, \hat{n} \times (\bar{E}_1 - \bar{E}_2) = 0$ 。

3.2 理想材料隐身效果仿真

超材料圆柱壳介质电磁参数按照式(1)设置, 将电磁计算区域剖分 24 万个单元, 计算结果如图 4。从电磁场等相位面传播情况可以看出, 真空中超材料圆柱壳不改变出射平面电磁波的传播轨迹, 导波作用等同于自由空间, 并且圆柱壳包围区域($\rho < R_1$)不存在电磁场。因此, 对被圆柱壳包围的任意物体, 超材料圆柱壳起到隐身作用。

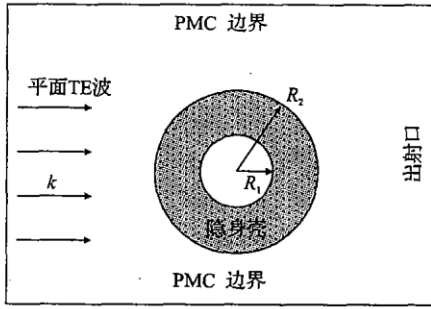


图3 超材料圆柱壳隐身效果仿真模型
Fig.3 Simulation model of cylindrical shells invisibility performance

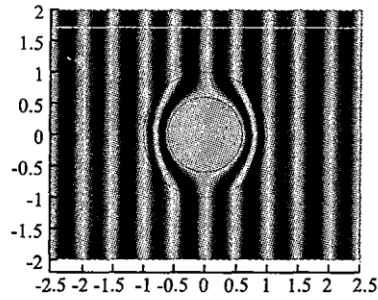


图4 平面 TE 波在超材料圆柱壳中的传播
Fig.4 Transmission of plane TE wave in ideal metamaterial cylindrical shell

3.3 分层圆柱壳隐身效果

理想超材料是连续非均匀介质,实际制造很难实现,需采用离散近似处理方法。将理想无耗圆柱壳分成八等份,按照式(1)在各等厚层中间位置取值,具体如表1。作图5,观察电磁计算区域相对平均总能量密度分布情况,纵轴为电磁场相对平均总能量密度,横轴为场点距计算区域中心的距离。比较分层近似超材料圆柱壳与理想情况的分布特性,可知,在同等辐射条件下,分层圆柱壳包围区域的场强增大大约 80 dB,但比同情况下壳外区域($\rho > R_2$)低约 20 dB,可以认为受入射电磁波干扰较小。

电磁波垂直入射时,数值积分大小相等的计算区域,得出理想和分层情况下,圆柱壳包围区域、壳内部($R_1 < \rho < R_2$)以及壳外区域所占能量百分比分别为 0、15.70%、84.30%和 0.02%、14.84%、85.14%。因此,适当离散近似,透射圆柱壳包围区域的能量在一个较低水平,圆柱壳仍能保持良好的隐身效果。

表1 8等份超材料圆柱壳的电磁参数

Tab.1 Material parameters for eight layered metamaterial cylindrical shell

层次	第1层	第2层	第3层	第4层	第5层	第6层	第7层	第8层
μ_p	0.040 0	0.111 1	0.172 4	0.225 8	0.272 7	0.314 3	0.351 4	0.384 6
μ_ϕ	25.000	9.000	5.800 0	4.428 6	3.666 7	3.181 8	2.846 2	2.600 0
ϵ_z	0.250 0	0.694 4	1.077 6	1.411 3	1.704 5	1.964 3	2.195 9	2.403 8

3.4 有耗超材料隐身效果

材料总存在一定的极化损耗或传导损耗,吸收掉部分入射波能量。综合考虑各种损耗因素,将理想超材料参数式(1)记为复数形式

$$\bar{\epsilon}_r^* = (1 - itan\alpha)\bar{\epsilon}_r, \bar{\mu}_r^* = (1 - itan\beta)\bar{\mu}_r \quad (3)$$

式中, $tan\alpha$ 、 $tan\beta$ 为电、磁损耗角正切,取值为

0.01 时,电磁场相对平均总能量密度分布如图5。与理想情况相比,存在低损耗时,仅圆柱壳包围区域相对总能量密度增大大约 20 dB,但比同情况下壳外区域低约 90 dB,其它区域曲线保持一致,隐身效果变化可以忽略。

3.5 各向同性介质空间

通过坐标变换法推导得出的电磁参数式(1)仅适应于真空情况,为扩大隐身结构应用场所,考虑其它各向同性介质空间环境,全波仿真下需对应调整材料参数 $\bar{\epsilon}_r, \bar{\mu}_r$ 。如将超材料圆柱壳置于相对电容率和相对磁导率分别为 a 与 $1/a$ 的均匀介质中,为达到透波隐身效果,根据 Pendry 坐标变换法,圆柱壳介质参数必须调整为

$$\epsilon_\rho = a\left(1 - \frac{R_1}{\rho}\right), \epsilon_\phi = \frac{a\rho}{\rho - R_1}, \epsilon_z = a\left(\frac{R_2}{R_2 - R_1}\right)^2 \left(1 - \frac{R_1}{\rho}\right) \quad (4a)$$

