

## 用三维射线追踪法计算天线罩的电性能

侯 瑞

(中国空空导弹研究院7室, 河南 洛阳 471009)

**摘 要:** 本文将天线罩等效为多层介质平板, 应用三维射线追踪法建立了天线—天线罩系统电性能数学模型, 并将由该模型得出的计算结果与实测值进行了比较, 分析误差产生的原因, 证明了该模型的正确性。结果表明这种方法可以用于电大尺寸波导裂缝阵天线—天线罩系统的电性能计算。

**关键词:** 电性能计算; 射线跟踪法; 天线罩; 导弹

在战术雷达导弹中, 天线和天线罩都是极为重要的微波部件, 它们的相互作用在很大程度上影响了导弹系统的性能品质。评价导弹天线罩电气性能的主要指标有: (1) 功率透过率 ( $|T|^2$ ); (2) 瞄准误差 (BSE); (3) 瞄准误差斜率 (BSS)。因此, 如何建立一个能够快速、准确地评价天线罩电性能的模型, 一直是天线罩设计工作者十分关心的研究课题。

### 1 三维射线追踪法

由于天线和天线罩的类型不同, 因此, 并不存在一种可以简单“套用”的方法或数学公式用于它们的组合特性的计算, 研究人员必须根据具体的天线—天线罩的几何尺寸、结构形式和相对位置关系, 运用现有的电磁理论建立特定组合的数据模型。在建模过程中, 由于天线—天线罩的极为复杂的电磁结构, 极大地限制了可供选用的理论方法。目前可供选用的计算方法有几何光学法、平面波谱法<sup>[1]</sup>。每种方法都有各自的优点和局限性, 因而必须根据具体情况选用。

为建立适合工程应用的数学模型, 避免过分复杂化, 本文采用了较为简单的几何光学法<sup>[2]</sup>。其计算步骤如下: 首先, 把天线的每个辐射缝隙用“点源”代替, 把天线口径的辐射场用一组平行射线代替, 射线的强度由口径场的幅度加权获得。然后, 将射线入射在天线罩内表面处, 用“局部平板”代替入射点处的天线罩曲面, 即用平板介质的传输系数 (透过率和插入相移) 表征入射点处罩壁的特性, 进而从内表面的入射场求出外表面的出射场, 由此形成一个新的“等效口径场”。最后再运用常规的天线方向图计算方法, 从中求出整个天线—天线罩系统的方向性图, 进而由受天线罩影响的方向图得出天线罩的电性能指标。

## 2 算法概述

### 2.1 坐标系的选取

如图 1 所示, 设天线罩坐标系为  $(x_R, y_R, z_R)$ , 天线坐标系为  $(x, y, z)$ , 天线罩坐标原点为天线的转动中心。天线坐标系与天线罩坐标系的原点重合。天线坐标系中  $x$  轴为电场  $E$  的方向,  $y$  轴为磁场  $H$  的方向。

