

# 天线罩交叉瞄准误差成因分析

杨 晖 候 瑞

(中国空空导弹研究院, 洛阳 471009)

**摘要:** 提出了均匀对称天线罩具有交叉瞄准误差的可能性, 通过对天线罩入射波垂直分量的精确推导, 进而对均匀对称天线罩交叉瞄准误差的产生机理进行了严格分析, 指出了均匀对称天线罩产生交叉瞄准误差的条件, 即完全均匀对称的天线罩在非垂直、水平极化情况下将产生交叉瞄准误差。并通过理论计算天线罩的瞄准误差进行了验证。而对天线罩的交叉瞄准误差实测结果也与上述结论吻合。

**关键词:** 天线罩, 交叉瞄准误差, 极化, 插入相位

## An Analysis of Radome CBSE

YANG Hui, HOU Rui

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** This paper points out the possibility that CBSE(cross boresight-error) exist in even symmetrical radome, by deducing the vertical portion of incident wave to radome, analyses the mechanism that even symmetrical radome can induce CBSE, and elucidates the condition that even symmetrical radome bring forth CBSE., i.e., even symmetrical radome will bring forth CBSE under the case of non-vertical polarization and non-horizontal polarization. All is proved to be correct by calculating and testing BSE of radome. It also has the same conclusion with the result of the test.

**Key words:** Radome, CBSE, Polarization, Insertion phase

## 引 言

天线罩是雷达制导导弹的关键部件, 天线罩的性能直接影响着整个导弹系统的品质。评估天线罩电气性能的指标中, 瞄准误差(BSE)及其二次参数——瞄准误差斜率(BSS)是最重要的参数。它们影响导弹制导系统的稳定。

随着对雷达制导、导弹制导精度要求的日益提高, 相应地就要求天线罩的性能更加优异, 虽然可以尝试采用系统补偿来抵消瞄准误差的影响<sup>[1, 2]</sup>, 但由于补偿的作用是有限的。因此, 提高天线罩的性能更为现实。这样就必须对天线罩瞄准误差进行更加深入和全面的研究。必须对天线罩交叉瞄准误差深入研究。

过去普遍认为对称天线罩交叉瞄准误差, 是由天线罩加工造成的不对称性或材料的不均匀性引起的, 这的确是引起交叉瞄准误差的重要原因。但这是否唯一的原因呢?

通过对大量天线罩的测试发现, 45° 极化情况

下天线罩的交叉瞄准误差, 普遍高于水平和垂直极化情况下天线罩的交叉瞄准误差, 这表明除了天线罩加工造成的不对称性或材料的不均匀性外, 还有其他原因引起天线罩的交叉瞄准误差。为此我们对该现象进行深入分析。

## 1 天线罩入射波极化分量的分析

### 1.1 天线罩坐标系、天线坐标系及其关系

图 1 所示, 天线罩坐标系为( $x_R, y_R, z_R$ ), 天线罩坐标原点为天线的口面中心,  $x_Ry_R$  面垂直于天线罩纵轴。天线坐标系为( $x, y, z$ ), 天线坐标系与天线罩坐标系的原点重合,  $xy$  面与天线口面重合。

天线坐标系中  $x$  轴为电场  $E$  的方向,  $y$  轴为磁场  $H$  的方向,  $\hat{u}$  为电磁波传播方向,  $\hat{u}$  与天线口面垂直。将天线罩坐标系 ( $x_R, y_R, z_R$ ) 作为固定坐标系。如图 2 所示, 天线坐标系 ( $x, y, z$ ) 和天线罩坐标系 ( $x_R, y_R, z_R$ ) 的相对位置可以通过以下表明:

(1) 将天线罩坐标系 ( $x_R, y_R, z_R$ ) 绕  $z_R$  轴旋转

\* 收稿日期: 2005-11-14; 定稿日期: 2006-03-28

$\theta$  角, 形成坐标系  $(x^*, y^*, z^*)$ 。

(2) 坐标系  $(x^*, y^*, z^*)$  绕  $y_R$  轴旋转  $\phi$  角, 得到天线坐标系  $(x, y, z)$ 。

其中:  $\theta$ —天线极化角;  $\phi$ —天线扫描角。

因此  $\theta = 0^\circ$  时为水平极化,  $\theta = 90^\circ$  时为垂直极化。

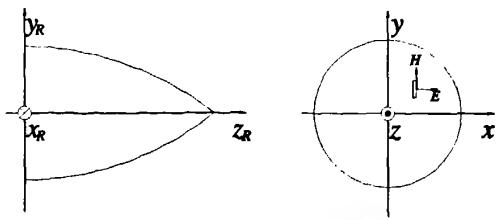


图 1 天线罩和天线坐标系

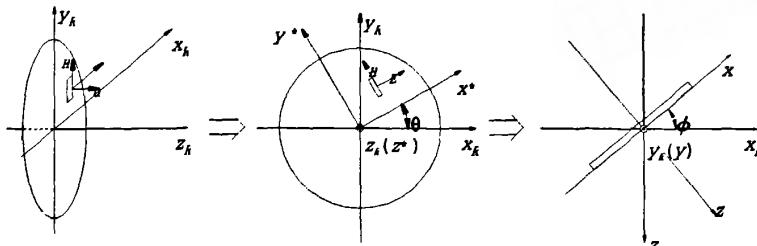


图 2 天线和天线罩坐标系的相对位置

## 1.2 入射波极化分量

### 1.2.1 坐标变换

电场  $E$  方向单位矢量、入射波传播方向单位矢量  $u$  在天线坐标系分别为  $E(1,0,0)$  和  $u(0,0,1)$ , 把它们变换到天线罩坐标系, 则其分别为:

$$E(1,0,0) \Rightarrow E_R(\cos \theta \cos \phi, \sin \theta, -\cos \theta \sin \phi) \quad (1)$$

$$u(0,0,1) \Rightarrow u(\sin \phi, 0, \cos \phi) \quad (2)$$

### 1.2.2 天线罩表面法向单位矢量

图 3 所示, 假设天线罩的表面为旋转曲面, 曲面上任意一点为  $(x, y, z)$ , 那么在天线罩坐标系的曲面方程可以表示为:

$$r = r(z) \quad (3)$$

式中:  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

令点  $(x, y, z)$  的法向单位矢量与  $z$  轴的夹角为  $\beta$ , 则:

$$\beta = \tan^{-1}(-1/\frac{dr}{dz}) \quad (4)$$

法向单位矢量为:

$$f(\sin \beta \cos \alpha, \sin \beta \sin \alpha, \cos \beta) \quad (5)$$

式中:  $\alpha = \tan^{-1}(\frac{y}{x})$

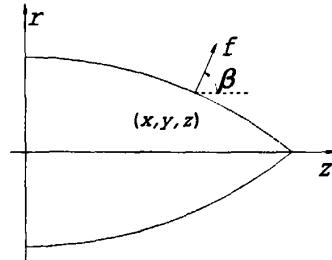


图 3

### 1.2.3 入射波极化分量计算

天线罩上半部任意一点  $A(x, y, z)$  的入射波的垂直极化分量为:

$$\begin{aligned} E_{11} &= E_R \cdot (u \times f) \\ &= \sin \theta (\cos \phi \sin \beta \cos \alpha - \\ &\quad \sin \phi \cos \beta) - \cos \theta \sin \beta \sin \alpha \end{aligned} \quad (6)$$

天线罩下半部与  $A(x, y, z)$  对称的点  $B(x, -y, z)$  的入射波情况与  $A$  点的完全一样, 只是

$$\alpha_1 = \tan^{-1}(\frac{-y}{r}) = -\alpha \quad (7)$$

因此, 法向单位矢量为:

$$f(\sin \beta \cos \alpha, -\sin \beta \sin \alpha, \cos \beta) \quad (8)$$

点  $B(x, -y, z)$  的入射波的垂直极化分量为:

$$\begin{aligned} E_{12} &= \sin \theta (\cos \phi \sin \beta \cos \alpha - \\ &\quad \sin \phi \cos \beta) + \cos \theta \sin \beta \sin \alpha \end{aligned} \quad (9)$$

### 1.2.4 入射波极化分量的比较

比较式(6)和式(9), 可看出一般情况下平面入射波在天线罩上半部的任意1点A和天线罩下半部与之对称的点B的垂直极化分量不相等。

但在水平极化时, 即 $\theta = 0^\circ$

$$E_{\perp 1} = -\sin \beta \sin \alpha \quad (10)$$

$$E_{\perp 2} = \sin \beta \sin \alpha \quad (11)$$

垂直极化时, 即 $\theta = 90^\circ$

$$E_{\perp 1} = \cos \phi \sin \beta \cos \alpha - \sin \phi \cos \beta \quad (12)$$

$$E_{\perp 2} = \cos \phi \sin \beta \cos \alpha - \sin \phi \cos \beta \quad (13)$$

