

doi:10.3969/j.issn.1001-2400.2013.06.014

大型介质夹层天线罩的电性能补偿方法

李 鹏¹, 许万业¹, 仇原鹰¹, 李华平²

(1. 西安电子科技大学 电子装备结构设计教育部重点实验室, 陕西 西安 710071;

2. 空军西安飞行学院, 陕西 西安 710306)

摘要: 针对介质夹层天线罩在保护天线的同时, 也会影响系统电性能的问题, 研究罩体对电性能影响的主要因素, 发现导致远场方向图畸变的主要因素是罩体透射系数导致的相位变化; 通过分析其与罩体结构材料形式的关系, 结合反射面天线的结构特点, 提出了两种补偿方法. 一是通过修正天线主反射面补偿, 二是通过调整馈源的轴向偏焦补偿. 考虑到工程实现的难度, 重点讨论了轴向偏焦补偿. 推导了偏焦调整量的计算公式, 给出了使用条件. 通过某9.14 m地面卫星通信站的天线罩进行了数值仿真. 结果表明: 轴向偏焦补偿方法可行且有效, 尤其对于方向图的畸变导致的副瓣和零深变化补偿效果显著.

关键词: 天线罩; 介质夹层; 轴向偏焦; 相位补偿; 电性能

中图分类号: TN957 文献标识码: A 文章编号: 1001-2400(2013)06-0078-07

Compensation method for the effect of large dielectric sandwich radomes on electrical performance

LI Peng¹, XU Wanye¹, QIU Yuanying¹, LI Huaping²

(1. Ministry of Education Key Lab. of Electronic Equipment Structure, Xidian Univ., Xi'an 710071, China; 2. PLA Air Force Xi'an Flight Academy, Xi'an 710306, China)

Abstract: For the problem that the dielectric sandwich radome will affect the electrical performance of the enclosed antenna, the main factors of the effect have been studied, and it is found that the main reason for the distortion of the far field pattern is the change of phase in the aperture due to radome. The relation between phase change and radome's structure has been analyzed. Then considering the structural features of reflector antenna, some compensated schemes for electrical performance have been proposed. One is the modification of the main reflector, the other is to adjust the axial offset focus of the feed. The second scheme is discussed because it can be more appropriately applied in engineering practice. A formula for the offset focus value has been proposed, and so has the restriction of application. Some simulations have been done by a 9.14m dielectric sandwich radome of satellite earth station. The result shows that the compensated method of the axial offset focus is very effective, especially for the distortion of the far field pattern.

Key Words: radome; dielectric sandwich; axial offset focus; phase compensation; electrical performance

天线罩可有效抵抗风荷、冰雪、太阳照射等恶劣外部环境的影响, 显著提高内部天线的环境适应性和使用寿命. 地基大型反射面天线使用的罩体主要是金属桁架式和介质夹层式两种, 后者可参见图1, 其材料成本低、建造安装容易、环境适应性强, 获得广泛应用^[1]. 天线罩在保护内部天线的同时, 也会影响系统的电性能^[2]. 例如介质夹层产生吸收损耗^[3], 金属桁架或较厚的介质夹层引起电磁散射^[4], 不同的介质分块和搭边(参见图2)形式都会导致不同的电磁影响^[5-6], 因而天线罩对系统电磁特性的影响是设计的重点^[7]. 设计不

收稿日期: 2012-12-10

网络出版时间: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(51035006); 国家自然科学基金青年基金资助项目(51205301); 中央高校基本科研业务费资助项目(JY10000904019)

作者简介: 李 鹏(1981—), 男, 副教授, 博士, E-mail: yinhong0523@163.com.

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1076.TN.20130710.0915.201306.104_011.html

好的天线罩会导致系统电性能指标下降,甚至严重影响天线的正常工作.因此,良好的天线罩设计应该是将天线与罩体作为一个整体,进行一体化的机电综合设计.