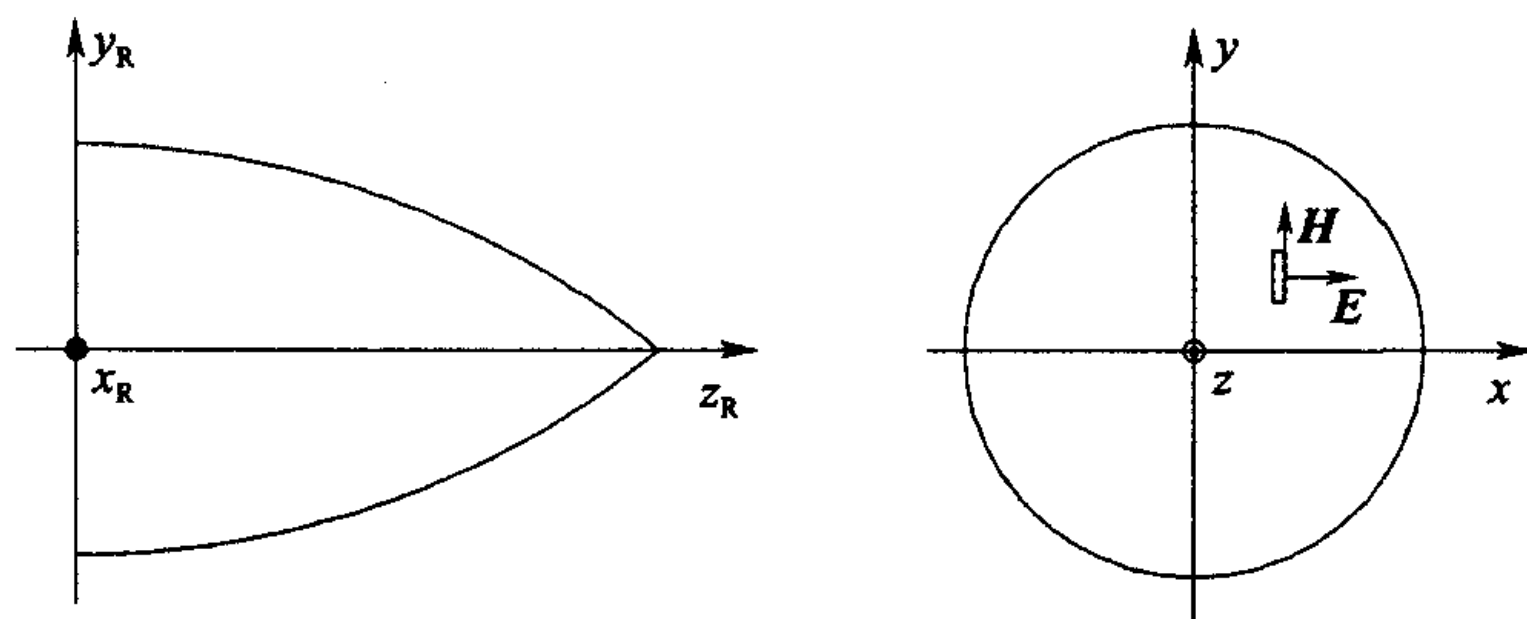


图 1 天线罩和天线坐标系

在  $0^\circ$  极化、天线扫描角  $0^\circ$  下, 天线与天线罩坐标系重合, 如图 2 (a) 所示, 其中,  $E$  为电场方向,  $H$  为磁场方向,  $u$  为电磁波传播方向。将天线罩坐标系  $x_R - y_R - z_R$  作为固定坐标系, 天线坐标系  $x - y - z$  和天线罩坐标系  $x_R - y_R - z_R$  的相对位置可以分解为两步:

- (1) 将  $x_R - y_R - z_R$  绕  $z_R$  轴旋转  $\theta$  角, 形成坐标系  $x^* - y^* - z^*$ , 如图 2 (b) 所示。
- (2)  $x^* - y^* - z^*$  绕  $y_R$  轴旋转  $\phi$  角, 得  $x - y - z$  坐标系, 如图 2 (c) 所示。

其中:  $\theta$  为天线极化角;  $\phi$  为扫描角。

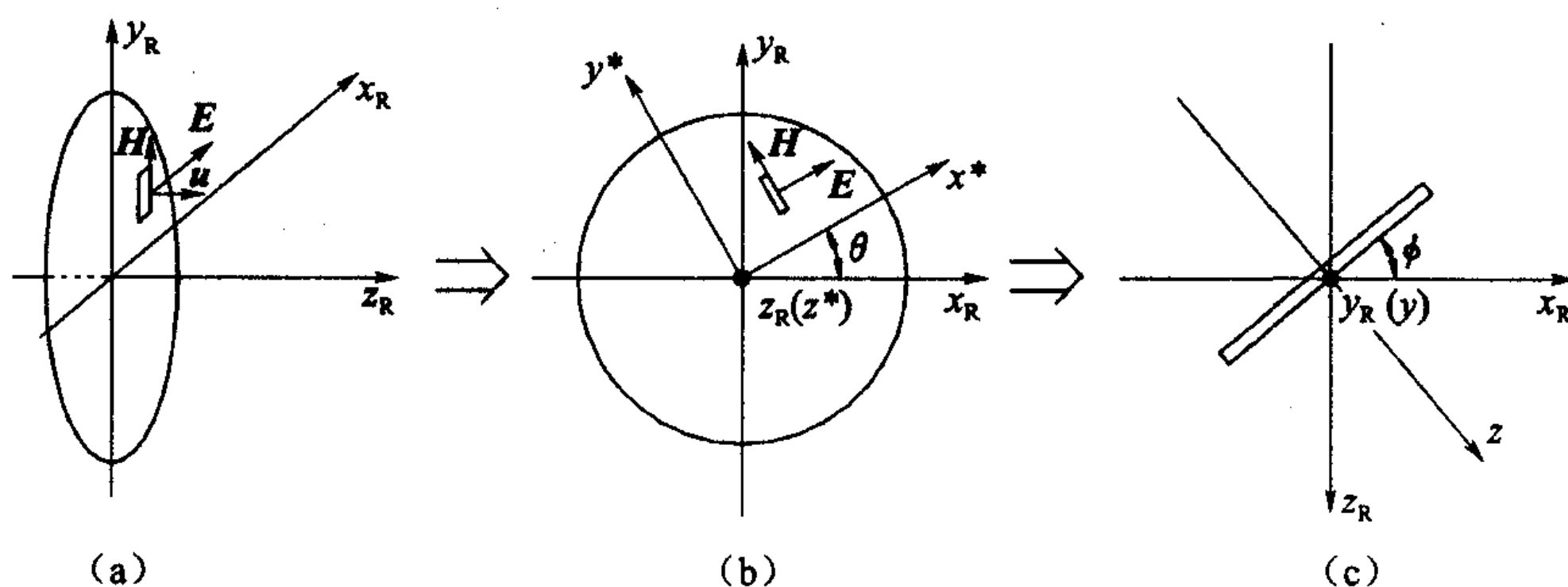


图 2 天线和天线罩坐标系的相对位置

### 2.2 坐标变换

由 2.1 可以得出电场  $E$ 、磁场  $H$ 、波前矢量  $u$  以及天线坐标系上任意一点  $(x_0, y_0, 0)$  变换为天线罩坐标系上的相应方向矢量和坐标值  $(x, y, z)$

