

低插损多频段天线罩壁电性能

张明习^{1,2} 樊康¹ 何小祥¹

(1. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 210016; 2. 高性能电磁窗航空科技重点实验室, 济南, 250023)

摘要:采用 B 夹层天线罩结构, 利用四端口网络分析法, 为一款工作在 Ka 波、K 波和 Ku 波段内的“动中通”(动卫星通信系统)通讯系统设计了专用低插损、多频段天线罩壁。分析了不同极化, 不同入射角下, 天线罩壁的传输系数、反射系数和插入相移。结果表明: 在 $0\sim 40^\circ$ 的入射角范围内, Ka 波段内的功率传输系数优于 95.0%, K 波和 Ku 波段内的功率传输系数优于 88.8%, 功率反射系数都小于 6.3%, 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:天线罩壁; 低插损; 多频段; 四端口网络; B 夹层

中图分类号: TN802.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)06-0851-05

Low Insertion Loss and Multiband Radome Walls

Zhang Mingxi^{1,2}, Fan Kang¹, He Xiaoxiang¹

(1. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. The Aeronautical Science Key Lab for High Performance Electromagnetic Windows, Jinan, 250023, China)

Abstract: A low insertion loss and multiband B-sandwich radome wall is designed specially for mobile satellite communication system which works at Ka-band, K-band and Ku-band, by using the four-port transmission formula of microwave network. Transmission coefficient, reflection coefficient and insertion phase delay are analyzed. When the angle of incidence is $0\sim 40^\circ$, transmission coefficient is better than 95% within Ka-band, better than 88.8% within K-band and Ku-band, reflection coefficient is less than 6.3% at all band, and the difference of insertion phase delay between vertical and horizontal polarization is very small.

Key words: radome wall; low insertion loss; multiband; four ports transmission formula; B-sandwich

天线罩作为雷达系统的组成部分, 是一种集电气性能、结构强度、刚度、气动外形和特殊功能要求于一身的功能复合材料构件。其作用在于保护天线的同时也为其提供发射和接收的窗口^[1]。

近些年来, 随着电子科技技术的不断发展, 天线的工作频率逐渐由单频率发展为宽频带, 直至多波段、全频段, 频率范围相应地从低频区覆盖到了高频区^[2]。为了满足这些先进的发射系统, 天线罩须在多个特定的频率段上有较高传输系数。而且

部分频段位于毫米波区域, 这就对天线罩材料的一致性、制造公差以及均匀性提出更高要求, 加大了天线罩的设计难度。国外有很多相关的研究^[3-4], 国内国防科技大学袁乃昌、北京航空材料研究院温磊等发表过相关的文章^[5-6]。

本文根据要求, 设计出一款用于“动中通”通讯系统的 B 夹层天线罩壁。重点分析了不同极化、频率和入射角对天线罩壁的传输系数、反射系数以及插入相移带来的影响; 并且对材料选择和制造公

基金项目: 航空科学基金(20121852031)资助项目。

收稿日期: 2013-10-08; **修订日期:** 2014-09-10

通信作者: 何小祥, 男, 博士, 副教授, E-mail: eexxhe@nuaa.edu.cn。

差进行了研究。

1 电性能设计

近年来“动中通”通信系统的发展速度很快,在军民两个领域都有极为广泛的应用前景。现在用得较为广泛的“动中通”通信系统一般选用 Ku 波段中 12~14.75 GHz 部分^[7]。本文设计的天线罩罩壁覆盖上述波段,并增加 K 波段和 Ka 波段中部分频段。具体指标为:在 12.25~12.75 GHz,14.0~14.5 GHz 内大于 89%(插入损耗 -0.5 dB);在 $\text{freq1} \sim \text{freq2}, \text{freq3} \sim \text{freq4}$ 内大于 83%(插入损耗 -0.8 dB)。简单的结构设计不能满足多频段,必须采用多层罩壁结构;同时考虑到层数越多,加工难度越大,产生的误差也就越大。经过比较,选择 B 夹层罩壁结构。B 夹层是由比较致密的芯层和两层介电常数比较小、低密度的内外表面蒙皮组成,如图 1 所示。

