

文章编号 1005-0388(2005)06-0840-04

# 单层圆柱磁性天线罩的电磁特性分析<sup>\*</sup>

官正涛 杨儒贵

(西南交通大学电磁所, rgyang@swjtu.edu.cn, 四川 成都 610031)

**摘要** 利用复射线近轴近似法分析二维圆柱形磁性天线罩的电磁传输特性。分析了天线罩对罩内的雷达天线性能的影响。讨论了天线罩引起的传输系数和角跟踪性能的变化。数值结果表明, 相对介电常数和相对磁导率相等的磁性天线罩具有最佳的电磁传输特性。

**关键词** 天线罩, 复射线, 传输特性

中图分类号 TN821<sup>+</sup>.2 文献标识码 B

## Analysis of electromagnetic performance of cylindrical magnetic radome

GUAN Zheng-tao YANG Ru-gui

(Electromagnetics Institute, Southwest Jiaotong University,  
rgyang@swjtu.edu.cn, Chengdu Sichuan 610031, China)

**Abstract** The electromagnetic transmission performance of a 2-D cylindrical magnetic radome is analyzed by complex ray paraxial approximation method in this paper. The effect of radome on performance of radar antenna, radome transmission coefficient and radar angular track property are simulated. It is shown that radomes have the most optimized transmission performances if the relative permittivity of organic magnetic material equals to the relative permeability.

**Key words** radome, complex ray, transmission performance

## 1 引言

复射线理论为分层媒质中高斯波束的传播和散射提供了一种十分有效的分析方法<sup>[1~4]</sup>。利用复射线理论可以避免场的积分运算, 十分简便地分析雷达天线波束通过天线罩的传输及散射问题<sup>[5]</sup>。对于口径尺寸远大于波长的微波天线, 其远场方向图的主波束可以很好地近似为一个复源点产生的高斯波束。当这种天线用于航空或航天电子设备时, 为满足空气动力学要求, 天线外必须装有由介质壳构成的天线罩。

天线罩材料一般为电介质材料, 材料电参数只具有电特性, 而不具有磁特性, 即相对介电常数可根

据需要而改变, 但是磁导率恒为真空磁导率, 导致材料固有波阻抗小于自由空间波阻抗。根据传输线原理, 在电介质材料与空气界面上总是存在反射。新型有机磁性材料具有轻质、低磁耗、很宽温度下磁参数稳定及易加工和抗辐照、抗老化等特点<sup>[6]</sup>, 并且这种磁性材料的相对介电常数和相对磁导率处在同一数量级, 当它们相等时, 材料的固有波阻抗等于空间波阻抗, 大大减小了界面上的反射, 因此, 有机磁性材料是一种很有潜力的天线罩材料。

采用简化的复射线近轴近似法<sup>[7,8]</sup>讨论有机磁性材料天线罩的传输特性, 研究天线罩电气特性与有机磁性材料电参数之间的关系, 以便优化磁性材料的电参数。这里的电参数包括相对介电常数、相

\* 收稿日期: 2004-05-10.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(2103400/2)

对磁导率、电损耗角正切和磁损耗角正切。

## 2 理论推导

设圆柱天线罩的内、外半径分别为  $a_1$  和  $a_2$ ,介质罩的介电常数为  $\epsilon_2$ ,磁导率为  $\mu_2$ ,折射系数为  $n_2 = \sqrt{\frac{\epsilon_2 \mu_2}{\epsilon_0 \mu_0}}$ ,如图 1 所示。设罩内雷达天线的相位中心位于 S 点,其坐标为  $(0, h)$ 。根据复射线理论<sup>[1~4]</sup>,将源点 S 解析延拓到复空间  $\tilde{S}$  点后,由复源点  $\tilde{S}$  在实空间内产生的高斯波束场,可以很好地用来近似表示定向辐射的雷达天线主波束。复源点  $\tilde{S}$  的复坐标  $(\tilde{x}_s, \tilde{y}_s)$  和  $(\tilde{\rho}_s, \tilde{\phi}_s)$  分别为

$$\begin{cases} \tilde{x}_s = 0 - jb \sin \alpha_0 \\ \tilde{y}_s = h - jb \cos \alpha_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \tilde{\rho}_s = \sqrt{\tilde{x}_s^2 + \tilde{y}_s^2}, \operatorname{Re} \tilde{\rho}_s \geq 0 \\ \tilde{\phi}_s = \arctan\left(\frac{\tilde{y}_s}{\tilde{x}_s}\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中  $b$  是由天线主波束宽度决定的复源点波束宽度参量;  $\alpha_0$  为复源点波束轴向(即天线主波束最大值方向)与  $y$  轴之间的夹角,称为波束指向角。