$$\begin{aligned} E(1, 0, 0) &\Rightarrow E_R(\cos\theta\cos\phi, \sin\theta, -\cos\theta\sin\phi) \\ H(0, 1, 0) &\Rightarrow H_R(-\sin\theta\cos\phi, \cos\theta, \sin\theta\sin\phi) \\ u(0, 0, 1) &\Rightarrow u(\sin\phi, 0, \cos\phi) \end{aligned} \quad (1)$$

天线口径面上的一点  $(x_0, y_0, 0)$  变换为天线罩坐标系上的点  $(x, y, z)$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\phi & -\sin\theta\cos\phi & \sin\phi \\ \sin\theta & \cos\phi & 0 \\ -\cos\theta\sin\phi & \sin\theta\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

所以, 过天线口径面上任一点  $(x_0, y_0, 0)$  的入射线方程为

$$\begin{aligned} x - (\cos\theta\cos\phi x_0 - \sin\theta\cos\phi y_0) &= k\sin\phi \\ y - (\sin\theta x_0 + \cos\theta y_0) &= 0 \\ z - (-\cos\theta\sin\phi x_0 + \sin\theta\sin\phi y_0) &= k\cos\phi \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $k$  为参变量。

### 2.3 天线罩的型线方程和法向余弦

如图 3 所示, 假设天线罩的型线为旋转对称, 曲面上任意一点为  $(x, y, z)$ , 那么曲面方程可以表示为

$$r = r(z) \quad (4)$$

其中,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

令点  $(x, y, z)$  的法向量  $f$  与  $z$  轴的夹角为  $\beta$ , 则

$$\beta = \arctan(-1/\frac{dr}{dz}) \quad (5)$$

$f$  的方向余弦

$$f(\sin\beta\cos\alpha, \sin\beta\sin\alpha, \cos\beta) \quad (6)$$

式中:  $\alpha = \arctan(\frac{y}{x})$ 。

(7)

### 2.4 入射线与天线罩壁的交点

由式 (3) 及式 (4), 以  $k$  为参变量, 采用逐步逼近的方法, 可以求出天线坐标系中口径面上任意一点的入射线与天线罩壁的交点及相应的  $k$  值。