由上可见: 在水平极化和垂直极化情况下, 平面入射波在天线罩上半部的任意1点A和天线罩下半部与之对称的点B的垂直极化分量大小相等。

## 2 天线罩交叉瞄准误差成因分析

### 2.1 平行极化分量和垂直极化分量的功率透过系数和插入相移

对于一般的单层天线罩, 某一点处的功率透过系数和插入相移近似等于厚度、材料相同的单层平板的透过系数和插入相移。

单层平板的功率透过系数和插入相移在形式上平行极化和垂直极化是相同的, 分别为<sup>[3]</sup>:

$$T = t_0 e^{-j\phi} = \frac{A_b [(1 - r_{ab0})^2 + 4r_{ab0}^2 \sin^2 \psi_{ab}]^{1/2}}{[(1 - A_b^2 r_{ab0}^2)^2 + 4A_b^2 r_{ab0}^2 \sin^2(2\phi_b + 2\psi_{ab})]^{1/2}} e^{-j\phi} \quad (14)$$

式中:

$$\phi_1 = \phi_b + \phi_2 - \phi_3$$

$$\phi_2 = tg^{-1} \frac{A_b^2 r_{ab0}^2 \sin^2(2\phi_b + 2\psi_{ab})}{1 - A_b^2 r_{ab0}^2 \cos^2(2\phi_b + 2\psi_{ab})}$$

$$\phi_3 = tg^{-1} \frac{r_{ab0}^2 \sin 2\psi_{ab}}{1 - r_{ab0}^2 \cos 2\psi_{ab}}$$

$$A_b = e^{-(\pi/\lambda_0)(d_b \epsilon_{b0} \delta_b)/(\epsilon_{b0} - \sin^2 \theta_i)^{1/2}}$$

$$\phi_b = 2\pi d_b / \lambda_0 \cdot \sqrt{\epsilon_{b0} - \sin^2 \theta_i}$$

式中:

$$r_{ab0} = -(n_{ab} - 1)/(n_{ab} + 1)$$

$$\psi_{ab} = tg^{-1} [2n_{ab} k_{ab} / (n_{ab}^2 - 1)]$$

对于平行极化分量:

$$n_{ab//} = \epsilon_{b0} \cos \theta_i / \sqrt{\epsilon_{b0} - \sin^2 \theta_i} \quad (15)$$

$$k_{ab//} = (\epsilon_{b0} - 2 \sin \theta_i) \operatorname{tg} \delta_b / 2(\epsilon_{b0} - \sin^2 \theta_i) \quad (16)$$

对于垂直极化分量:

$$n_{ab\perp} = \sqrt{\epsilon_{b0} - \sin^2 \theta_i} / \cos \theta_i \quad (17)$$

$$k_{ab\perp} = \epsilon_{b0} \operatorname{tg} \delta_b / 2(\epsilon_{b0} - \sin^2 \theta_i) \quad (18)$$

可见水平极化分量与垂直极化分量的 $n_{ab}$ 和 $k_{ab}$ 相差很大。

进而可看出水平极化分量的功率透过系数和插入相移与垂直极化分量的功率透过系数和插入相移相差很大。

### 2.2 均匀对称天线罩交叉瞄准误差产生的机理分析

来自远方的入射波沿着与z轴平行的方向照射到天线罩表面, 波前为平面, 幅度相同相位一致, 如果入射波通过天线罩后, 波前上、下两部分的幅度、相位以xz坐标面对称, 那么天线罩的交叉瞄准误差将等于0。如果入射波通过天线罩后, 波前上、下两部分的幅度、相位以xz坐标面不对称, 那么天线罩将产生交叉瞄准误差。

根据式(6)(9)可知:

天线罩表面任意以xz坐标面对称的上、下两点A(x,y,z)、B(x,-y,z)的入射波的垂直极化分量不同(水平极化和垂直极化两种情况除外)。而由上文可知: 水平极化分量的功率透过系数和插入相移与垂直极化分量的功率透过系数和插入相移相差很大。因此A(x,y,z)、B(x,-y,z)两点幅度相同相位一致的入射波, 在经过天线罩后, 它们的幅度、相位将不再相同。即均匀平面波通过天线罩后, 波前上、下两部分的幅度、相位以xz坐标面不对称, 因此导致了交叉瞄准误差的产生。

在水平极化(即 $\theta = 0^\circ$ )和垂直极化(即 $\theta = 90^\circ$ )时, 由于平面入射波在天线罩上半部的任意1点A和天线罩下半部与之对称的点B的垂直极化分量大小相等, 将不产生交叉瞄准误差。

