

# 宽带改型 B 夹层天线罩罩壁结构

王 笃 祥

(南京电子设备研究所 南京 210016)

**摘要** 本文提出了一种有效的宽带改型 B 夹层天线罩罩壁结构。这种结构,在  $0^\circ \sim 70^\circ$  的人射角范围内,  $0 \sim 40\text{GHz}$  带宽内,功率传输系数优于 80.0%,且垂直极化与水平极化之间的插入相位延迟的差异极小。

**关键词** 天线罩, B 夹层, 传输特性

## 1 引 言

天线罩的种类繁多,根据不同的要求,对天线罩提出了不同的指标。随着科学技术的不断发展,现代电子战中的雷达品种越来越多,雷达系统的性能不断提高。为了提高制导系统和电子设备抗电子干扰的能力,已经在制导系统和电子设备中采取了种种新技术,如频率捷变技术,多模工作方式等等。这些技术对天线罩提出了宽带特性和多模工作的要求,而反辐射导弹更直接地提出了宽频带探测的要求。

为了有效地提高天线罩的带宽,天线罩电气设计者主要着眼于天线罩材料以及罩壁结构的选择和研究,提出了许多提高天线罩带宽的方案,如单层壁结构<sup>[1]</sup>,金属含物结构<sup>[2]</sup>,槽形结构<sup>[3]</sup>,等等。这些方案不同程度地解决了一些问题,在实际宽带天线罩中得到了某些应用,但是仍有许多局限性,主要表现为,电气性能得到某些提高的同时,带来了诸如选材困难,结构复杂,强度不够,工艺加工难度大等方面的问题。

针对这些问题,本文对多层介质平板的传输特性进行了充分的分析,提出了一种在较大的人射角范围内具有良好电气性能的改型 B 夹层宽带天线罩罩壁结构。这种结构具有较好的结构强度,可望在包括高速宽带导弹天线罩在内的许多电子设备上得到应用。

## 2 设计理论

### 2.1 多层介质平板设计的意义

严格地求解天线-天线罩周围电磁场的方法,是将天线上的源和天线罩以及其周围的电磁场视为一个整体,根据天线边界上以及天线罩边界上所规定的边界条件,作为电磁场的边值问题来解。但是,这种方法目前只限于求解少数几种形状极为简单的天线罩问题。

1992-11-09 收到,1993-05-18 定稿

王笃祥 男,1965年生,硕士,工程师,现从事接收机等电子对抗设备的研制,感兴趣的方向有微波技术、天线罩、微波 CAD 等。

因此常采取某些近似方法对天线罩进行分析。分析表明<sup>[4]</sup>, 当天线罩外形曲面的曲率半径大于 1.5 时, 用射线光学近似法能够取得良好的分析结果。在这种情况下, 电磁波能量是沿着“射线”方向传播的, 而在介质分界面上, 能量的反射和透射情况与边界为平面的情况相同。这样对于某一近场点来说, 对应了从天线发来的一系列射向天线罩的波。我们可以假设平面波入射无限大介质平板, 这一介质平板为入射波与天线罩交点处天线罩的切平面, 如图 1 所示。则任意电磁波入射任意天线罩的问题, 可以近似为局部的平面波入射无限大介质平板的问题。

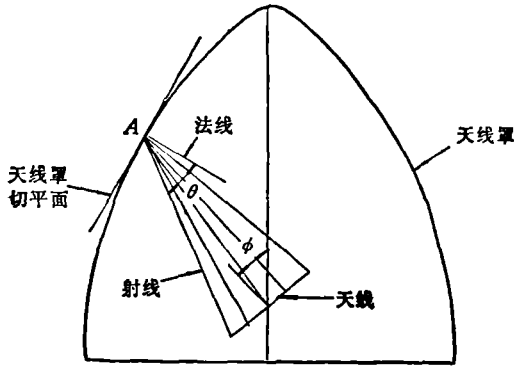


图 1 天线-天线罩系统示意图  
θ 为射线入射角 φ 为天线转角

由图 1 可见, 对于一定的天线转角, 即 φ 值为一给定的数值, 如果天线罩在 A 点的曲率增大, 即天线罩更流线化, 则射线在 A 点的入射角增大。因此如何设计出在较大的人射角范围内具有宽带特性的介质平板, 成为设计高度流线型宽带天线罩的关键。