### 2.5 入射角 $\psi$ 及极化角 $\omega$

#### 2.5.1 入射角 $\psi$

由  $|u \cdot f| = \cos\psi$  及式 (1)、式 (6)、式 (7) 可得

$$\psi = \arccos |\sin\phi\sin\beta\cos\alpha + \cos\phi\cos\beta| \quad (8)$$

#### 2.5.2 极化角 $\omega$

如图 4 所示,  $E$  和  $H$  为电磁场的电场和磁场矢量,  $f'$  为  $f$  在  $E-H$  面的投影, 则

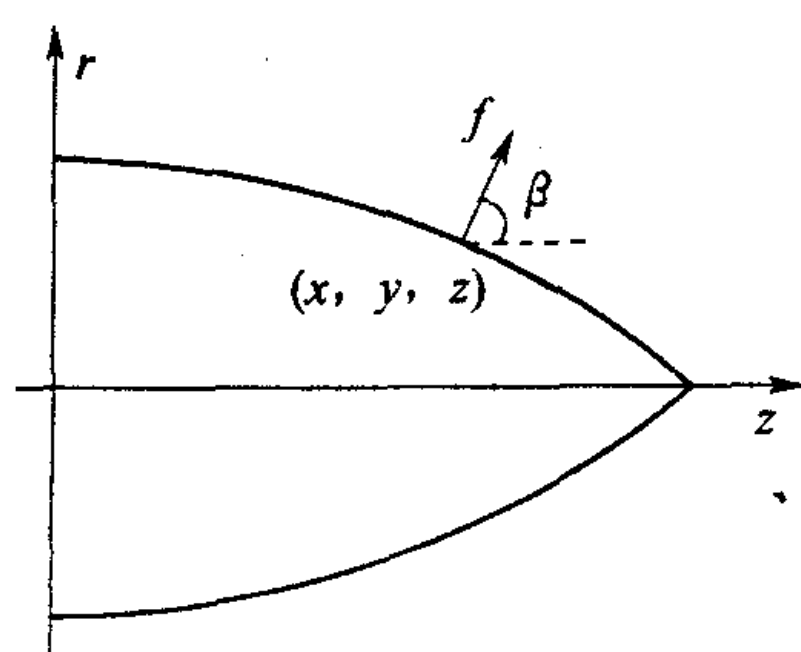


图 3 天线罩型线和法线方向

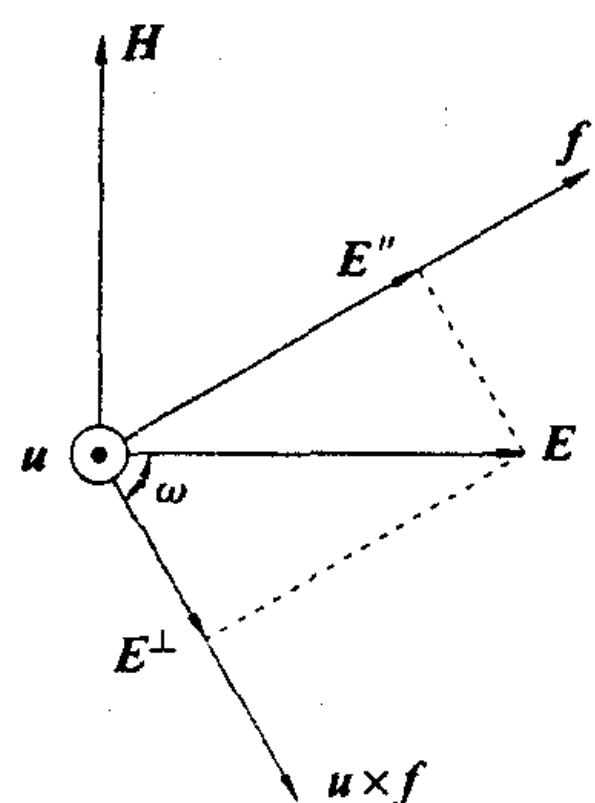


图 4 入射电场的平行和垂直极化分量

$$|E \cdot (u \times f)| = |E| \cdot |u \times f| \cdot |\cos \omega| = |E| \cos \omega \sin \psi, \text{ 所以} \\ \omega = \arccos \frac{|E \cdot (u \times f)|}{|E| \sin \psi} \quad (9)$$

由此得

$$E^\perp = \cos \omega; \quad E'' = \sin \omega$$

式中:  $E^\perp$  为入射电场的垂直极化分量;  $E''$  为入射电场的平行极化分量。

## 2.6 电磁波的透过系数和插入相位延迟

天线罩引起的  $E^\perp$ ,  $E''$  的透过率  $T^\perp$ ,  $T''$  和插入相位延迟  $\eta^\perp$ ,  $\eta''$  用转移矩阵计算。

$A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  和  $D_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 是单元网络的转移矩阵元素, 总的转移矩阵元素  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  由下式求出

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$  和  $D_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 是各层平板等效单元网络的转移矩阵元素, 它们与各层材料的厚度、相对介电常数及损耗角正切有关;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  和  $D$  是网络级连后的总的转移矩阵元素。

## 2.7 透射波的主极化分量

由于水平极化波分量与垂直极化波分量的功率透过系数  $|T_N(\theta_0)|^2$  与插入相位移  $\eta(\theta_0)$  通常有差别, 故当天线辐射的电波是线极化波时, 通过天线罩后会退化为椭圆极化波。在本算法中, 只考虑透射波的主极化分量, 即电场矢量在极化方向上的投影。

由图 5 可知, 平行极化波分量和垂直极化波分量的透射波  $E_T''$ ,  $E_T^\perp$  可表示为

$$E_T'' = E'' T'' e^{j\eta''} = E \sin \omega T'' e^{j\eta''} \\ E_T^\perp = E^\perp T^\perp e^{j\eta^\perp} = E \cos \omega T^\perp e^{j\eta^\perp} \quad (11)$$

将  $E_T''$  和  $E_T^\perp$  投影到天线坐标系的  $x$  轴, 即电场  $E$  的方向, 得电磁波的主极化分量

$$E_x = E_x'' + E_x^\perp = E_T'' \sin \omega + E_T^\perp \cos \omega = E \cdot (T'' \sin^2 \omega \cdot e^{j\eta''} + T^\perp \cos^2 \omega \cdot e^{j\eta^\perp}) \quad (12)$$

## 2.8 计算天线罩的电性能

### 2.8.1 带罩天线的和差方向图

在求得入射角、极化角和传输系数后, 就可以求出天线罩外部的场, 为了简化计算, 仅考虑与天线口径平行平面上形成的“等效口径”。按照天线方向图的一般解法, 把等效口径上的场积分, 即可求出远区辐射场。由于这里处理的天线口径场为离散性幅度分布 (即阵列式分布), 故用叠加代替积分。单个象限的主极化平面透射场近似表示如下

$$E_{\text{main}}(\theta_0, \phi_0) = dx dy \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M T_{\text{main}} \cdot E_t(m, n) \cdot e^{j\psi(m, n)} \quad (13)$$

式中:  $\alpha_0 = \sin \theta_0 \cos \phi_0$ ,  $\beta_0 = \sin \theta_0 \cdot \sin \phi_0$

$$\psi(m, n) = K_0 [\alpha_0 X(m, n) + \beta_0 Y(m, n)]$$

式中:  $K_0$  是波数,  $K_0 = 2\pi/\lambda_0$  ( $\lambda_0$  是自由空间波长);  $\theta_0$  与  $\phi_0$  是空间视场角。  $X(m, n)$  与