图1 介质夹层的天线罩

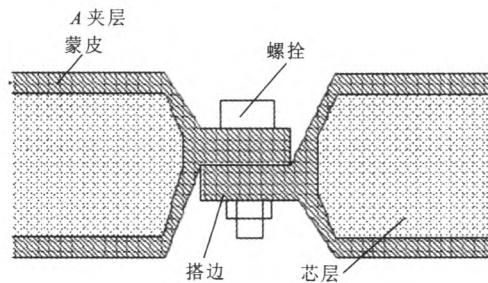


图2 介质夹层和搭边的结构示意图

但是目前,天线和罩体仍然是独立设计的.因为同一种天线可能安装在不同的地方,各地环境又可能差异巨大,配用的天线罩也会有所差异.针对每个地方环境,分别进行天线和罩体的一体化设计也是不现实的.因此,目前还是以天线设计为主,罩体设计适应天线,将影响控制到可以接受的范围即可.

笔者主要针对介质夹层天线罩对系统电性能的影响,通过分析影响的具体因素,提出了一种补偿方法,可以在不改变天线和罩体的具体结构设计的前提下,通过适当调整馈源的轴向位置,补偿罩体对系统电性能的影响.不但具有较高的工程可实现性,而且补偿效果良好.

1 天线罩的影响分析

要进行补偿,首先需要研究罩体影响电性能的原因,即进行天线罩的电磁分析.目前对大型天线罩的电磁分析主要以高频方法为主^[1],而矩量法(MOM)^[8]或者改进的矩量法-物理光学混合法(MOM-PO)^[9]都因计算量过大而难以适用.因此,笔者采用射线追踪——口径场积分的方法进行电磁分析.

带罩天线系统的电性能主要取决于内部的反射面天线.通常使用口径场法分析时,天线远场场值可以描述为^[10]

$$E(\theta, \phi) = \iint_S f_s(\rho', \phi') \exp(j\varphi_s(\rho', \phi')) \rho' d\rho' d\phi' , \quad (1)$$

其中, $E(\theta, \phi)$ 表示天线远场空间某点 P 的场强, $f_s(\rho', \phi')$ 和 $\varphi_s(\rho', \phi')$ 分别表示反射面天线口径面电场的幅度和相位分布函数, S' 表示天线口径面, 其他相关变量如图 3 所示.

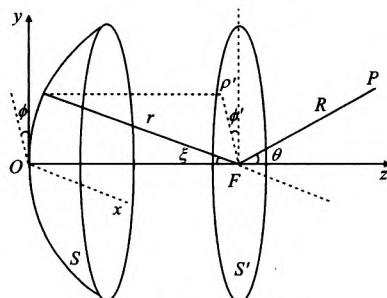


图3 面天线变量示意图

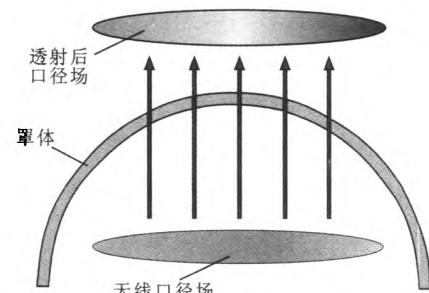


图4 带罩天线系统口径场示意图

理想反射面天线的初始口径场通常是一个等相位面.安装天线罩后,口径场的电磁波通过罩体的介质夹层时,会产生一定的损耗.同时由于入射角度的不同,电波在罩体内传输的距离也不同,因此,还会有一定的传输相差.通过分析传输过程可得到透射后的口径场分布,如图 4 所示,透射口径场不再是一个等相位面了,且场值的幅值也会有所降低.在透射口径场的基础上采用同样方法计算远场场值,得到带罩天线系统的远场公式为^[2]

$$E(\theta, \phi) = \iint_S T_m(\rho', \phi') f_s(\rho', \phi') \exp(j\varphi_s(\rho', \phi')) \rho' d\rho' d\phi' , \quad (2)$$

可见,与理想天线公式(1)的差异仅在于积分号内多了一个参数 $T_m(\rho', \phi')$, 称之为天线罩的透射系数. 该系数由端口网络理论推导得出,与电磁波在罩体上每一点处的入射角密切相关,因此,它是关于 (ρ', ϕ') 的函数.