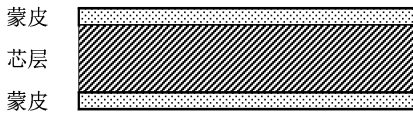


图 1 天线罩 B 夹层结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of B-sandwich radome wall

本文蒙皮材料介电常数为 2.5,正切损耗小于 10^{-3} ,厚度为 d_1 。芯层材料介质常数 4.5,正切损耗小于 5×10^{-3} ,厚度为 d_2 。用于天线罩的复合材料由增强纤维和树脂基体构成,两者的电性能良好才能成型出好的透波材料。本文内外蒙皮要求介电常数为 2.5,采用超高温分子量聚乙烯纤维布^[8](UHMWPE)与环氧树脂复合。芯层要求介电常数为 4.5,采用 E 玻纤与树脂体系可以满足要求^[9-10]。表 1 列出了优选材料的部分基本性能。

表 1 优选材料的基本性能

Tab. 1 Basic properties of the material

夹层	材料类别	相对密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	介电常数 (10 GHz)	损耗角正切 (10 GHz)
外层	聚乙烯纤维布	0.95~0.98	2.3 (原料 10^6 Hz)	5×10^{-4} (原料 10^6 Hz)
	环氧树脂	1.3	3	0.02
芯层	E 玻璃纤维布	2.54	6.13	0.003 9
	环氧树脂	1.3	3	0.02

2 四端口网络分析

天线罩罩壁结构的设计,包括电气性能设计和

强度设计等。在满足结构强度要求下,必须使电气性能最佳。而天线罩罩壁结构电气性能的研究,可以简化为研究平面波入射多层介质平板的传输性能。

天线罩罩壁的多层介质平板研究可以用四端口网络理论进行描述^[2,11]。根据四端口理论,多层介质平板的电参数结构,可以视为 N 个四端网络的级联,如图 2 所示。则总的转移矩阵为各分网络转移矩阵的乘积。

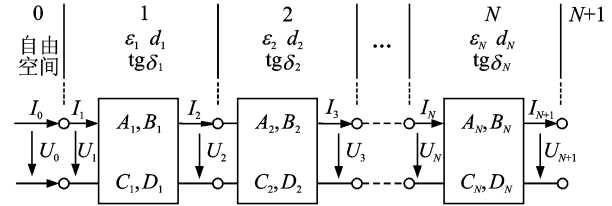


图 2 多层壁的四端口等效图

Fig. 2 Four-port equivalent figure of multi-layer wall

所以,多层介质平板的转移矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_N & B_N \\ C_N & D_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

各层分网络元素的通式^[2]为

$$\begin{cases} A_n = D_n = \text{ch}jv_n d_n \\ B_n = Z_{cn} \text{sh}jv_n d_n \\ C_n = \text{sh}jv_n d_n / Z_{cn} \end{cases} \quad (2)$$

$$Z_{cn} = \begin{cases} Z_{cn}^{\parallel} = Z_0 \frac{\epsilon_0}{\epsilon_n} \sqrt{\frac{\epsilon_n}{\epsilon_0} - \sin^2 \theta_0} \\ Z_{cn}^{\perp} = Z_0 / \sqrt{\frac{\epsilon_n}{\epsilon_0} - \sin^2 \theta_0} \end{cases} \quad (3)$$

$$\epsilon_n = \epsilon_n (1 - \text{jtg}\delta_n) \quad (4)$$

$$v_n d_n = \frac{2\pi d_n}{\lambda_0} \sqrt{\frac{\epsilon_n}{\epsilon_0} - \sin^2 \theta_0} \quad (5)$$

式中: N 为多层介质板的总层数, $n=1,2,3,\dots,N$; d_n 为第 n 层介质板的厚度; $\text{tg}\delta_n$ 为第 n 层介质板的损耗角正切,当 $n=0$ 时,即为自由空间。