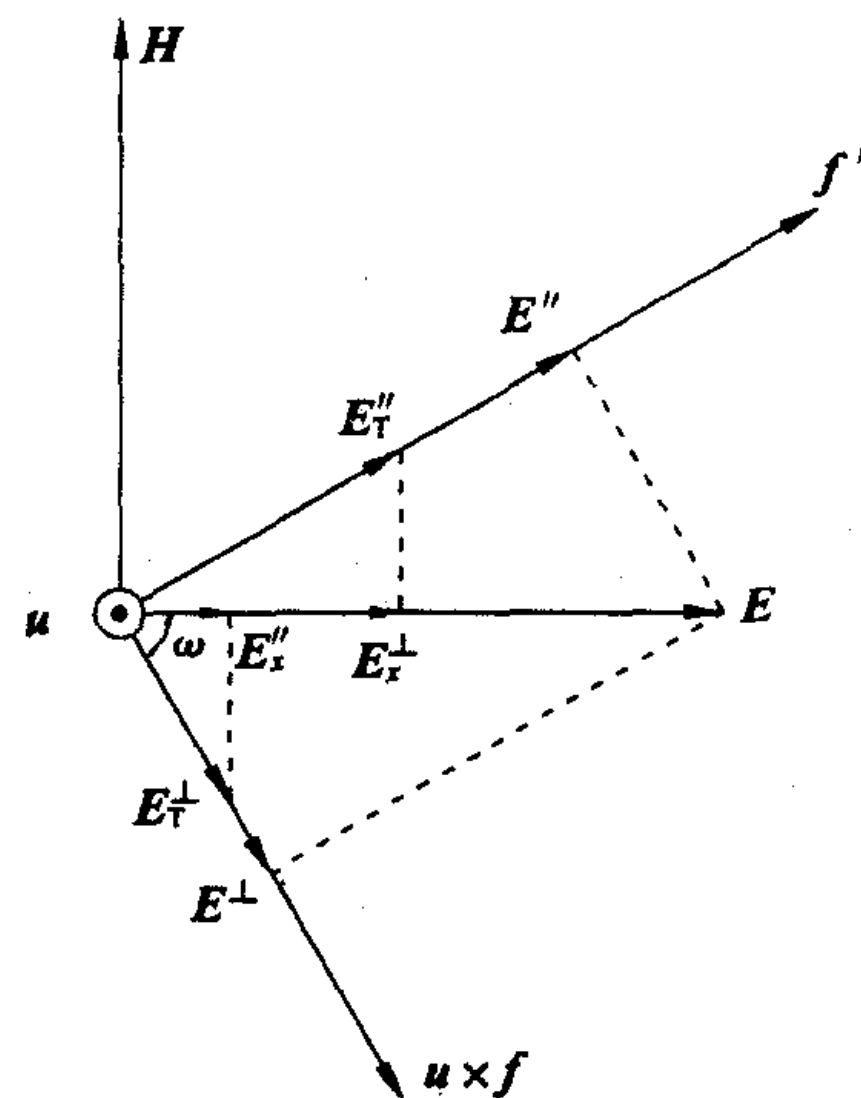


图5 透射电场的平行和垂直极化分量



$Y(m, n)$  是原点的坐标 (相当于前文中的  $x_0$  与  $y_0$ , 但这里的标记便于更方便迭加公式的编程)。 $E_i(m, n)$  是口径场幅度值, 对不同的源点它有不同的值。 $dx$  与  $dy$  是口径上裂缝之间的间距。

设天线口径的 4 个象限分别记为  $A, B, C$  和  $D$ , 则和差信号场强表示如下

$$\begin{aligned} E_S &= E_{\text{main},A} + E_{\text{main},B} + E_{\text{main},C} + E_{\text{main},D} \\ E_{D1} &= (E_{\text{main},A} + E_{\text{main},B}) - (E_{\text{main},C} + E_{\text{main},D}) \\ E_{D2} &= (E_{\text{main},A} + E_{\text{main},D}) - (E_{\text{main},B} + E_{\text{main},C}) \end{aligned} \quad (14)$$

上述场强不仅是空间视场角  $(\theta_0, \phi_0)$  的函数, 也是天线极化角和扫描角  $\theta, \phi$  的函数, 它们不仅与天线口径参数有关, 还与天线罩的几何尺寸及介电特性有关, 进而与天线一天线罩的相对位置有关。由式 (14), 在一定的视场角  $(\theta_0, \phi_0)$  范围内, 计算不同天线一天线罩相对转角  $(\theta, \phi)$  时的场强值, 即可求得单脉冲和差方向图。显然, 上述计算过程要比单独计算 (无罩时) 天线方向图要复杂得多。