## 3 天线罩交叉瞄准误差的计算验证

为了验证以上对天线罩交叉瞄准误差产生机理的分析, 我们对一个理想的天线罩的交叉瞄准误

差进行了计算,由于大多数高速飞行物的天线罩都是卵型的<sup>[4]</sup>。因此选定该天线罩型线为正切卵形曲线,以z轴为轴旋转而成天线罩表面。天线罩的长度为800mm,根部直径为180mm,天线罩的厚度为6~6.3mm之间的等厚度结构,天线罩材料为陶瓷材料,材料均匀且各向同性,介电常数 $\epsilon=3.0$ ,损耗角正切 $\operatorname{tg}\delta=2.6\times10^{-3}$ 。频率为Ku波段。

计算天线罩的瞄准误差主要有几何光学法<sup>[5]</sup>和平面波谱法<sup>[6]</sup>,由于几何光学物理意义更加清晰,容易剔除其他因素。因此采用几何光学法进行计算。

通过计算,在水平极化,即 $\theta=0^\circ$ 和垂直极化,即 $\theta=90^\circ$ 时,天线罩的交叉瞄准误差均等于0。而在 $\theta=45^\circ$ 极化情况下,计算均匀对称天线罩的交叉瞄准误差如图4所示。

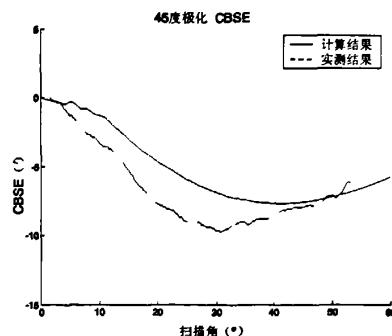


图4  $\theta=45^\circ$  极化情况下, 交叉瞄准误差  
相应达的交叉瞄准误差斜率如图5所示。

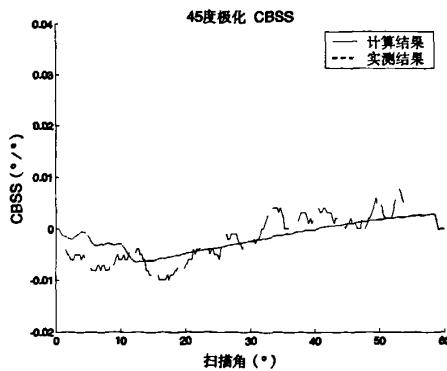


图5  $\theta=45^\circ$  极化情况下, 交叉瞄准误差斜率

可见,理论计算验证了上述对均匀对称天线罩交叉瞄准误差产生机理的分析。以上方法具有普遍性,适用于其他结构的天线罩分析。

#### 4 天线罩交叉瞄准误差的实测结果

除了对天线罩交叉瞄准误差的成因进行理论计算验证以外,还对天线罩在 $45^\circ$ 极化情况下的交叉瞄准误差以及交叉瞄准误差斜率进行了实际测量。测量在常温下进行,测试设备为电子定标天线罩测试系统,收发端的距离符合远场条件。

由图4和图5看出理论计算值和实测值基本吻合。

#### 5 结论

天线罩交叉瞄准误差除了天线罩的不对称性产生以外,完全对称的天线罩在非垂直、水平极化情况下也将产生交叉瞄准误差。这是由于入射波在天线罩上下半部对称点处的垂直、平行极化分量不同造成的。通过对天线罩交叉瞄准误差产生机理的详细分析,有助于设法抑制交叉瞄准误差。对今后设计高性能天线罩大有益处。

#### 参 考 文 献

- [1] 刘军, 秦建丰, 陈忠飞, 陶本仁, 郑成华. 基于 DSP 处理器的导弹天线罩误差补偿系统. 系统工程与电子技术, 2001, 23 (8)
- [2] P.Zarchan, H.Gratt. Adaptive Radome Compensation Using Dither. Journal of Guidance, Control, and Dynamics., Vol.22, No.1, January – February 1999, 22(1):51 – 57
- [3] 杜耀维. 天线罩电信设计方法. 北京: 国防工业出版社, 1993
- [4] E.L.Pelton and B.A.Munk. A Streamlined Metallic Radome. IEEE trans. Antennas Propagat., 1974, AP-22: 799-803
- [5] Kozakoff D J. Analysis of Radome – Enclosed Aetennas. Artech House, Boston, London, 1997
- [6] D.C.F.Wu and R.C.Rudduck. Plane Wave Spectrum-Surface Integration Technique for Radome Analysis. IEEE trans. Antennas Propagat., 1974, AP-22: 497-500

杨晖 高工, 1992年于成都电子科技大学获硕士学位,研究方向: 小型天线与天线罩。

## 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>