### 2.2 多层无限大介质平板的传输特性

天线罩罩壁结构的设计, 包括电气性能设计和强度设计等等。在满足结构强度要求的情况下, 必须使电气性能最佳。而天线罩罩壁结构电气性能的研究, 可以简化为平面波入射多层介质平板传输特性的研究。

如图 2 所示, 在自由空间中有一均匀的各向同性的 N 层无限大介质平板。平板各层的介电常数分别为  $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_N$ , 磁导率分别为  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N$ , 损耗正切分别为  $\text{tg} \delta_1, \text{tg} \delta_2, \dots, \text{tg} \delta_N$ , 对应的厚度分别为  $d_1, d_2, \dots, d_N$ 。其中  $\epsilon_n, \mu_n, \text{tg} \delta_n$  分别是频率的函数。平面波以 θ 角从自由空间入射到多层介质平板时, 波在各层介质平板之间进行反射和传输。

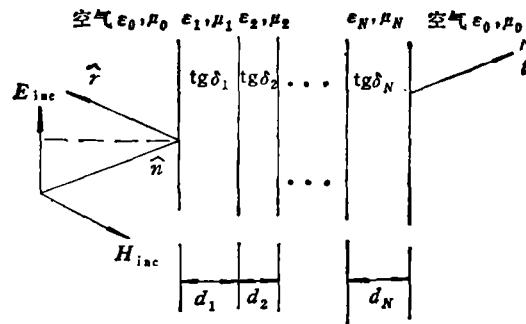


图 2 平面波入射多层无限大介质平板

当一任意极化的平面波入射到 N 层无限大介质平板上时, 此平面波可分解为两个相互垂直的线极化波。对于斜入射的平面电磁波, 任意极化的人射波可以分解为电场垂直于人射面的垂直极化波, 以及电场平行于人射面的平行极化波。这两种极化波具有不同的传输特性和反射特性。

若电场  $E_{inc}$  和磁场  $H_{inc}$  以 θ 角入射 N 层无限大介质平板, 则有<sup>[5]</sup>

$$\begin{pmatrix} E_{inc} \\ H_{inc} \end{pmatrix} = \prod_{i=1}^N \begin{pmatrix} \cos \alpha_i & (j/M_i) \sin \alpha_i \\ jM_i \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中

$$\alpha_i = (2\pi d_i/\lambda)(k_{ei} - \sin^2\theta)^{1/2}$$

为第  $i$  层介质平板的复相角;

$$M_i = \begin{cases} M_{\perp i} = (k_{ei}/k_{mi} - \sin^2\theta)^{1/2}/\cos\theta, & \text{垂直极化;} \\ M_{\parallel i} = (k_{ei}\cos\theta/k_{mi})/(k_{ei}/k_{mi} - \sin^2\theta)^{1/2}, & \text{平行极化} \end{cases}$$

为第  $i$  层介质平板的相对导纳;

$$k_{ei} = k_{ei}(1 - j\operatorname{tg}\delta_i)$$

为第  $i$  层介质平板的相对复介电常数;

$$k_{ei} = \varepsilon_i/\varepsilon_0$$

为第  $i$  层介质平板的相对介电常数;

$$k_{mi} = \mu_i/\mu_0$$

为第  $i$  层介质平板的相对磁导率;  $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $\varepsilon_0, \mu_0$  分别为自由空间的介电常数和磁导率;  $\lambda$  为入射波在自由空间中的波长。则对应于入射平面,复反射系数为

$$R = (E_{\text{inc}} - H_{\text{inc}})/(E_{\text{inc}} + H_{\text{inc}}); \quad (2)$$

复传输系数为

$$T = 2/(E_{\text{inc}} + H_{\text{inc}}); \quad (3)$$

插入相位延迟为

$$\phi_{\text{IPD}} = \arg T - (2\pi/\lambda) \sum_{i=1}^N d_i \cos\theta, \quad (4)$$