### 2.8.2 天线罩的电性能

天线罩的主要电性能指标包括瞄准误差 BSE, 瞄准误差斜率 BSS 及功率透过率  $|T|^2$ 。

由前面的分析可知: 在天线极化角  $\theta$ 、扫描角  $\phi$  确定后, 天线的和通道、两个差通道的电平值分别为  $E_S, E_{D1}$  和  $E_{D2}$  是空间视场角  $(\theta_0, \phi_0)$  的函数。用搜索法找出差通道电平的极小值  $E_{D1}(\theta_0, \phi_0)_{\min}$ 、 $E_{D2}(\theta_0, \phi_0)_{\min}$  及相应的视场角  $(\theta_{0D1}, \phi_{0D1})$ ,  $(\theta_{0D2}, \phi_{0D2})$ 。将视场角  $(\theta_{0D1}, \phi_{0D1})$ ,  $(\theta_{0D2}, \phi_{0D2})$  投影到相应的差平面上, 得出在两个差平面向上的瞄准误差  $BSE_{\Delta1}, BSE_{\Delta2}$ 。将  $BSE_{\Delta1}$  和  $BSE_{\Delta2}$  转换到主平面 (扫描平面) 和交叉平面 (垂直于扫描平面) 上, 即得主平面和交叉平面瞄准误差 MBSE  $(\theta, \phi)$ 、CBSE  $(\theta, \phi)$ 。

瞄准误差斜率 BSS 是  $\theta$  为定值下的 BSE 随  $\phi$  变化的斜率, 单位度/度。

透过率  $|T|^2$  是  $\theta, \phi$  的函数, 是加罩的和通道电平与无罩的和通道电平比值。

## 3 计算结果和误差分析

根据以上所述三维射线跟踪法的理论及公式推导, 用 MATLAB 语言编写了计算程序, 该程序的输入变量包括天线口径场的幅度及相位分布、天线与天线罩的相对位置、天线罩的型线、壁厚分布、介质的介电常数、介质的损耗角正切、涂层的厚度、涂层的介电常数、涂层的损耗角正切等。

该程序可以算任意天线极化角和扫描角的和差方向图和主平面、交叉平面的瞄准误差 MBSE、CBSE, 主平面、交叉平面瞄准误差斜率 MBSS、CBSS 和透过率  $|T|^2$ 。对于天线罩来说, 在  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  极化上的 MBSE、MBSS、 $|T|^2$  是最关键的指标, 也是衡量天线罩电性能的主要指标, 所以本文给出了某种天线一天线罩系统的主要电性能指标的计算结果和实测结果的比较 (见图 6 ~ 图 16)。理论计算和实测结果表明, 在  $0^\circ$  和  $90^\circ$  极化上的交叉平面瞄准误差及其斜率 (CBSE、CBSS) 均接近于 0, 所以没有列出。

由图 6 ~ 图 13 可以看出, 理论计算的曲线和实测曲线的变化规律及数值大小是比较吻合的, 但在个别极化和误差斜率的极值点存在差异, 而且测量曲线在小角度范围内呈小幅振荡, 而计算值是平滑曲线。这主要由以下原因引起:

## (1) 理论的近似性

天线罩对天线系统的影响,可分为一阶影响(如在射线跟踪法的罩外等效平面上的振幅和相位畸变等)和二阶影响(如天线罩壁产生的表面波、二次波和反射波等)。射线跟踪法只考虑了一阶影响,而对相对较小的二阶影响未加考虑。