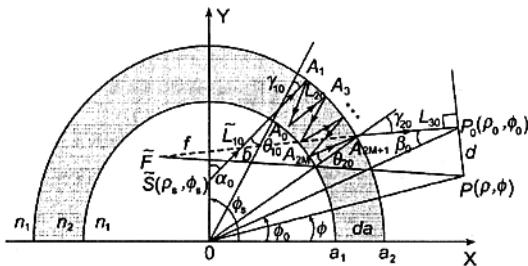


图 1 单层圆柱天线罩和复射线轨迹

为避免复射线轨迹搜索<sup>[5]</sup>,采用近轴近似方法<sup>[7,8]</sup>来分析天线罩的传输特性,即利用微扰原理对沿波束轴向出射的复射线上的观察点  $P_0$  处的场  $\tilde{U}_{M0}$  进行复相位校正,从而求得偏离轴线的任意观察点  $P$  处的近似场(本文采用的时间因子为  $e^{j\omega t}$ ,与文献[1~5,7,8]不同)  $\tilde{U}_M$ :

$$\tilde{U}_M = \tilde{U}_{M0} e^{-jk_0 \delta} \quad (3)$$

式中  $k_0$  为空气中的电波传播的波数,并且忽略了影响较小的复振幅校正因子,而只保留了复相位校正因子  $\delta$ :

$$\delta \approx \frac{d^2}{2\tilde{D}_{r0}} \quad (4)$$

其中  $d$  表示任意观察点到轴向射线的垂直距离,  $\tilde{D}_{r0}$  表示从等效的镜象复源点  $\tilde{F}$  到对应的轴上观察点  $P_0$  的复射线距离。

利用轴向复射线的实射线属性,可以避免对到达  $P_0$  点的轴向复射线的轨迹搜索,并可简化轴向场  $\tilde{U}_{M0}$  的计算。到达  $P_0$  点的轴向复射线可以在实空间内进行实射线轨迹追踪,并由此十分简便地确定轴向复射线的所有几何参量。经过  $M$  次来回反射后轴向观察点  $P_0$  处的复射线场为

$$\tilde{U}_{M0} = -\omega \mu_0 \sqrt{\frac{j}{8\pi k_0 \tilde{L}_{10}}} \tilde{T}_{M0} \tilde{D}_{M0} e^{-jk_0 \tilde{\phi}_{M0}} \quad (5)$$

式中已假定雷达天线的极化方向平行于  $z$  轴,轴向复射线的总传输系数  $\tilde{T}_{M0}$ ,总扩散系数  $\tilde{D}_{M0}$ ,总复光程  $\tilde{\phi}_{M0}$  分别为

$$\tilde{T}_{M0} = t_{10} t_{20} (r_{10} r_{20})^M \quad (6)$$

$$\tilde{D}_{M0} = \prod_{m=0}^{2M+1} \tilde{d}_{m0} \quad (7)$$

$$\tilde{\phi}_{M0} = \tilde{L}_{10} + (2M+1)n_2 L_{20} + L_{30} \quad (8)$$

其中  $r_{10}$  和  $r_{20}$  分别表示在内外界面上实射线的菲涅尔反射系数,  $t_{10}$  和  $t_{20}$  表示其折射系数,  $\tilde{d}_{m0}$  表示第  $m$  段射线引入的波场振幅扩散系数。这些系数均可通过对轴向复射线的追踪而得到<sup>[7]</sup>。将式(5)代入式(3)便可求得  $P$  点的复射线近轴近似场  $\tilde{U}_M$ :

$$\tilde{U}_M = -\omega \mu_0 \sqrt{\frac{j}{8\pi k_0 (L_{10} + jb)}} \tilde{T}_{M0} \tilde{D}_{M0} e^{-jk_0 (\tilde{\phi}_{M0} + \delta)} \quad (9)$$