其中  $\arg T$  为复传输系数的相角。

### 2.3 B 夹层及其改型结构

天线罩的 B 夹层结构如图 3 所示。这种结构相当于传输线理论中的四分之一波长阻

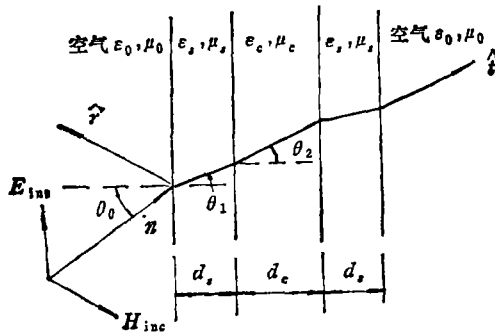


图 3 B 夹层结构

抗变换器,外层和芯层相匹配。这种三层结构的介质平板具有对称性,外层材料的介电常数比芯层材料的介电常数低,其特点是芯层的厚度选择具有较大的自由度,谐波带宽可应用于多频段天线罩罩壁结构的设计。

对于传统的 B 夹层结构,当考虑到入射角时,外层壁厚的选择为<sup>[6]</sup>

$$d_s = \lambda/(4\sqrt{k_{es} - \sin^2\theta}), \quad (5)$$

其中  $k_{es}$  为外层材料的相对介电常数;

$d_s$  为外层的壁厚;  $\lambda$  为入射波在自由空间中的波长。芯层和外层材料介电常数之间的关系为

$$k_{ec} = k_{es}^2, \quad (6)$$

其中  $k_{ec}$  为芯层材料的相对介电常数。对于垂直极化,则有

$$k_{ei} = \sqrt{k_{ec}} \cos\theta_s \cos\theta_2 / \cos^2\theta_1; \quad (7)$$

对于平行极化,则有

$$k_{e1} = \sqrt{k_{ec}} \cos^2 \theta_1 / (\cos \theta_1 \cos \theta_2). \quad (8)$$

(7) 式和(8)式中  $\theta_0$  为入射角;  $\theta_1$  为电磁波进入外层的折射角;  $\theta_2$  为电磁波进入芯层的折射角。

由于 B 夹层外层材料的介电常数较低,强度不高,因而其有限的宽带特性在实际应用中受到了很大的限制。如果考虑到外层和芯层介质损耗正切  $\text{tg} \delta_e$  和  $\text{tg} \delta_c$  的存在,且  $\text{tg} \delta_e$  和  $\text{tg} \delta_c$  以及各层的相对介电常数  $k_{e1}$  和  $k_{ec}$  是频率的函数,实际设计时,(5)~(8)式应加以适当的修正,引入复介电常数,分别以  $k_{e1} = k_{e1}(1 - j\text{tg} \delta_e)$  和  $k_{ec} = k_{ec}(1 - j\text{tg} \delta_c)$  替代(5)~(8)式中的  $k_{e1}$  和  $k_{ec}$ ,通过优化设计,在利用现有的新型材料的基础上,可以得到一种新的“改型”B 夹层结构。这种夹层结构具有良好的电气性能和结构强度。

### 3 设计结果

对于传统的 B 夹层结构,如果外层材料选择相对介电常数  $k_{e1} = 2.5$  的非碳化烧蚀材料 Duroid 5870,则可以满足高速飞行的导弹天线罩的气动力学要求。强度由芯层加固,可以选择已有的相对介电常数  $k_{ec} = 6.25$  的玻璃钢。显然  $k_{e1} = k_{e2}$ 。若各层材料的相对磁导率均为 1,对(5)式、(7)式和(8)式进行优化设计,可以得出这种 B 夹层结构的最佳结果为,在  $0^\circ \sim 60^\circ$  入射角范围内,  $0 \sim 40$  GHz 频率范围内,功率传输系数为 60.0%,外层的厚度为 1.47mm,芯层的厚度为薄于 3.9mm 的任一尺寸。具体结果见表 1。