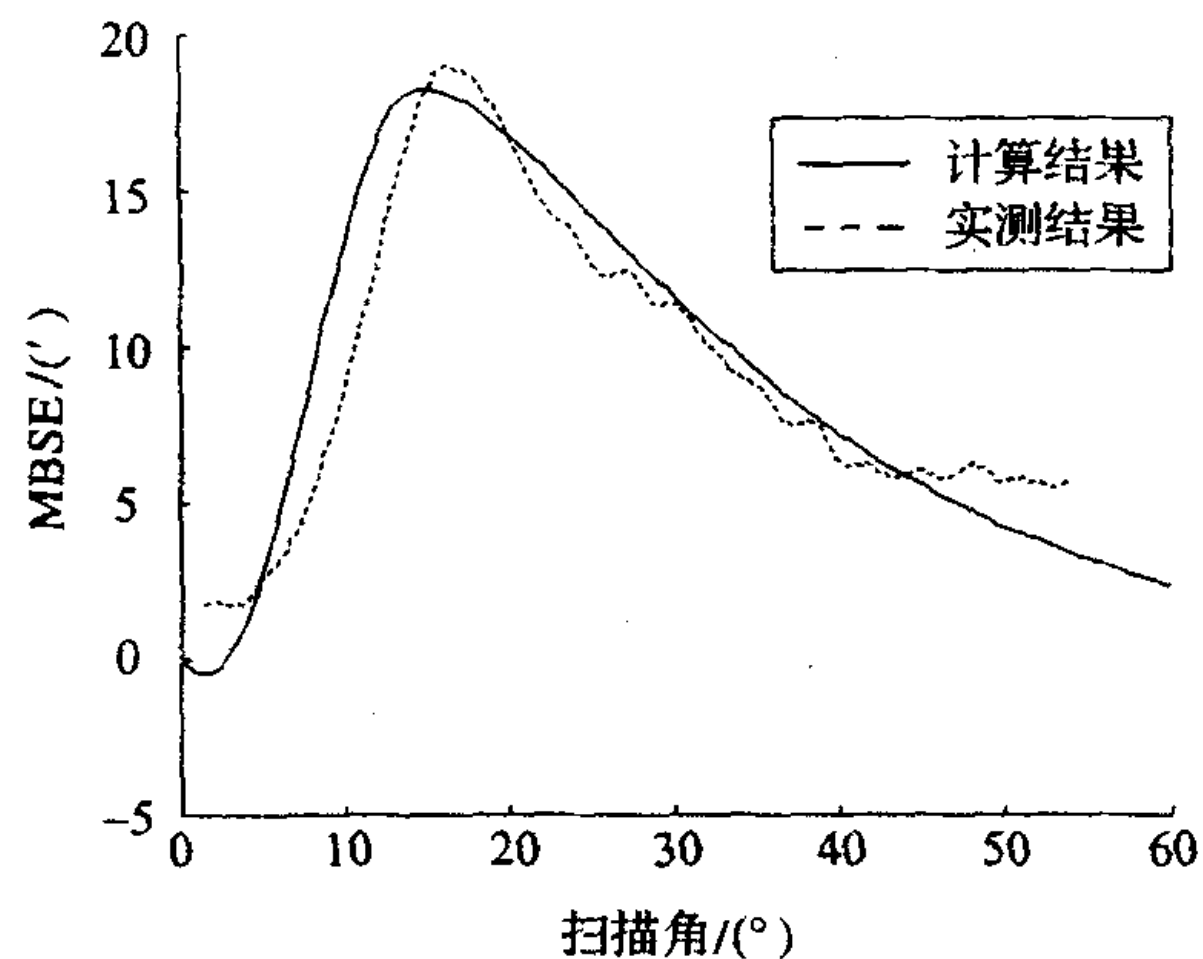


图6 0°极化 MBSE

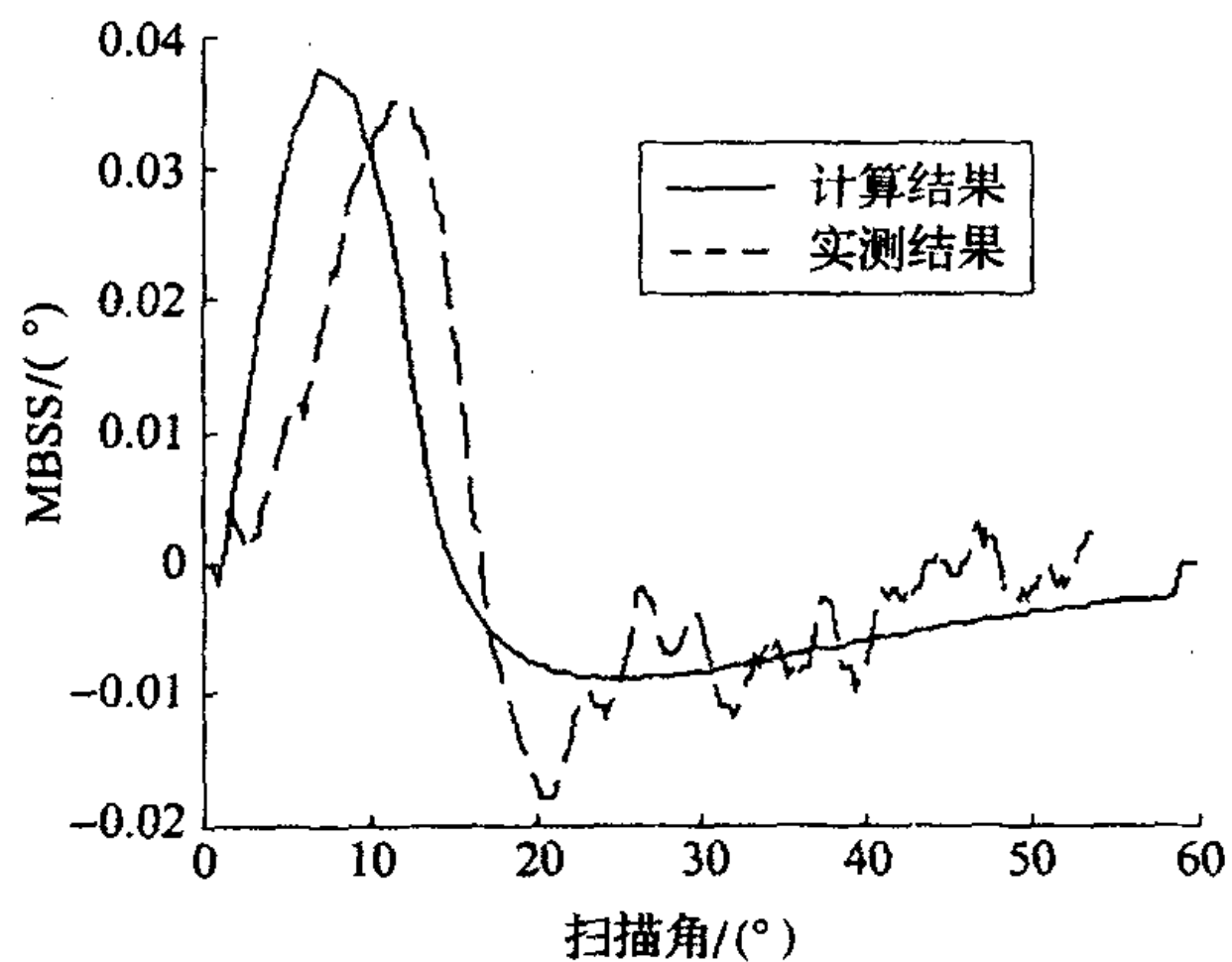


