

磁性平板功率系数和插入相位移研究

李高生* 贾蕾 明永晋 曹群生

(南京航空航天大学电子信息工程学院 南京 210016)

摘要: 该文采用电磁波反射、透射和传输线理论,建立了分析磁性平板功率传输系数和计算插入相位移的方法,给出了消除“退极化”现象天线罩材料电磁参数必须满足的数学公式。计算和分析了单层和典型 A 夹层结构天线罩在电介质材料和磁性材料两种情况下表现出的传输特性,结果表明,磁介质平板材料电磁参数满足 $\epsilon_r = \mu_r$ (复介电常数等于复磁导率)时,可以避免“退极化”现象,功率传输系数优于对应的电介质平板,插入相位移变化更为平缓,表现出了最佳的传输特性。最后,利用商业软件 HFSS 进一步验证了上述结论的正确性和该方法的有效性。

关键词: 磁性材料; 退极化; 传输线理论; 功率传输系数; 插入相位移

中图分类号: O451

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)03-277-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.20030

Study of Power Coefficient and Insertion Phase Shift for Organic Magnetic Slab

Li Gao-sheng Jia Lei Ming Yong-jin Cao Qun-sheng

(College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, theories of electromagnetic reflection and transmission as well as transmission line are adopted, a simulation method is designed to calculate power transmission coefficient and insertion phase shift, and also the mathematical formulas are deduced that the electromagnetic parameters of material used in radomes must be satisfied to remove the depolarization phenomenon, a single magnetic slab is used to discuss and verify the formulas. A special A sandwich radome, as a example, is calculated to analysis the effects of the magnetic and dielectric materials on the power transmission coefficient and the insertion phase shift. It is found that the phenomenon of depolarization can be avoided for A sandwich radome structure once when $\epsilon_r = \mu_r$ (the relative complex permittivity of the magnetic material equals its relative complex permeability), and the power of transmission coefficient for magnetic material is better, the insertion phase shift is smoother, and the property of transmission performance is better than those of the electric material. Finally, the commercial software HFSS further verifies the correctness of the conclusions and validity of the method.

Key words: Magnetic materials; Depolarization; Transmission line theory; Transmission coefficient of power; Insertion phase shift

1 引言

天线罩^[1,2]是保护内部天线或天线阵列正常工作的一种装置,如地面天线罩主要用来防止风、雨、雪等自然环境对天线的侵袭,飞行器天线罩兼顾自然气候以外,还需要考虑高温、气动载荷等因素带来的不利影响。天线罩作为天线的电磁窗口^[3,4],随着电子技术的快速发展,已经成为天线的重要组成部分。

天线罩研制过程中,材料选择是后续电性能、力学性能设计和优化的基础。目前天线罩使用的材

料均为电介质材料,其相对介电常数 $\epsilon_r > 1$,相对磁导率 $\mu_r = 1$;电介质材料天线罩的功率传输系数主要取决于材料的介电性能^[5],即介电常数与损耗角正切,研制拥有最小介电常数和损耗角正切的复合材料是现在的发展趋势;这类天线罩水平极化波时的透波率整体上优于垂直极化波时的透波率,因此在进行天线罩电性能设计时,天线罩传输特性以垂直极化下的功率传输系数为参考标准,即主要矛盾来自于垂直极化^[6],只要垂直极化能够满足,水平极化一般都能满足。随着双负材料^[7,8]、新型磁性材料^[9]实验研究成果的出现,双负材料、新型磁性材料在微波器件、天线和天线罩等方面的应用成了国内外研究的热点之一。1999年,林展如等人合成了在很

2012-05-04 收到, 2012-07-02 改回; 2012-07-06 网络优先出版

国家自然科学基金(61172024)资助课题

*通信作者: 李高生 lgs_002@163.com

宽的温度范围内电感和磁性能十分稳定的有机磁性材料^[10]；2004年，官正涛等人对平面波在空气与磁性媒介边界上的反射特性进行了理论探讨^[11]；2005年，Tretyakov等人通过加装圆柱天线罩的电小天线辐射问题对双负罩可以有效增强天线本身的辐射能力的现象做了深入的研究^[12]；2008年，万国宾等人运用传输线等效方法给出了包含双负、单负和双正材料的任意多层结构的传输系数和反射系数计算公式^[13]，2012年，Dubrovka等人对各向异性超材料天线罩进行了研究和测试，并给出了天线-天线罩系统的近场方向图^[4]。