透射系数的具体计算公式为^[2]

$$T_m = (T_H^2 \cos^4 \beta + T_V^2 \sin^4 \beta + 2T_H T_V \cos^2 \beta \sin^2 \beta \cos \delta)^{1/2} \exp(-j(\eta_H - \varphi_M)) , \quad (3)$$

其中, $\delta = \eta_H - \eta_V$, $\varphi_M = \arctan(T_V \sin^2 \beta \sin \delta / (T_H \cos^2 \beta + T_V \sin^2 \beta \cos \delta))$, T_H, T_V, η_H, η_V 分别为相应入射角 θ_i 的水平极化分量和垂直极化分量的场强透过系数的模和插入相位移, β 为该点的极化角. 插入相位移为

$$\eta = \omega_T - \frac{2\pi}{\lambda} d_b \cos \theta_i . \quad (4)$$

传输系数写成复数形式为 $T = \frac{2}{(A + B/Z_\infty + CZ_\infty + D)} = |T| \exp(-j\omega_T)$,

其中, 水平极化时, $Z_\infty = \cos \theta_i$, $L = 1$; 垂直极化时, $Z_\infty = 1/\cos \theta_i$, $L = 2$.

$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 构成的矩阵称为转移矩阵, 其中

$$A = \text{ch}(jVd_b), \quad B = Z_1 \text{ sh}(jVd_b), \quad C = \text{sh}(jVd_b)/Z_1, \quad D = \text{ch}(jVd_b) , \quad (6)$$

而

$$V = 2\pi(\epsilon_b - \sin^2 \theta_i)^{1/2}/\lambda ,$$

$$Z_1 = \begin{cases} (\epsilon_b - \sin^2(\theta_i/\epsilon_b))^{1/2} , & \text{垂直极化} \\ 1/(\epsilon_b - \sin^2 \theta_i)^{1/2} , & \text{水平极化} \end{cases} ,$$

$$\epsilon_b = \epsilon_b'(1 - j \tan \delta_b) ,$$

式中, θ_i 为电波的入射角, λ 为电波的工作波长, $\epsilon_b', \tan \delta_b, d_b$ 分别为该介质板的相对介电常数、损耗角正切和厚度.

对于单层介质板, 根据传输线理论, 把天线罩等效为一个四端口网络, 即可用简明的公式来表达其透过系数. 对于多层介质板, 可用多个四端口网络的级联来等效^[1].

具体计算时, 将天线罩划分的有限元网格读入程序, 计算端口每一个单元对应的入射角和极化角, 然后依据各自的材料参数计算得到透射系数, 最后通过口径场积分得到系统远场场值, 具体的计算步骤可参见文献[11]. 通过计算一定角度范围内的场值, 即可绘制相应的远场方向图. 由远场方向图可读取具体的电性能参数.

介质天线罩会导致系统的增益下降、方向图畸变等问题. 主要因素来自两方面, 一是罩体介质材料的吸收损耗, 使得系统辐射电磁波的效率降低, 增益下降, 具体体现在透射系数 T_m 的幅值小于 1; 二是由于罩体曲率变化以及电波入射角的不同, 导致天线透射口径场的相位发生改变, 进而导致远场方向图畸变, 具体体现在透射系数 T_m 的相位分布有差异, 不再是等相位面. 结合透射系数的公式, 可以发现, 其幅度主要导致增益下降, 相位导致方向图畸变. 当然方向图畸变也意味着系统的方向性系数下降, 而增益又是方向性系数和效率的乘积, 因此一定程度上也会影响增益.