在通常的天线罩设计中,多层介质板两边都是自由空间。可以得出多层介质下的透过系数和反射系数分别为

$$T_N = \frac{2}{A + B' + C' + D'} \quad (6)$$

$$R_N = \frac{(A + B') - (C' + D)}{A + B' + C' + D} \quad (7)$$

式中: $B' = B/Z_{c0}$, $C' = Z_{c0}C$ 。对于垂直和水平两种极化,有 $Z_{c0} = \begin{cases} Z_{c0}^{\parallel} = Z_0 \cos\theta_0 \\ Z_{c0}^{\perp} = Z_0 \cos\theta_0 \end{cases}$; T_N 表示复透过系数,则其引入的相位与介质层电长度相位差为插入

相移 η_N , 有

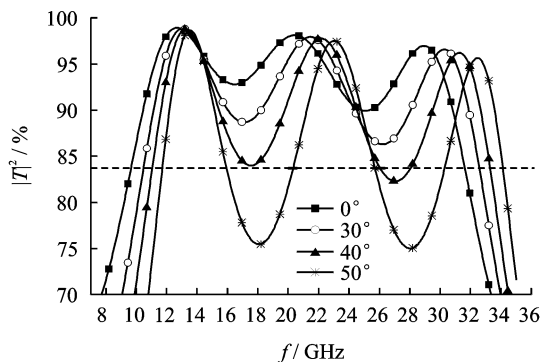
$$\eta_N = \Phi_{TN} - \frac{2\pi d}{\lambda_0} \cos\theta_0 \quad (8)$$

式中: Φ_{TN} 为复透过系数 T_N 的复角; $d = d_1 + d_2 + \dots + d_N$ 为多层介质平板的总厚度; λ_0 为电波在自由空间的波长; θ_0 为电波的入射角。

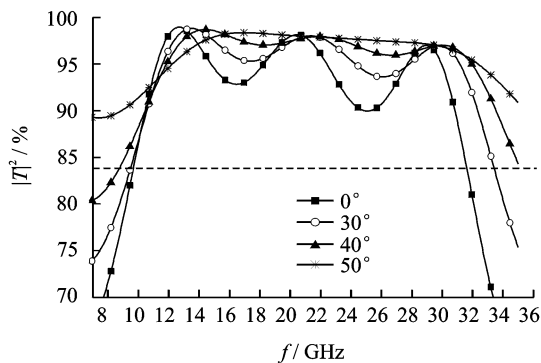
3 设计结果与分析

运用四端口分析法, 计算上述所给结构参数。图 3、4 分别为垂直极化和水平极化下, 不同角度时此介质平板的功率传输系数和功率反射系数。

对比垂直极化和水平极化, 由图可知: 随着入射角的变大, 垂直极化下的传输系数和反射系数变化剧烈。而水平极化随着角度变大, 传输系数越来越高, 全频段几乎都在 90% 之上; 而反射系数越来越低, 大角度下几乎为 0, 完全达到指标要求。这是由于水平极化波存在一个界面反射系数为 0 的布儒斯特角 $\theta_p = \arctan \sqrt{\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0}}$ 。本结构中, 空气 ($\epsilon_0 = 1$)/蒙皮 ($\epsilon_1 = 2.5$) 界面上, 布儒斯特角 $\theta_p \approx 58^\circ$; 蒙皮 ($\epsilon_1 = 2.5$)/芯层 ($\epsilon_2 = 4.5$) 界面上 $\theta_p \approx 40^\circ$, 因此在入射角达到 40° 之后, 出现了极小的反