本文采用传输线理论围绕天线罩不存在“退极化”效应时天线罩材料电磁参数必须满足的条件展开讨论。采用的传输线理论基于矩阵级联思想，相比于“集合射线法”^[14]具有概念清晰，公式简明，易于编程等优点；同时给出的磁性材料传输特性计算公式，扩展了文献[14]只能处理单层磁性平板的范围，可处理多层磁性平板的传输特性问题。本文的创新点在于首次采用微波传输线理论对单层、A夹层磁性平板天线罩进行分析，重点讨论磁性参数对功率传输系数和插入相位移的影响，并用商业软件HFSS验证了本文结论的正确性。

本文以下各节安排如下：第2节阐述微波传输线理论并应用到磁性材料领域，给出了不同极化波入射下功率传输、反射系数和插入相位移的计算公式；第3节给出非“退极化”效应时天线罩材料电磁参数满足的数学等式；第4、5节分别从传输线理论和全波分析方法有限元法验证了第3节结论的正确性；第6节是全文结论。

2 传输线理论分析

任何类型天线罩的功率传输、反射系数和插入相位移等参数均与界面反射系数有关，且都是天线罩前后壁反射相互作用的结果。应用“多次反射概念”获得的计算公式比较繁琐，目前普遍采用的微波传输线理论，将多层介质平板等效为一个级联的四端口网络，较为简单通用，并且和应用“多次反射概念”获得的功率传输和反射系数相一致。下面给出用于分析多层磁性材料平板的四端口网络计算公式。

如图1所示， ϵ_0 和 μ_0 分别为自由空间的介电常数和磁导率； d_i 、 ϵ_i 和 μ_i 分别为第*i*层介质的厚度，介电常数和磁导率； θ_0 为电磁波从自由空间到第1层介质的入射角。*n*层介质板被等效为*n*级四端口网络，其网络总级联矩阵为 T ，即

$$T = \prod_{i=1}^{i=n} \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

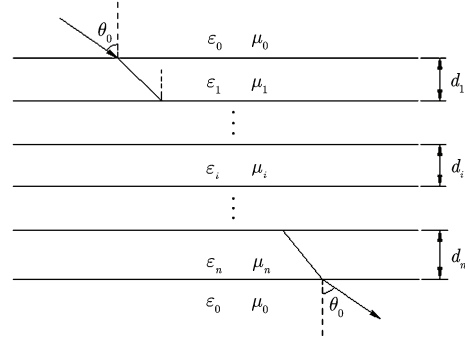


图1 多层平板电磁波的传输

其中 $\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix}$ 为第*i*层介质等效的传输线矩阵：

$$\begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \operatorname{ch}j\gamma_i d_i & Z_i \operatorname{sh}j\gamma_i d_i \\ \operatorname{sh}j\gamma_i d_i / Z_i & \operatorname{ch}j\gamma_i d_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中 $\gamma_i = (2\pi/\lambda_0)\sqrt{\epsilon_i\mu_i - \sin^2\theta_i}$ ，*j*为虚部单位， Z_i 为第*i*层介质对自由空间归一化特征阻抗， θ_i 为电磁波从第*i*-1层介质到第*i*层介质的入射角，“ch”和“sh”分别为双曲余弦和双曲正弦函数， $\operatorname{ch}z = (e^z + e^{-z})/2$ ， $\operatorname{sh}z = (e^z - e^{-z})/2$ 。

Z_i 对水平极化和垂直极化分别有

$$Z_i^{\parallel} = Z_0 \frac{1}{\epsilon_i} \sqrt{\epsilon_i\mu_i - \sin^2\theta_i} \quad (3a)$$

$$Z_i^{\perp} = \frac{Z_0\mu_i}{\sqrt{\epsilon_i\mu_i - \sin^2\theta_i}} \quad (3b)$$