天线罩导致的相位变化与材料厚度、物性参数和入射角有关, 当天线罩结构材料形式确定以后, 透射口径场上的相位分布就只与入射角有关了. 虽然由于透射系数 T_m 的公式复杂, 难以写出透射口径场相位与材料物性尺寸等结构参数的显性表达式, 但其相位的分布应该随入射角变化这一点却是明确的. 可以想象, 如果天线罩是一个大平板, 上面所有点的入射角都是 0° , 则透射的口径场没有相位差异, 仍为一等相位面. 但实际天线罩一般是圆球形, 所以各点入射角不同, 中心处为 0° , 向边缘处逐渐增加. 入射角的增加可以看做材料厚度的增加, 相当于增加了电波传输距离, 因此透射口径场相位差的分布是中心处最低为零, 向四周逐渐增加, 到达边缘时最大.

2 补偿方案的提出

如果想减小天线罩对系统电性能的影响, 关键是透射系数 T_m , 则应提高其幅度值或减小其相位分布的

差异.其幅度值主要由罩体材料的介电常数、磁损耗角正切、厚度等因素决定,在天线罩设计完成后,难以改变.因此通过改变其相位分布的差异来减小影响更为可行.对于罩体和天线两部分,当罩体难以改变时,只能通过天线自身的调整,改变初始口径场的相位来补偿.

反射面天线主要包括正面和馈源,正面修正或馈源偏移都会导致初始口径场相位改变.正面某点发生沿轴向的微小位移 Δz ,会导致该点相位的超前或滞后,如图 5 所示.引起的相位变化可通过几何关系得到,即

$$\eta_m = (2\pi/\lambda)\Delta z(1 + \cos \xi) \quad (7)$$

根据罩体透射系数 T_m 的相位分布情况,确定正面某点的 Δz 取值,修正正面的形状,使两者导致的相位偏差正好抵消,最终使透射口径场仍是等相位面,即可实现电性能的补偿.但是利用正面修形补偿,必须修正整个反射面,还需修改背架结构,工作量巨大,工程上难以实现.

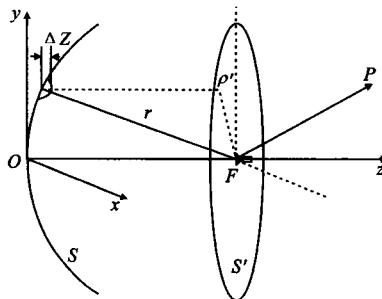


图 5 反射面天线正面修正示意图

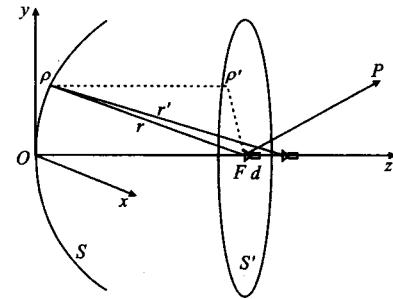


图 6 反射面天线馈源偏焦示意图

相对而言,通过馈源偏移的补偿更为可行.如图 6 所示,当天线馈源沿 z 轴线方向移动一小段距离 d ,即发生轴向偏焦,电磁波从馈源发出会多传输一段距离,再经过抛物面反射后,其等相位面不再是一个平行于口径面的平面,而成为一个曲面,即初始口径面也不再是一个等相位面了.轴向偏焦单独发生时,不改变最大辐射方向,却会导致天线的增益降低、副瓣抬升.但当天线外部还有一个罩体时,罩体又会使得电波传输的相位再次发生改变,两项综合作用,有可能使最终的透射口径场相位差异变小,则最终改善远场电性能,从而起到补偿的效果.

对于反射面上不同点在口径面的投影,其相位的变化量与馈源移动距离 d 相关,还与馈源照射角 ξ 的余弦有关.从口径面的中心到边缘,照射角逐渐增加,而余弦值逐渐减小,因此,总的相位变化是中间最大向边缘逐步减小.正好与罩体的透射系数导致的相位变化趋势相反.