## 3 数值结果及讨论

利用上述复射线近轴近似理论计算图 1 所示圆柱天线罩对高斯波束的传输特性的影响,其数值结果如图 2、图 3 所示。本文立足于分析天线罩参数对电波传播的影响。因此,计算分析只考虑高斯波束直接透射场。

图 2 示出了单个二维高斯波束通过圆柱天线罩的传输特性。天线罩的几何参量为: 内半径  $a_1 = 20\lambda_0$ , 罩壁厚度  $\Delta a = a_2 - a_1 = 5\lambda$ (匹配厚度); 复源点参数  $x_s = 0, y_s = 10\lambda_0, b = 200\lambda_0$ , 观察点距离  $\rho = 10000\lambda_0$ (远区)。

图 2 中曲线 1(实线)是没有天线罩时的未扰动高斯波束场分布; 曲线 2(双划线)对应的天线罩材料参数为  $\epsilon_r = 5, \mu_r = 1$ ; 曲线 3(虚线)对应的天线罩材料参数为  $\epsilon_r = 5, \mu_r = 3$ ; 曲线 4(点划线)对应的天线罩材料参数为  $\epsilon_r = 5, \mu_r = 5$ 。由图可见,随着材料相对磁导率的增大,天线罩的存在对天线性能的负面影响减小; 透过天线罩的主波瓣的畸变减小,具体而言,就是波束变窄,增益上升,波束最大值偏移减小,不对称性减小等; 如曲线 2、3、4 所示。随着波束

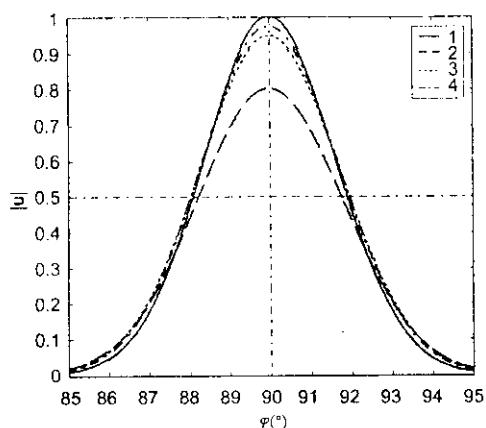
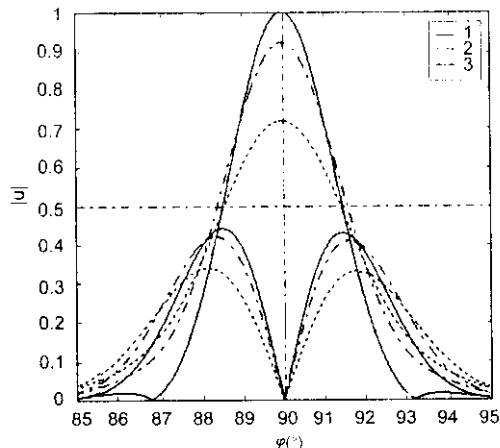
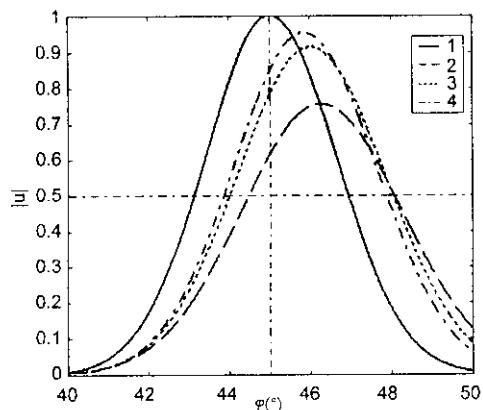
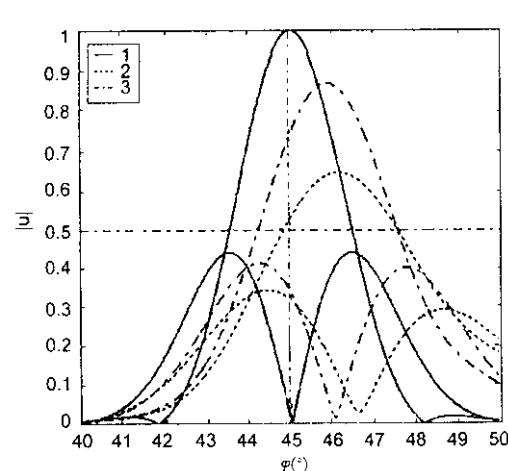
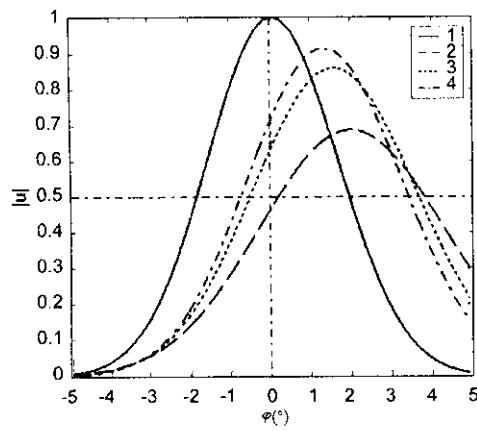
(a) 波束指向角  $\alpha_0 = 0^\circ$ (a) 波束指向角  $\alpha_0 = 0^\circ$ (b) 波束指向角  $\alpha_0 = 45^\circ$ (b) 波束指向角  $\alpha_0 = 45^\circ$ (c) 波束指向角  $\alpha_0 = 90^\circ$ 