考虑到在  $0 \sim 40$ GHz 频率范围内, Duroid 材料和玻璃钢的相对介电常数的变化均为  $\pm 0.02$ ,各层的介质损耗正切均小于 0.005,以  $k_{e1} = 2.5$ ,  $k_{ec} = 6.25$  为初始值,对目标函数(3)式进行优化设计。结果为当芯层厚度为薄于 7.5mm 的任一尺寸,相对介电常数为  $6.56 \pm 0.02$ ,外层厚度为  $1.47 \pm 0.1$ mm,相对介电常数为  $2.5 \pm 0.02$  时,在  $0^\circ \sim 70^\circ$  入射角范围内,功率传输系数优于 80.0%。实验结果验证了这种设计方法和设计结果的正确性<sup>[7]</sup>。显然这种结构不满足  $k_{e1} = k_{e2}$ 。这种改型 B 夹层结构的具体特性见表 1 和图 4~图 7。

表 1 几种夹层结构的比较

| 夹层类型         | 芯 层                 |                        |                              | 外 层                 |                        |                              | 入射角<br>$\theta(^{\circ})$ | 频率<br>$f(\text{GHz})$ | 功率传输<br>系数 $ T ^2$ |
|--------------|---------------------|------------------------|------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------|
|              | 相对介电<br>常数 $k_{ec}$ | 厚度<br>$d_c(\text{mm})$ | 损耗正切<br>$\text{tg} \delta_c$ | 相对介电<br>常数 $k_{e1}$ | 厚度<br>$d_e(\text{mm})$ | 损耗正切<br>$\text{tg} \delta_e$ |                           |                       |                    |
| B 夹层         | 6.25                | $\leq 3.9$             | —                            | 2.5                 | 1.47                   | —                            | $0 \sim 60$               | $0 \sim 40$           | $\geq 60\%$        |
| 改型 B 夹层      | $6.56 \pm 0.02$     | $\leq 7.5$             | $\leq 0.005$                 | $2.5 \pm 0.02$      | $1.47 \pm 0.1$         | $\leq 0.005$                 | $0 \sim 70$               | $0 \sim 40$           | $\geq 80\%$        |
| 金属加载<br>A 夹层 | —                   | 5.1                    | —                            | —                   | 1.5                    | —                            | 0                         | $14 \sim 31$          | $\geq 80\%$        |