轴向偏焦引起的对应点在口径面的相位变化可以根据几何关系得到,即

$$\eta_f = (2\pi/\lambda)d \cos \xi \quad (8)$$

在反射面中心点处,张角最小为 0,相位改变为 $(2\pi/\lambda)d$,而在反射面边缘张角最大为 ξ_{\max} ,相位改变为 $(2\pi/\lambda)d \cos \xi_{\max}$,因此,整个口径面上的相位差异为

$$\Delta \eta_f = (2\pi/\lambda)d(1 - \cos \xi_{\max}) \quad (9)$$

利用轴向偏焦的相位改变补偿天线罩导致的相位变化,最好使得透射口径场仍为等相位面,即使中心和边缘的相位补齐,相位差异为零.但实际难以做到,因此,只能使得相位差尽可能小.又由于中心处的影响大于边缘处,因此,以中心的相位为基准进行补偿.将中心的相位补偿到透射系数边缘的相位,以此设计轴向偏焦的补偿量.如果天线罩透射系数的相位差为 $\Delta \eta_T$,则轴向偏焦的补偿量应该为

$$d = \Delta \eta_T \lambda / (2\pi) \quad (10)$$

同时已有研究表明,轴向偏焦小于 0.1λ 时,对天线自身的影响较小,因此,轴向偏焦的补偿量应小于 0.1λ .依据这一限制条件,可以得到最大的补偿相位约为 0.628 .即当透射系数的相差超过 0.628 时,轴向偏焦已经无法完全补偿,而只能部分补偿了.

在具体计算时,将轴向偏焦后导致的相位变化即式(8),叠加到带罩天线系统的计算式(2)的口径场相位分布函数中,完成口面积分即可.

3 仿真与讨论

利用上述方法,针对某地面卫星通信站天线罩进行仿真.该天线罩直径为 9.14 m, A 型夹层, 罩体高为 7.9 m, 蒙皮为玻璃钢, 夹层内为泡沫, 具体的材料物性参数以及结构尺寸如表 1 所示.

罩内的天线为某 5.2 m 反射面天线, 焦径比为 0.4. 假设为等幅同相的口径场分布, 工作于两个频段, 仿真时取 2.3 GHz 和 5.3 GHz.

表 1 某 9.14 m 介质夹层罩的基本材料参数和厚度

| | 厚度/mm | 介电常数 | 磁损耗角正切 | 备注 |
|-------|-------|------|--------|------|
| 泡沫夹层 | 50.0 | 1.15 | 0.0098 | 一层 |
| 玻璃钢蒙皮 | 0.5 | 4.20 | 0.0260 | 上下两层 |

分别计算两个频点的无罩无偏焦补偿的理想天线、有罩无偏焦补偿、无罩有偏焦以及既有罩体也有偏焦补偿共 4 种情况下系统的电性能, 得出的具体指标列于表 2, 并绘制 5.3 GHz 的远场方向图如图 7 所示. 由表 2 可见, 低频时罩体导致的损耗约为 0.2 dB, 副瓣提升约为 0.24 dB, 透射口径面上的相位差为 0.4, 利用式(10)计算的轴向偏焦补偿量为 0.0333λ, 远小于 0.1λ 的限制, 完全适用. 调整后系统的损耗为 0.14 dB, 相对于调整前略有降低, 但副瓣改善显著, 接近无罩时的副瓣, 而此时透射口径面的相差仅为 0.088, 也远小于调整前的 0.4. 在高频时的情况类似, 由于频段升高, 同样罩体

的影响更大一些, 补偿前的损耗为 0.67 dB, 副瓣抬高 1.26 dB, 透射口径面的相差为 0.922. 此时已经超过了 0.628 的最大补偿量, 因此只能以 0.1λ 作为轴向偏焦的补偿量, 部分补偿. 即使如此, 补偿后罩体的损耗也略有降低, 为 0.43 dB, 副瓣改善显著, 抬高仅为 0.17 dB, 也接近无罩时的副瓣电平, 此时的透射口径面相差也减小到 0.4, 远小于补偿前的 0.922.