式中， λ_0 和 Z_0 分别为自由空间的波长和特征阻抗。

由此可得*n*层介质板的功率传输和反射系数分别为

$$T = \frac{2}{(A + B/Z_0) + (Z_0C + D)} \quad (4a)$$

$$R = \frac{(A + B/Z_0) - (Z_0C + D)}{(A + B/Z_0) + (Z_0C + D)} \quad (4b)$$

式(4)中变量 Z_0 可以分解为水平和垂直极化情况，即 $Z_0^{\parallel} = Z_0 \cos\theta_0$ 和 $Z_0^{\perp} = Z_0 / \cos\theta_0$ 。功率传输系数还可以表示为 $T = |T| \cdot \exp(-j\varphi_T)$ ，则插入相位移(IPD)为

$$\text{IPD} = \varphi_T - \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot \cos\theta_0 \cdot \sum_{i=1}^n d_i \quad (5)$$

3 天线罩不存在“退极化”效应时材料的电磁参数

电磁波在电介质材料边界上传播时存在“退极化^[11]”效应，即电磁波通过天线罩后极化方向发生

偏转，例如当天线辐射的电磁波是完纯的线极化波时，通过天线罩后可能退化为椭圆极化波^[15]；功率反射、传输系数和插入相位移随入射角的变化曲线在不同极化波入射下不吻合，且随着入射角的增大，传输特性趋于恶化。这些问题是由于电介质材料只具有电特性，而不具有磁特性造成的。下面给出非“退极化”时材料电磁参数必须满足的公式推导。

垂直极化和水平极化波入射下，功率传输系数相等(插入相位移自然相等)，即

$$T_{\perp} = T_{\parallel} \quad (6)$$

由式(4a)和式(6)得

$$B_{\perp}/Z_0^{\perp} + Z_0^{\perp}C_{\perp} = B_{\parallel}/Z_0^{\parallel} + Z_0^{\parallel}C_{\parallel} \quad (7)$$

$$B_{\perp}/Z_0^{\perp} + Z_0^{\perp}C_{\perp} = \text{sh}j r_i d_i \frac{\mu_i^2 \cos^2 \theta_i + \mu_i \varepsilon_i - \sin^2 \theta_i}{\mu_i \cos \theta_i \sqrt{\mu_i \varepsilon_i - \sin^2 \theta_i}} \quad (8)$$

$$B_{\parallel}/Z_0^{\parallel} + Z_0^{\parallel}C_{\parallel} = \text{sh}j r_i d_i \frac{\varepsilon_i^2 \cos^2 \theta_i + \mu_i \varepsilon_i - \sin^2 \theta_i}{\varepsilon_i \cos \theta_i \sqrt{\mu_i \varepsilon_i - \sin^2 \theta_i}} \quad (9)$$

设式(8)等于式(9)，则

$$\frac{\text{sh}j r_i d_i (\varepsilon_i - \mu_i) (\varepsilon_i \mu_i + \varepsilon_i \mu_i \cos^2 \theta_i + \sin^2 \theta_i)}{\varepsilon_i \mu_i \cos \theta_i \sqrt{\mu_i \varepsilon_i - \sin^2 \theta_i}} = 0 \quad (10)$$

$$\varepsilon_i = \mu_i \quad (11)$$

由式(11)可以看出，若想实现不同极化波入射下功率传输系数相等，材料电磁参数复介电常数与复磁导率必须相等，即若天线罩材料电磁参数满足 $\varepsilon_i = \mu_i$ ，“退极化”效应可以避免。