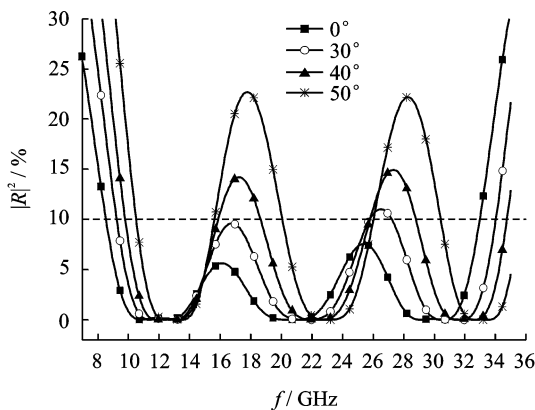
(a) 垂直极化功率传输系数



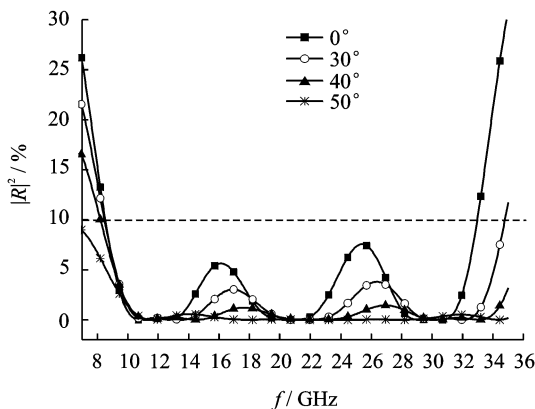
(b) 水平极化功率传输系数

图 3 天线罩壁功率传输系数

Fig. 3 Power transmission coefficient of radome wall



(a) 垂直极化功率反射系数



(b) 水平极化功率反射系数

图 4 天线罩壁功率反射系数

Fig. 4 Power reflection coefficient of radome wall

射系数和极大的透过系数, 所以在设计时要把较多的注意力用在垂直极化波的性能上^[2]。表 2 为天线工作的目标频段内垂直极化下, 传输系数和反射系数随角度变化情况。

高频段天线罩壁的传输系数和发射系数对入射角度的变化很敏感, 设计者在设计时必须考虑不同入射角下天线罩壁的特性。由图 3(a) 和图 4(a) 可知, 随着入射角的增大, 传输系数曲线和反射系数曲线整体往高频移动, 频率越高移动幅度越大, 并且震荡越来越强。由表 2 可以看出, 在 0~50° 内, Ku 波段目标频段内的传输系数都大于 90%, 满足指标要求; 而在 K 波段和 Ka 波段, freq1 处传输系数由 97% 下降到 80%, freq2 处传输系数由 96.6% 下降到 78.3%, 不符合指标要求。要确保在目标频段内都满足要求, 最大入射角应小于 50°。同时, 反射系数在目标频段内应尽量小。因为在高频段, 反射的作用不仅仅表现在损耗变大上, 更主要的是对天线的其他指标产生影响, 发射系数过大, 在实际的天线罩测试中, 往往会出现天线波形的畸变, 方向图抖动等现象。观察表 2, 在

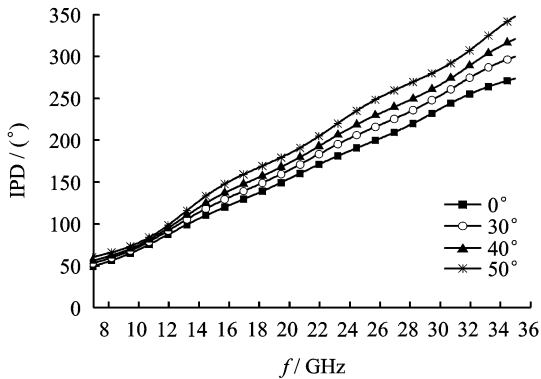
表2 垂直极化下传输系数和反射系数

Tab. 2 Transmission coefficient and reflection coefficient under vertical polarization

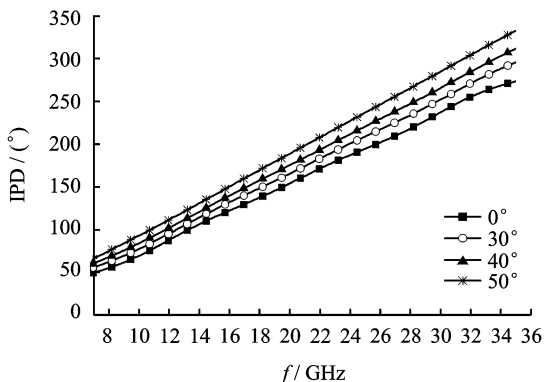
频率	0°		30°		40°		50°		
	$ T ^2/\%$	$ R ^2/\%$	$ T ^2/\%$	$ R ^2/\%$	$ T ^2/\%$	$ R ^2/\%$	$ T ^2/\%$	$ R ^2/\%$	
Ku 波段	12.25 GHz	98.6	0.10	97.3	0.10	95.3	0.070	90.7	0.01
	12.75 GHz	98.9	0.00	98.7	0.04	97.9	0.100	96.0	0.05
	14.0 GHz	97.0	1.40	96.7	1.00	97.3	0.700	97.5	0.30
	14.5 GHz	95.7	2.70	95.3	2.50	95.1	2.260	95.0	1.70
K 波段	freq1	97.5	0.10	94.2	1.40	89.2	4.800	80.0	13.80
	freq2	97.6	0.01	97.8	0.01	96.1	0.223	90.0	2.50
Ka 波段	freq3	96.6	0.03	95.1	1.10	89.4	6.200	78.3	18.30
	freq4	88.8	0.10	95.3	0.06	96.0	0.160	89.0	5.10