为了便于比较,表 1 还列出了过去认为性能较好的宽带金属加载 A 夹层的性能<sup>[8]</sup>。

由表 1 可以看出,改型 B 夹层的电气性能和结构强度都比传统的 B 夹层的好,芯层厚

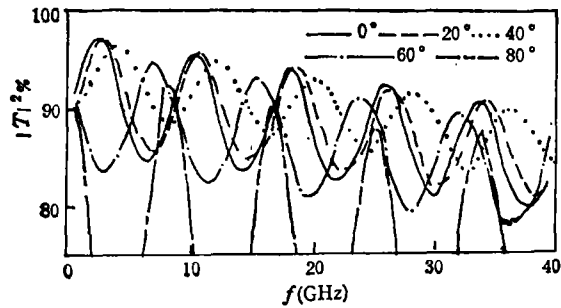


图 4 改型 B 夹层垂直极化功率传输系数

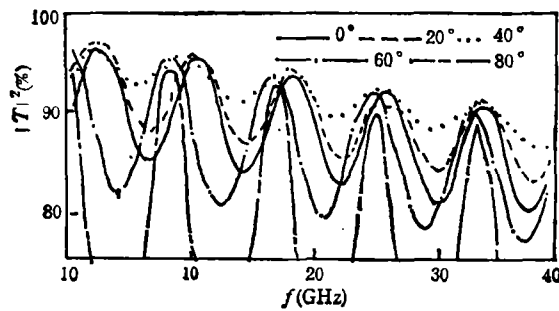


图 5 改型 B 夹层平行极化功率传输系数

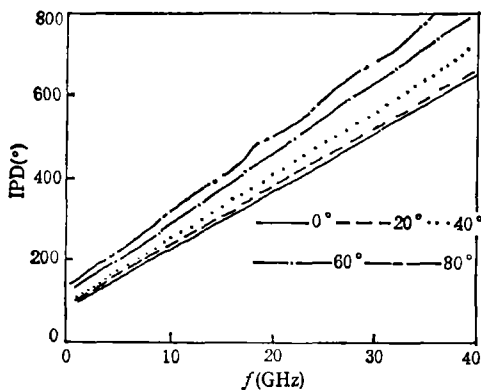


图 6 改型 B 夹层垂直极化插入相位延迟

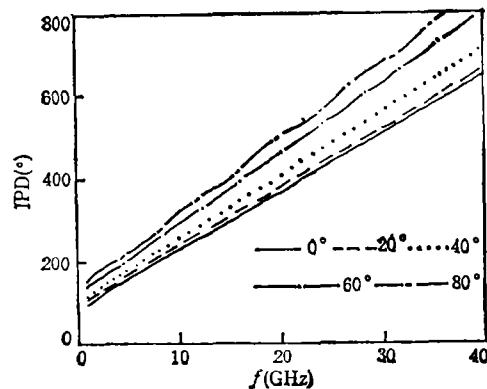


图 7 改型 B 夹层平行极化插入相位延迟

度增加,入射角范围增大,功率传输系数明显提高。与金属加载 A 夹层相比,改型 B 夹层的优势更明显。对于 A 夹层来讲,当入射角较大时,垂直极化和平行极化的芯层最佳厚度有很大的差别,对一种极化最佳而对另一种极化则性能很差,这是 A 型夹层不适宜于用作高度流线型天线罩的原因之一。另外,当入射角较大时,A 型夹层两种极化情况下插入相位延迟的差异很大,从而使这种夹层结构不适宜于用作高度流线型天线罩。由图 6 和图 7 可以看出,改型 B 夹层在很大的人射角范围内,两种极化情况下插入相位延迟的差异极小,充分保留了传统 B 夹层结构在插入相位延迟上所具有的优势。

## 4 结 论

本文提出的改型 B 夹层结构,与传统的 B 夹层结构相比,具有更好的电气性能和结构强度;克服了 A 型夹层两种极化情况下电气性能差异较大,带宽较窄,以及在大的入射角时传输特性严重变坏等方面的问题,展示了一种新的宽带天线罩的技术途径。这种改型 B 夹层结构,可望在宽带天线罩,特别是在具有高度流线型的超音速导弹天线罩中得到应用。

**致谢** 感谢彭望泽研究员的指导和帮助。

## 参 考 文 献

- [1] Bassett H L, Bodnar D G. Broadband Radome Techniques, AD-A085663. 1974.
- [2] Ernst J S. Broadband Metallic Radome, AFAL-TR-79-1142. 1979.
- [3] Rope E L, Tricoles G. Broadband Millimeter Wave Radome, Proceedings of the 15th Symposium on Electromagnetic Windows. Georgia, U. S. A.: 1980, 93—95.
- [4] 卡普伦 B A. 超高频天线罩(上). 北京: 八机部三院三部, 1980, 第2.8节.
- [5] Cornbleet S. Microwave Optics—The Optics of Microwave Antenna Design, London, New York, San Francisco: Academic Press, 1976, 162—167.
- [6] 王笃祥. 宽带天线罩技术分析. 内部报告. 南京: 航空航天工业部八五——研究所, 1989, 14—15.
- [7] 王笃祥. 宽带导弹天线罩分析和计算: [硕士论文]. 南京: 航空航天工业部八五——研究所, 1990, 67—68.
- [8] Conti D A. Broadband Radome Considerations. Proceedings of the 18th Symposium on Electromagnetic Windows, Georgia, U. S. A.: 1986, 91—101.

## BROADBAND MODIFIED B SANDWICH AS RADOME'S LAYER STRUCTURE

Wang Duxiang

(Nanjing Electronic Equipment Institute, Nanjing 210016)

**Abstract** An effective broadband modified B sandwich as radome's layer structure is adopted. The power transmission coefficient of this sandwich is over 80% under large incident angle ( $0^\circ$ — $70^\circ$ ) and broadband (0—40GHz). The difference of insertion phase delay (IPD) between perpendicular polarization and parallel one is very small.

**Key words** Radome, B sandwich, Transmission characteristics