4 仿真结果和分析

为了验证第 3 节结论的正确性，下面分别选择天线罩的两种典型罩壁结构：单层和 A 夹层，来分析磁性参数对功率传输系数和插入相位移的影响。

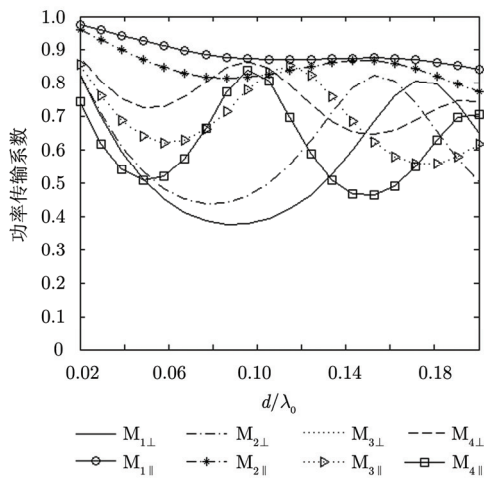


图 2 功率传输系数随电气厚度的变化曲线

4.1 单层平板天线罩

该节选取了 4 种磁性材料 M_1, M_2, M_3 和 M_4 ，讨论的罩壁结构均为单层($n=1$)，分别讨论功率传输系数和插入相位移随电气厚度的变化特性，4 种材料的复介电常数均为 $\varepsilon_r=4.4(1-j0.02)$ ，复磁导率分别为 $\mu_1=2.0(1-j0.02)$ ， $\mu_2=2.5(1-j0.02)$ ， $\mu_3=4.4(1-j0.02)$ 和 $\mu_4=6.0(1-j0.02)$ 。

根据式(4)，式(5)，图 2，图 3 分别绘制了当电磁波入射角 $\theta_0=60^\circ$ 时，水平极化波和垂直极化波功率传输系数 $|T|^2$ 和插入相位移 IPD 随电气厚度 d/λ_0 的变化曲线，其中 d 为单层平板的厚度， λ_0 为自由空间波长， d/λ_0 无量纲。其中 $M_{i\perp}$ 表示入射波极化方式为垂直极化， $M_{i\parallel}$ 为水平极化，两者磁性材料均为 M_i ，对应的电磁参数为 ε_i 和 μ_i 。

由图 2，图 3 可以看出：

(1) 当 $\varepsilon_r=\mu_r$ 时，两种极化情况下的功率传输系数和插入相位移曲线重合，和理论分析一致；且此时单层平板天线罩带宽最大，功率传输系数也较大，具有最佳的传输特性。

(2) 当 $\varepsilon_r > \mu_r$ 时，水平极化波存在布儒斯特角，天线罩的主要矛盾来自垂直极化；当 $\varepsilon_r < \mu_r$ 时，垂直极化波的功率传输系数整体优于水平极化，天线罩的主要矛盾来自水平极化。

(3) 复介电常数不变，随着复磁导率的增加，单层平板天线罩半波长点不断左移，对应的横轴坐标分别为 0.1716, 0.1526, 0.1147 与 0.0958，精确度 0.0095，因为计算平板为有耗材料，半波长点和无耗材料的半波长点^[16]有细微的差值。

4.2 A 夹层结构天线罩

该节讨论的天线罩罩壁结构为 A 夹层($n=3$)结构，两个平板分别为 P_0 和 P_1 ，主要分析功率传输系

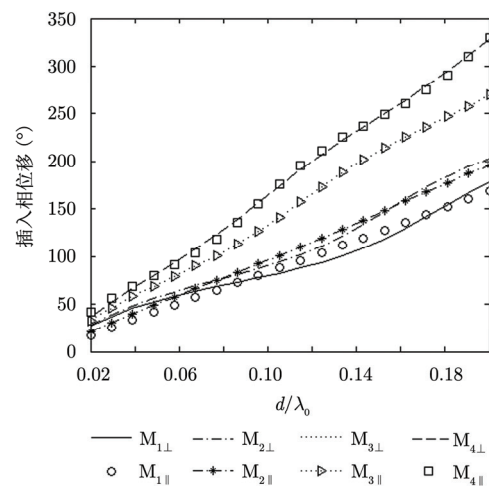


图 3 插入相位移随电气厚度的变化曲线

数和插入相位随电磁波入射角的变化特性, P_0 和 P_1 平板各层电磁参数及厚度设置如表 1, 表 2 所示, 其中 n 表示层数, 第 1 层和第 3 层分别为致密的外蒙皮和内蒙皮, 第 2 层为低密度芯层; $\varepsilon_r = \varepsilon_r(1 - j \tan \delta)$, $\mu_r = \mu_r(1 - j \tan \delta_m)$, j 为虚数单位, $\tan \delta$ 为介质损耗正切, $\tan \delta_m$ 为磁损耗正切, d 为对应层数的物理厚度。

表 1 P_0 电磁参数

n	ε_r	$\tan \delta$	μ_r	$\tan \delta_m$	d (m)
1	3.30	5.0×10^{-3}	1.0	0.0	1.0×10^{-3}
2	1.05	4.0×10^{-3}	1.0	0.0	3.6×10^{-3}
3	3.30	5.0×10^{-3}	1.0	0.0	1.0×10^{-3}