0~40°内目标频段内的反射系数都不大于6.2%。因此,综合天线罩壁的传输系数和反射系数,天线工作时应尽量确保电磁波入射方向与天线罩夹角小于40°。

插入相移(Insertion phase delay, IPD)就是透过波的相位相对于移去天线罩时,在同一点上波的相位延迟。插入相移的变化会导致增益损失、波瓣宽度的改变、波束指向的偏移以及旁瓣点平的增加。因此,插入相移也是天线罩设计者必须研究的一项指标。图5为不同入射角下垂直极化和水平



(a) 垂直极化下IPD



(b) 水平极化下IPD

图5 天线罩壁的IPD

Fig. 5 Insertion phase delay (IPD) of radome wall

极化的插入相移。可以看出,在不同入射角下两种极化的插入相移差异都很小,保持很强的一致性。这也是一开始选择B夹层的原因之一^[12]。

天线罩罩壁工作在高频段,工作波长短,对天线罩的各层电厚度精度要求很高。为保证此天线罩壁在目标的频段内都达到要求,对各层厚度的公差分析是很有必要的。当芯层厚度不变为 d_2 ,蒙皮减少0.2 mm,在入射角40°时freq1处传输效率首先达不到指标要求;而蒙皮增加0.1 mm,在freq4处0°入射下传输系数首先低于83%,如图6

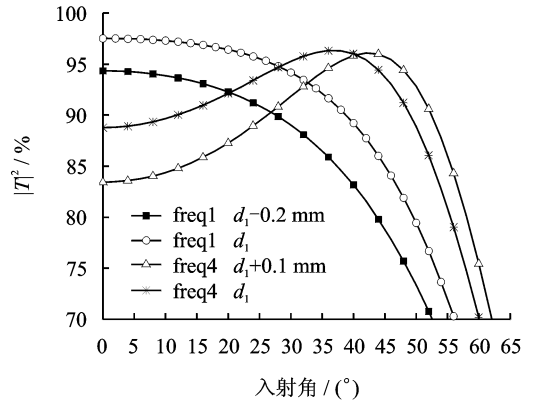
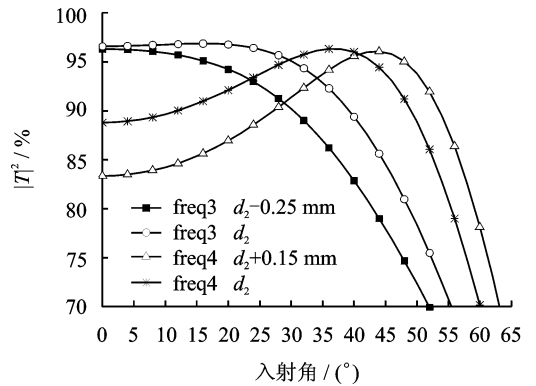
(a) d_2 不变, d_1 的公差分析(b) d_1 不变, d_2 的公差分析

图6 各层厚度公差分析

Fig. 6 Tolerance analysis of each layer thickness

(a)所示。当蒙皮厚度不变为 d_1 , 芯层减少 0.25 mm, freq3 处 40° 入射角下首先达不到要求; 芯层增加 0.15 mm, 0° 入射下 freq4 处的传输系数首先达不到要求, 如图 6(b) 所示。因此, 为了保证每个频段都符合指标要求, 加工制作时蒙皮厚度的公差应控制在 ± 0.1 mm 之内, 芯层厚度公差控制在 ± 0.15 mm 之内。在材料制作过程中, 这样的加工精度是可以达到的。