图 2 二维高斯波束通过圆柱天线罩的场分布图

指向角  $\alpha_b$  的增大, 波瓣的波束变宽, 增益下降, 波束最大值偏移增大, 不对称性增大; 如子图(a)、(b)、(c)所示。这是由于天线罩是一介质体, 电磁波穿过该介质体会发生折射和反射, 因反射而损失一部分

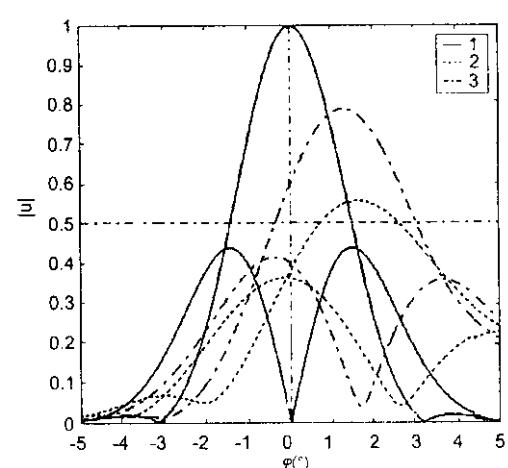
(c) 波束指向角  $\alpha_0 = 90^\circ$ 

图 3 天线罩覆盖的单脉冲相控阵天线和差波束图

该介质体会发生折射和反射, 因反射而损失一部分

能量,使透过率低于 1,从而波瓣峰值下降;波瓣变宽是由于折射而带来最后的叠加场峰值发生偏移。 $\mu_r$  越大,反射系数越小,因而透过率越高,波瓣峰值越大; $\mu_r$  越大,折射率越大,高斯波束通过圆柱天线罩的相位变化越小,波束峰值偏移越小; $\alpha_b$  越大,入射角越大,则等效天线罩厚度越大,透射波的相位变化越大,因而引起的峰值偏移越大;入射角越大,反射系数也越大,波瓣峰值越小。

图 3 是圆柱天线罩覆盖的单脉冲相控阵天线的远场和差波束图。其中图 3 对应的天线罩结构、波束宽度参量和远场观察点距离  $\rho$  都和图 2 对应的相同;不同的是子阵列中心位置  $x_s = \pm 4.5\lambda_0$ ,  $y_s = 10\lambda_0$ 。曲线 1(实线)是没有天线罩的未扰动高斯波束场分布;曲线 2(虚线)对应的材料参数为  $\epsilon_r = 5$ ,  $\mu_r = 3$ ;曲线 3(点划线)对应的材料参数为  $\epsilon_r = 5$ ,  $\mu_r = 5$ 。