表 2 仰天角度下有罩和无罩的系统电性能对比

| | 频率/GHz | | | | | |
|-------|---------|---------|-------|---------|---------|-------|
| | 2.3 | | 5.3 | | | |
| | 最大场强/dB | 副瓣电平/dB | 口面相差 | 最大场强/dB | 副瓣电平/dB | 口面相差 |
| 无罩无偏焦 | 62.475 | -17.578 | 0 | 69.726 | -17.578 | 0 |
| 有罩无偏焦 | 62.270 | -17.338 | 0.401 | 69.058 | -16.310 | 0.922 |
| 无罩有偏焦 | 62.434 | -17.340 | 0.345 | 69.506 | -17.026 | 0.518 |
| 有罩有偏焦 | 62.331 | -17.577 | 0.088 | 69.296 | -17.405 | 0.405 |

为方便对比, 计算了只有偏焦而无罩体的情况, 此时的损耗和副瓣等指标都差于无罩无偏焦时的情况, 这是合理的. 可见只有罩体和只有偏焦都会导致电性能指标的下降, 但是罩体和偏焦同时存在, 且参数设计合理, 其最终的电性能完全可能优于单独存在的两种情况, 从而实现对罩体电性能损失的补偿. 仿真结果表明, 轴向偏焦的补偿效果显著, 尤其对于副瓣电平. 从方向图上也可以看出, 经过补偿后的天线方向图几乎与无罩天线的方向图重合, 无论副瓣还是零深都明显好于补偿前.

同时, 绘制 5.3 GHz 时罩体导致的透射系数 T_m 相位差异分布、轴向偏焦导致的相差分布以及两者叠加后(即补偿后)的相差分布如图 8, 分别给出俯视图和侧视图. 由图可见, 罩体导致的透射系数相差分布是中间小边缘大, 而轴向偏焦导致的正好相反, 是中间大边缘小, 与前文论述的完全一致. 补偿后中间部分相差较小, 边缘稍大, 整体减小, 也符合前文分析的结果. 且从侧视图上可以明显看到, 相对于补偿前(即透射系数 T_m), 由于 0.1λ 的限制, 偏焦补偿量偏小, 但补偿后相差幅度仍然显著减小.