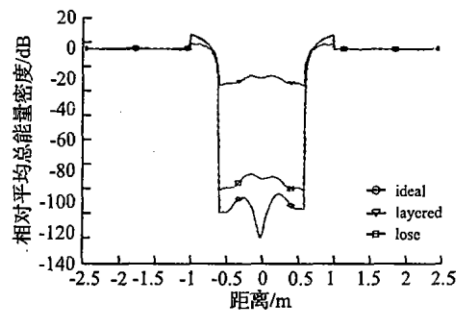


图5 计算区域电磁场总能量密度分布
Fig.5 Distribution of total energy density in cylindrical shell's near field

$$\mu_\rho = \frac{1}{a} \left(1 - \frac{R_1}{\rho}\right), \mu_\phi = \rho/a(\rho - R_1), \mu_z = \frac{1}{a} \left(\frac{R_2}{R_2 - R_1}\right)^2 \left(1 - \frac{R_1}{\rho}\right) \quad (4b)$$

4 结论

在电磁领域,这些材料具有负折射率,从而为控制电磁波、实现特定频段电磁隐身提供了可能。在自由空间中,为实现透波隐身,基于 Maxwell 方程形式不变性,运用 Pendry 坐标变换法设计超材料圆柱壳介质电磁参数。分析表明,理想隐身超材料是高度双各向异性介质,圆柱壳电磁参数呈连续非均匀分布,在内界面处强烈抑制沿径向传播的电磁波,确保被包围区域不受外界电磁波干扰。文章在全波仿真条件下,模拟平面波在超材料圆柱壳中的传播,比较电磁计算区域相对总能量密度分布情况,证明了超材料隐身技术的理论可行性。结合实际运用电磁环境,对超材料介质参数做出相应调整,隐身效果仍然显著。

参考文献:

- [1] Wood B. Structure and Properties of Electromagnetic Metamaterials[J]. *Laser & Photo Rev*, 2007, (3): 1 - 11.
- [2] Smith D, Pendry J B, Wiltshire M C K. Metamaterial and Negative Refraction Index[J]. *Science*, 2004, 305: 788 - 791.
- [3] Eleftheriades G V, Balmain K G. Negative - Refraction Materials: Fundamental Principles and Applications[M]. New York: Wiley. 2005.
- [4] Smith D R, Padilla W J, Vier D C, et al. Composite Medium with Simultaneously Negative Permeability and Permittivity[J]. *Phys Rev Lett*. 2000, 84: 4184 - 4189.
- [5] David Miller A B. On Perfect Cloaking[J]. *Opt Express*, 2006, 14(25): 12457 - 12466.
- [6] Leonhart U. Notes on Conformal Invisibility Devices[J]. *New J Phys*, 2006, 8: 118 - 120.
- [7] Schurig D, Mock J J, Justice B J, et al. Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies [J]. *Science*, 2006, 314: 977 - 980.
- [8] Pendry J B, Schurig D, Smith D R. Controlling Electromagnetic Fields[J]. *Science*, 2006, 312: 1780 - 1782.
- [9] Leonhardt U. Optical Conformal Mapping[J]. *Science*, 2006, 312: 1777 - 1780.
- [10] Schurig D, Pendry J B, Smith D B. Calculation of Material Properties and Ray Tracing in Transformation Media[J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 9794 - 9804.
- [11] Milton G W, Briane M, Willis J R. On Cloaking for Elasticity and Physical Equations with A Transformation Invariant Form [J]. *New J Phys*, 2006, 8: 248 - 267.
- [12] Cummer S A, Popa B I, Schurig D, et al. Full - wave Simulations of Electromagnetic Cloaking Structures[J]. *Phys Rev E*, 2006, 74: 36621 - 36624.

(编辑:田新华,徐楠楠)

Numerical Analysis of Metamaterial Cylindrical Shell's Electromagnetic Invisibility Performance

ZHANG Jie - qiu¹, CHEN Bi - wu¹, ZHAO Wei², MA Hua¹

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. State Key Laboratory of Antenna and Microwave Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Metamaterial for invisibility is a new class of artificial functional material. This paper takes infinite concentric cylindrical shell as stealth model. First, the distribution and high bianisotropic properties of metamaterial for invisibility are analyzed in squeezed cylindrical coordinate system. Second, the invisibility performances of cylindrical shell of the ideal, layered and lose materials are simulated according to full - wave simulation method, the distribution of relative total energy density demonstrates that the metamaterial cylindrical shells are perfect in invisibility performance. Finally, usage in other isotropic electromagnetic environment is introduced according to Pendry coordinate transformation method.

Key words: metamaterial for invisibility; invisibility performance, anisotropic degree, full - wave simulation