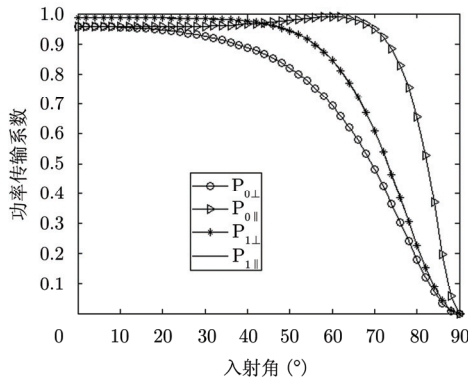


图 4 A 夹层功率传输系数随入射角的变化

(2) P_0 非磁性平板在垂直极化波入射时, 功率传输系数大于 60%, 70%, 80% 和 90% 的最大入射角分别为 64° , 58° , 52° 和 36° ; 相同条件下, P_1 磁性平板对应功率传输系数的最大入射角分别为 70° , 66° , 62° 和 54° , 可见磁性材料可以增加一定功率传输系数对应的最大入射角范围。

(3) 同时, $\varepsilon_r = \mu_r$ 时, 两种极化情况下的插入相位曲线重合, 且磁性材料的插入相位曲线相对于非磁性材料变化缓慢, 非磁性材料的变化区间为 $[25.17^\circ, 89.59^\circ]$, 磁性材料插入相位的变化区间仅为 $[57.36^\circ, 89.92^\circ]$ 。

5 HFSS 软件验证第 3 节结论的正确性

HFSS 11 版本中引入了功能强大的 Floquet 端口^[17,18], Floquet 端口基于 Floquet 模式进行场求解, 用于 2 维平面周期性结构的仿真设计。本节使用 Floquet 端口激励并结合主从边界条件, 分析了不同极化方式的电磁波斜入射介质时的电磁特性。图 6 给出了 HFSS 仿真模型, 仿真模型的上下两个端口均为 Floquet 端口激励, 4 个侧面为成对出现的主

表 2 P_1 电磁参数

n	ε_r	$\tan \delta$	μ_r	$\tan \delta_m$	d (m)
1	3.30	5.0×10^{-3}	3.30	5.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}
2	1.05	4.0×10^{-3}	1.05	4.0×10^{-3}	3.6×10^{-3}
3	3.30	5.0×10^{-3}	3.30	5.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}

图 4, 图 5 分别给出了非磁性和磁性两种 A 夹层天线罩功率传输系数和插入相位随入射角的变化曲线, 入射波频率为 10 GHz。如图可知:

(1) A 夹层天线罩在平面波照射下, 当 $\varepsilon_r = \mu_r$ 时, 两种极化情况下的功率传输系数重合, 且磁性 A 夹层天线罩功率传输系数优于非磁性 A 夹层天线罩;

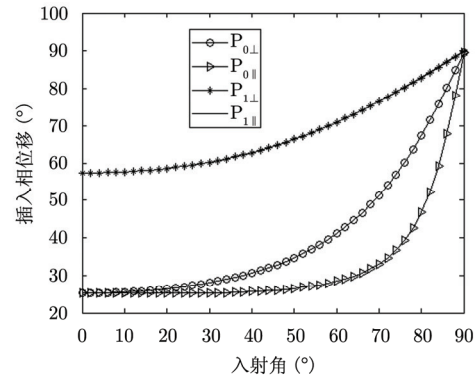


图 5 A 夹层插入相位随入射角的变化

从边界; 模型中介质的厚度为 1.8 mm, 复介电常数 $\varepsilon_r = 3.4(1 - j0.018)$, 复磁导率 $\mu_r = 3.4(1 - j0.018)$, 即 $\varepsilon_r = \mu_r$ 。