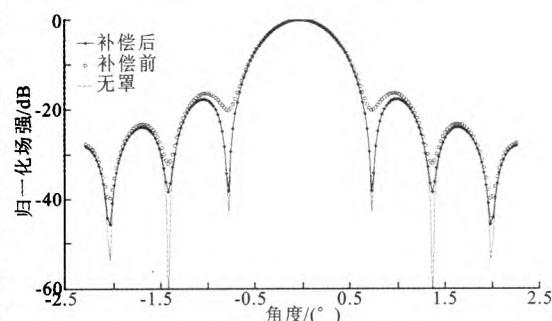


图 7 补偿前后的远场方向图

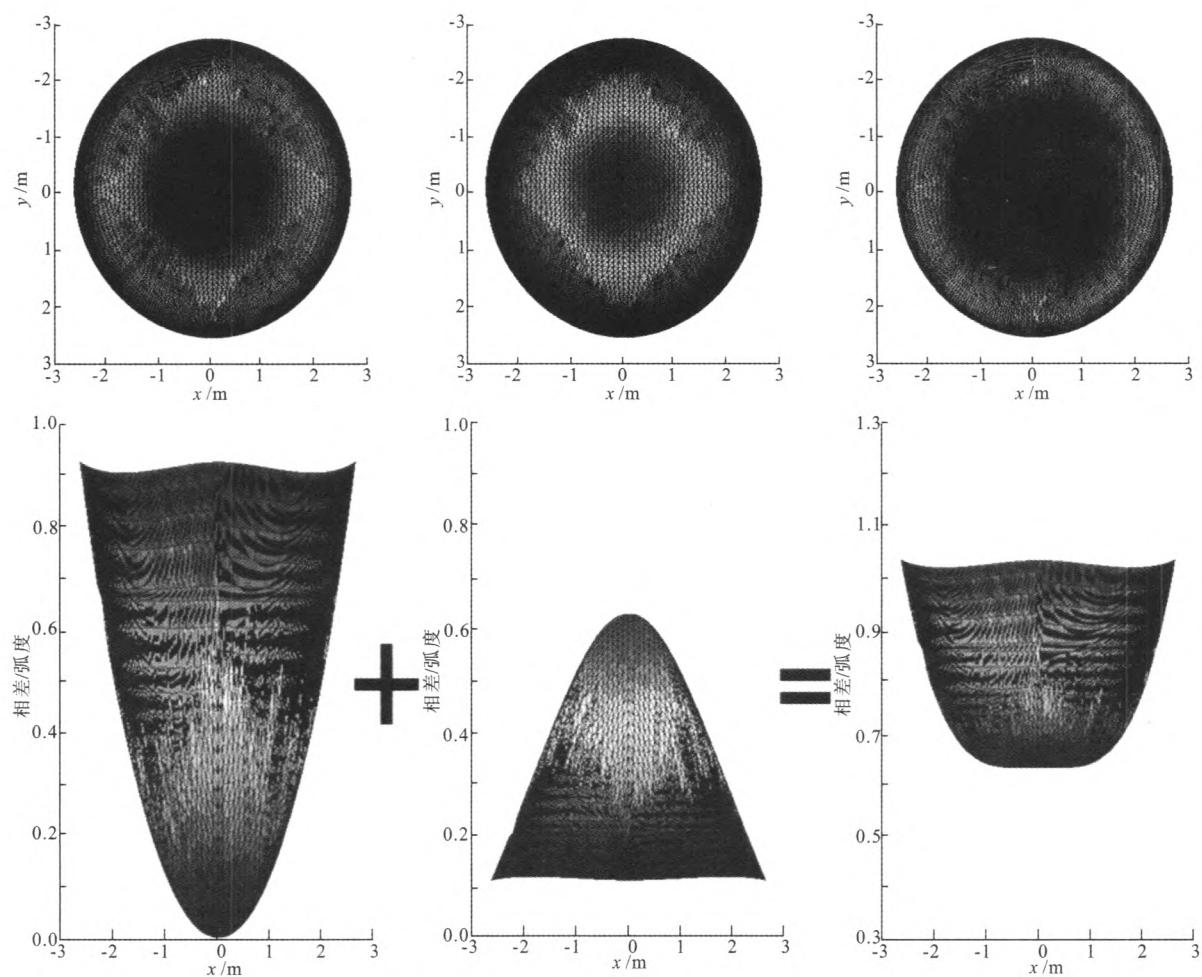


图8 透射系数、轴向偏焦和补偿后的相差分布图

同时,由侧视图观察透射系数和轴向偏焦的相差沿口面半径方向的变化情况会发现,无论怎样调整补偿量,都只能使得补偿后的口面相差减小,而不可能减小为0,即成为等相位面。这是由于反射面和罩体的曲面形状决定的。

4 结束语

通过前文分析和仿真算例可见,轴向偏焦的补偿方法可以有效补偿介质夹层天线罩导致的电性能损失,尤其对于方向图畸变导致的副瓣和零深变化改善效果显著。当然从原理上来说,主面修正的补偿方法没有 0.1λ 的限制,可以补偿的范围更大。同时主面修正时,可在主面上逐点修正,即使存在主面连续性条件的限制,也可以较为精准地补偿透射系数的相位,整体的补偿效果应好于轴向偏焦。只是需要重新设计天线,工程上可行性较低。但是如果进行天线和天线罩的一体化设计,采用主面修正的方法效果更好。

笔者的工作还存在以下不足:(1)仅仅考虑了天线罩的夹层结构,而未考虑分块搭边的影响;(2)提出的补偿方法和公式主要适用于单反射面天线,对于双反射面天线还不适用;(3)补偿的有效性仅仅通过仿真验证,还缺乏实际的实验验证。在后续的工作中会重点加强上述3个方面的工作。

参考文献:

- [1] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [2] 杨绍华, 张福顺, 焦永昌. 天线罩电磁特性的仿真分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2004, 31(6): 873-876.
- Yang S H, Zhang F S, Jiao Y C. An analysis of the parameters for antennas with the dome[J]. Journal of Xidian University, 2004, 31(6): 873-876.