4 结 论

(1) 通过四端口网络分析方法, 对设计的天线罩罩壁进行电性能分析, 采用 B 夹层结构实现了多频段的要求, 并且在 0° 到 40° 内传输系数都优于指标要求, 而且具有低反射系数和插入相移的一致性等特点, 满足指标要求的电性能。

(2) 选用超高温分子量聚乙烯纤维布与不饱和聚氨酯复合材料为内外蒙皮, E 玻纤与树脂复合材料为内芯, 能够实现理论所需的材料。控制蒙皮在理论 ± 0.1 mm、芯层 ± 0.15 mm 内可以满足电性能要求。

参考文献:

[1] 轩立新, 李勇, 高树理. 机载雷达罩技术发展展望[C] // 第十三届全国复合材料学术会议论文集. 北京: 航空工业出版社, 2004: 1227-1232.
Xuan Lixin, Li Yong, Gao Shuli. Advance in airborne radome technology [C] // Proceedings of the 13th National Conference on Composite Materials. Beijing: Aviation Industry Press, 2004: 1227-1232.

[2] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.
Du Yaowei. The design method of telecommunication radome [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1994.

[3] Kozakoff D J. Analysis of radome-enclosed antennas [M]. Boston: Artech House, 1997.

[4] Keisuke Noguchi, Motoo Mizusawa, Shin-ichi Betsudan, et al. A five-layer radome panel for simultaneous use of microwave and millimeter wave bands[C] // Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 2003(4): 412-415.

[5] 袁乃昌, 莫锦军. 多频段天线罩功率传输系数的优化设计[J]. 电波科学学报, 1999, 14(4): 378-383.

Yuan Naichang, Mo Jinjun. On optimizing the power transmission coefficient of multi-frequency radomes [J]. Chinese Journal of Radio Science, 1999, 14(4): 378-383.

[6] 温磊, 王峰, 蔡良元, 等. 机载大曲率多频段天线罩的研制[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(4): 50-52.
Wen Lei, Wang Feng, Cai Liangyuan, et al. Development of large curvature multi-frequency airborne radome [J]. Aerospace Materials & Technology, 2010, 40(4): 50-52.

[7] 张家林, 吕雪松. 高性能动中通天线罩设计、制造和应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(1): 56-59.
Zhang Jialin, Lv Xuesong. Design manufacture and application of high performance radome [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(1): 56-59.

[8] 蒲侠, 张兴华, 童速玲. 超高强度高模聚乙烯纤维及其复合材料的研究进展[J]. 合成纤维工业, 2004, 27(4): 35-38.
Pu Xia, Zhang Xinghua, Dong Suling. Research progress of ultrahigh strength high-modulus polyethylene fiber and its composites [J]. China Synthetic Fiber Industry, 2004, 27(4): 35-38.

[9] 李义全, 王继燕, 王海龙, 等. 高频透波玻璃钢天线罩性能的研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2011(3): 42-44.
Li Yiquan, Wang Jiyan, Wang Hailong, et al. Study on wave-transmissivity properties of high-frequency GFRP antenna cover [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2011(3): 42-44.

[10] 夏文干, 韩养军, 杨洁, 等. 高功率高透波材料的研究[J]. 高科技纤维与应用, 2003, 28(2): 39-43.
Xia Wengan, Han Yangjun, Yang Jie, et al. Study on high power and high wave-transmissivity materials [J]. Hi-tech Fiber & Application, 2003, 28(2): 39-43.

[11] 陈国平, 张弘, 杜建春. 多层天线罩功率系数和插入相移的仿真计算[J]. 电子信息对抗技术, 21(1): 45-48.
Chen Guoping, Zhang Hong, Du Jianchun. The calculation of power coefficient and insert phase different coefficient of multilayer radome [J]. Electronic Information Warfare Technology, 21(1): 45-48.

[12] 王笃祥. 宽带改型 B 夹层天线罩罩壁结构[J]. 电子与信息学报, 1994, 16(3): 232-237.
Wang Duxiang. Broadband modified B-sandwich as radomes layer structure [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 1994, 16(3): 232-237.