HFSS 中电磁波的入射角设置如图 7 所示, θ_0 为扫描变量, 范围 $[0^\circ, 90^\circ]$, 步长为 5° 。图 8 中 FEM_{TE} , FEM_{TM} 分别表示具有极化的 TE, TM 波斜入射介质时, HFSS 软件仿真得到的功率传输系数值, HFSS 软件定义 TE 极化为入射波电场垂直于入射面, 与传输线理论垂直极化概念等价; TM 极化为入射波电场平行于入射面, 与传输线理论水平极化概念等价。从第 4 节结论可知, 当 $\varepsilon_r = \mu_r$ 时, 传输线理论分析结果表明, 两种极化情况下的功率传输系数和插入相位曲线完全重合, 所以图中只给出了传输线理论一种极化形式下的结果曲线。从图中可以看出:

(1) HFSS 软件仿真结果与传输线理论曲线吻合较好, 从而从数值全波分析方面验证了传输线理论的合法性和有效性。

(2) HFSS 软件不同极化波仿真结果吻合程度较好, 验证了第 3 节中推导结论的正确性。

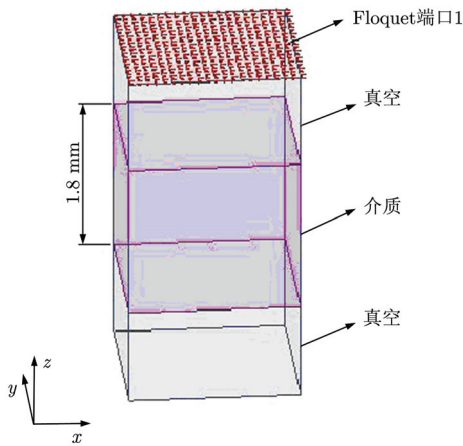


图 6 基于 Floquet 端口法的仿真模型

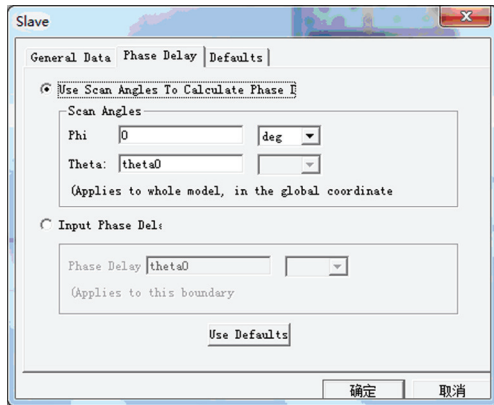


图 7 HFSS 入射角设置

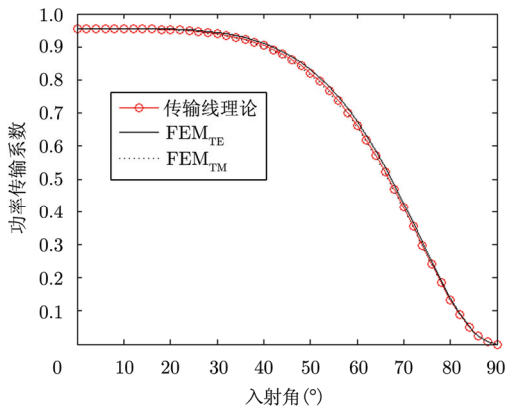


图 8 软件仿真与传输线理论结果对比

6 结束语

本文主要针对单层和 A 夹层磁性平板天线罩，利用传输线理论，对“退极化”现象进行了分析，并严格推导了消除“退极化”现象必须满足的数学公式。结果表明，当天线罩材料的复介电常数和复磁导率相等时，即 $\epsilon_r = \mu_r$ ，天线罩传输性能优于对应

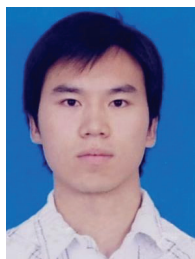
的电介质材料($\mu_r=1$)传输特性，插入相位移变化更为缓慢。由以上分析可知，在功率传输系数和插入相位移方面，磁性材料比非磁性材料具有更好的应用前景，为天线罩材料的选择提供了参考依据。工程实际中的天线罩常常为有限大或曲面结构，因此，下阶段的工作是采用高频方法(几何光学和物理光学法)研究有限大曲面磁性材料天线罩的传输特性。