- [3] Sukharevsky O I, Vasilets V A. Scattering of Reflector Antenna with Conic Dielectric Radome [J]. *Progress In Electromagnetics Research B*, 2008, 4: 159-169.
- [4] Virone G, Tascone R, Addamo G, et al. A Design Strategy for Large Dielectric Radome Compensated Joints[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 546-549.
- [5] Addamo G, Virone G, Peverini OA, et al. Experimental Results on Compensated Joints for Large Dielectric Radomes [C]//2011 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications, Piscataway: IEEE, 2011: 1275-1276.
- [6] Parsa A, Kodera T, Caloz C. Ferrite Based Non-Reciprocal Radome, Generalized Scattering Matrix Analysis and Experimental Demonstration[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, 59(3): 810-817.
- [7] Fitzek F, Rasshofer R H. Automotive Radome Design-Reflection Reduction of Stratified Media[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2009, 8: 1076-1079.
- [8] Nair R U, Shashidhara S, Jha R M. Novel Inhomogeneous Planar Layer Radome Design for Airborne Applications[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2012, 11: 854-856.
- [9] 邹艳林, 刘其中, 郭景丽. MOM-PO 混合法分析带旋转体罩的天线[J]. 西安电子科技大学学报, 2007, 34(4): 566-569.
Zou Yanlin, Liu Qizhong, Guo Jingli. Analysis of Antennas with the Body of Revolution Radome Using the Hybrid MOM-PO Method[J]. *Journal of Xidian University*, 2007, 34(4): 566-569.
- [10] 党晓杰, 袁浩波. MOM-PO 混合方法中一种遮挡消影的新算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(1): 38-41.
Dang Xiaojie, Yuan Haobo. New Method for Removing the Hidden Face in the MOM-PO Hybrid Method[J]. *Journal of Xidian University*, 2012, 39(1): 38-41.
- [11] Duan B Y, Wang C S. Reflector Antenna Distortion Using MEFCM[J]. *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, 2009, 57(10): 3409-3413.
- [12] 李鹏, 郑飞, 季祥. 大型宽带反射面天线的机电耦合分析[J]. 西安电子科技大学学报, 2009, 36(3): 473-479.
Li Peng, Zheng Fei, Ji Xiang. Electromechanical Coupled Analysis of Large Broad Band Reflector Antennas[J]. *Journal of Xidian University*, 2009, 36(3): 473-479.

(编辑: 李恩科)

(上接第 31 页)

- [10] Damen M O, Gamal E, Caire G. On Maximum-Likelihood Detection and the Search for the Closest Lattice Point[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2003, 49(10): 2389-2402.
- [11] Wubben D, Bohnke R, Kuhn V, et al. MMSE Extension of V-BLAST Based on Sorted QR Decomposition [C]// Proceedings of IEEE VTC, Fall. Piscataway: IEEE, 2003: 508-512.
- [12] Aubert S, Nouvel F, Nafkha A. Complexity Gain of QR Decomposition Based Sphere Decoder in LTE receivers [C]// IEEE 70th Vehicular Technology Conference Fall. Piscataway: IEEE, 2009: 1-5(5378998).
- [13] Barni M, Cappellini V, Mecocci A. Fast Vector Median Filter Based on Euclidean Norm Approximation [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1994, 1(6): 92-94.
- [14] Cupaiuolo T, Siti M, Tomasoni A. Low-complexity High Throughput VLSI Architecture of Soft-output ML MIMO Detector[C]//Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Piscataway: IEEE, 2010: 1396 - 1401.
- [15] Paker O, Eckert S, Bury A. A Low Cost Multi-Standard Near-Optimal Soft-Output Sphere Decoder: Algorithm and Architecture[C]//Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Piscataway: IEEE, 2010: 1402 - 1407.

(编辑: 郭华)

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)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)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),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>