由图 3 可见,当  $\alpha_b = 0$  时,天线罩的存在并没有使和波束最大值与差波束零点的位置偏离雷达天线的瞄准轴,差波束的零值深度也不变,但是和波束增益下降,差斜率变坏。在  $\epsilon_r$  与  $\mu_r$  比值越接近 1,或以  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  相等为前提,折射率越大,或罩壁厚度越大的情况下,波束增益越大,差斜率越好。和波束无偏移是由于波束沿法向入射到圆柱天线罩上,入射角为  $0^\circ$ ,由折射定理可知,折射角也为  $0^\circ$ ,即除部分能量被反射外,波束相当于在同一媒质中的直线传播,故和波束的最大值和差波束的零点位置没有偏移。

当  $\alpha_b = 45^\circ$  或  $90^\circ$  时,和波束最大值和差波束零点位置偏移雷达天线的瞄准轴零点,和波束的增益下降,差波束的零深减小和差斜率变坏。 $\epsilon_r$  与  $\mu_r$  比值越接近 1,或当  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  相等时,折射率越大,或罩壁厚度越小,和波束的增益越大,和波束最大值和差波束零点位置的偏移越小;这是由于在上述 3 种条件下,反射系数变小,透射率增大的缘故。 $\epsilon_r$  与  $\mu_r$  比值越接近 1,差波束的零值深度越大,差斜率越好;这是由于对不同的  $\epsilon_r$  与  $\mu_r$  比值,高斯波束场的相位和振幅变化量不同,因而引起零深和差斜率都变化。当  $\epsilon_r$  和  $\mu_r$  相等时,折射率的变化不影响差波束的零值深度,只改变差斜率,即折射率大,则差斜率小。差斜率和零深变化是受天线罩折射和反射的

影响,使相位和振幅发生变化而引起的。

## 4 结论

以复射线近轴近似法分析了二维圆柱天线罩对天线方向图主波瓣的影响。数值结果表明,相对磁导率和相对介电常数相等的磁性材料是最理想的天线罩材料。同时也证明了复射线方法简单易行。但作者的工作还有待于进一步深入。例如,单层磁性材料圆柱天线罩对天线方向图副瓣的影响,以及多层、三维、任意曲面磁性天线罩对天线方向图的影响等。

## 参考文献

- [1] 阮颖铮. 复射线理论和应用[J]. 通信学报, 1987, 8(4): 49~51.
- [2] 阮颖铮. 电磁场问题的射线分析[J]. 成都电讯工程学院学报, 1986, 15(3): 83~84.
- [3] P D Einziger, L B Felson. Ray analysis of two-dimensional radomes[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1983, 31(6): 870~884.
- [4] 林为干, 等. 射线理论的新进展[J]. 电子学报(增刊), 1987, 468~469.
- [5] X J Gao, L B Felson. Complex ray analysis of beam transmission through 2-D radomes[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat., 1985, 33: 963~975.
- [6] 林展如, 等. 新型有机磁性材料及其在微波领域的应用[J]. 微波学报, 1999, 15(4): 329~333.
- [7] Y Z Ruan, L B Felson. Reflection and transmission of beams at a curved Interface[J]. J. Opt. Soc. Am. A., 1986, 3: 566~579.
- [8] 阮颖铮, L B 费尔森. 天线罩覆盖的波束近轴场[J]. 成都电讯工程学院学报, 1987, 16(4): 311~316.

官正涛 男, 分别于 2001 年、2004 年获西南交通大学工学学士和硕士。现在中国电子科技集团第十研究所工作,主要从事天线设计与制造。

杨儒贵 男, 毕业于西安交通大学无线电工程系。现任西南交通大学教授、博士生导师。曾赴美国 University of Illinois at Urbana-Champaign 访问及工作六年。主要从事电磁理论、天线理论与设计等教学与科研工作。主持过多项国家级项目的研究。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…

---



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

---

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>

---



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com))，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>