参考文献

- [1] Li Jing-guo, Li Ying-jian, and Liu Zhong-qi. Analysis of arbitrarily shaped dielectric radomes using adaptive method based on volume integral equation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(7): 1910-1916.
- [2] Dubrovka R, Palikaras G, and Belov P. Near-Field antennas radome based on extremely anisotropic metamaterial[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11(2): 438-441.
- [3] Chen Hong-yu, Shen Zhong-xiang, and Li E. Analysis of a three-dimensional antenna radiating through a two-dimensional radome using a fast hinge-order method[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(4): 699-702.
- [4] Fisher B, Lahaie I, and Punnett M. Determining the effect of an electromagnetic window or radome wall upon a circularly polarized transmission[J]. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2007, 49(1): 122-128.
- [5] Torani O. Radomes[M]. Boston: Advanced Design, 1973: 99-116.
- [6] 杜耀惟. 天线罩电性能设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 365-395.
- [7] Du Yao-wei. The Electrical Design Method of Radomes[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993: 365-395.
- [8] Smith D R, Padilla W J, and Vier D C. Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(18): 4184-4187.
- [9] Shelby R A, Smith D R, and Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction[J]. *Science*, 2001, 292(6): 77-79.
- [10] Lin Zhan-ru, Ni Xun-ming, and Hu Han-jie. Novel metalocene-containing polymers and their unusual ferromagnetic properties[J]. *Progress in Natural Science*, 1996, 6(1): 120-124.
- [11] 林展如, 倪训铭. 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): 229-333.
- Lin Zhan-ru and Ni Xun-ming. New type organic magnetic materials and their application in the field of microwaves[J]. *Journal of Microwaves*, 1999, 15(4): 229-333.
- [11] 官正涛, 张双文, 刘运林, 等. 磁性边界反射特性研究[J]. *西南交通大学学报*, 2004, 39(5): 699-702.
- Guan Zheng-tao, Zhang Shuang-wen, Liu Yun-lin et al.

- Research of reflection characteristics of magnetic boundary[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2004, 39(5): 699-702.
- [12] Tretyakov S A. 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.
- [13] 万国宾, 李静, 王伟. 双负材料对多层介质的传输特性影响研究[J]. *微波学报*, 2008, 24(4): 1-4.
Wan Guo-bin, Li Jing, and Wan Wei. Effects of DNG materials on transmission characteristics of multilayer radome walls[J]. *Journal of Microwaves*, 2008, 24(4): 1-4.
- [14] 官正涛, 杨儒贵. 单层磁性平板传输特性分析[J]. *电波科学学报*, 2005, 20(5): 691-697.
Guan Zheng-tao and Yang Ru-gui. Analysis of transmission characterizations of an organic magnetic slab[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2005, 20(5): 691-697.
- [15] Kozakoff D J. *Analysis of Radome-Enclosed Antennas*[M]. Boston: Artech House, 1997: 55-98.
- [16] 张开信, 孙宝华, 孙志强. *雷达罩工程设计技术*[M]. 南京: 信息产业部第十四研究所, 2000: 51-86.
Zhang Kai-xin, Sun Bao-hua, and Sun Zhi-qiang. *Radome Engineering Technology*[M]. Nanjing: The 14th Research Institute of the Ministry of Information Industry, 2000: 51-86.
- [17] 李明洋. *HFSS 电磁仿真设计应用详解*[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2011: 87-100.
Li Ming-yang. *HFSS Electromagnetic Simulation and Design of Application*[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2011: 87-100.
- [18] Zhang Yun-xiang, Wang Jian, Zhao Zhi-qin, *et al.* Numerical analysis of dielectric lens antennas using a ray-tracing method using HFSS software[J]. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2008, 50(4): 94-101.

作者简介



李高生(1988-), 男, 河南商丘人, 硕士生, 主要研究方向为天线罩电讯性能研究和计算电磁学。

E-mail: lgs_002@163.com

明永晋(1988-), 男, 安徽滁州人, 硕士生, 研究方向为微波和天线技术、天线罩电讯性能研究。

E-mail: mingyongjin@21cn.com

曹群生(1959-), 男, 安徽铜陵人, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为计算电磁学、微波和天线技术、高速电路信号完整性。

E-mail: qunsheng@nuaa.edu.cn

贾蕾(1986-), 女, 安徽合肥人, 硕士生, 主要研究方向为天线罩电讯性能研究和计算电磁学。

E-mail: geniusjialei@126.com