图7 0°极化 MBSS

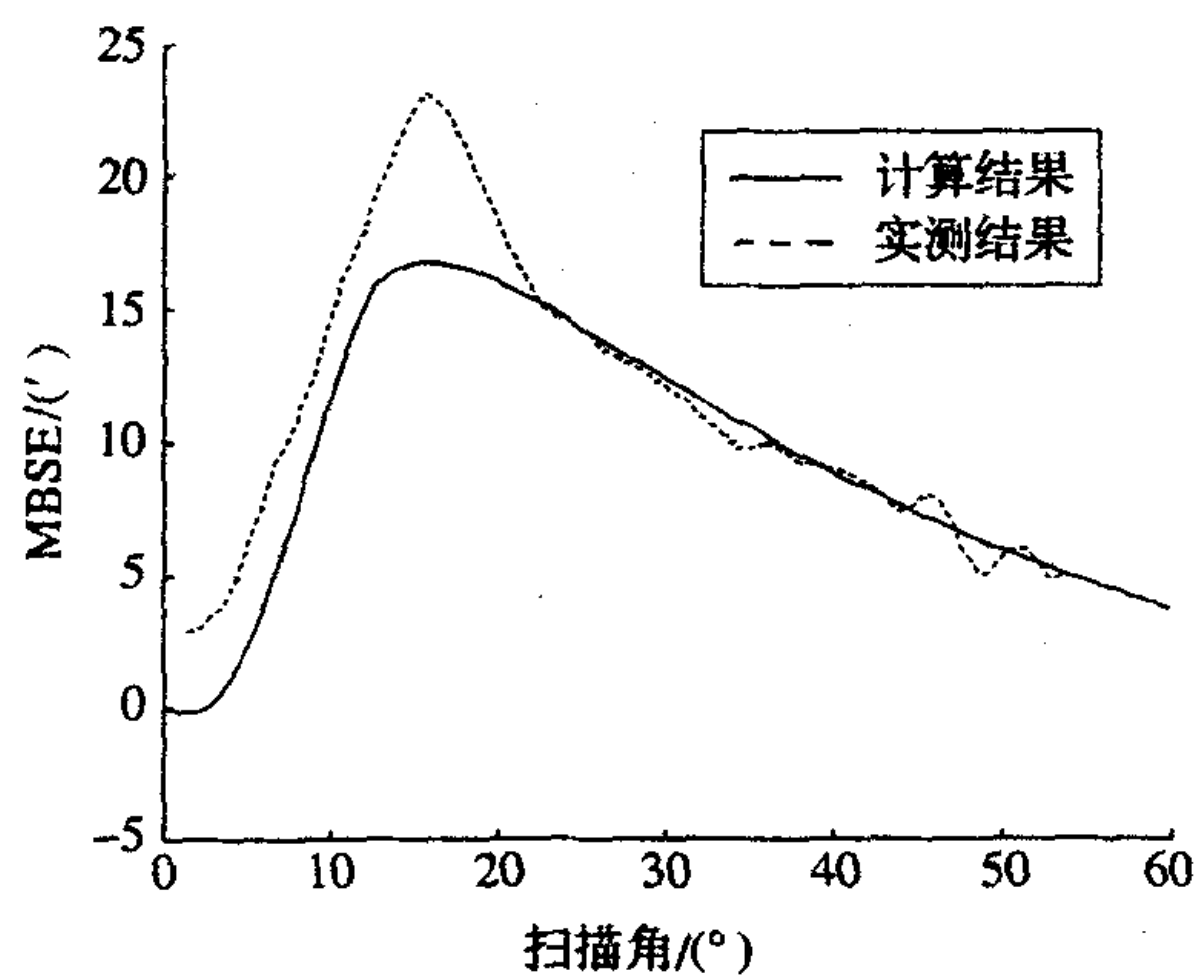


图8 90°极化 MBSE

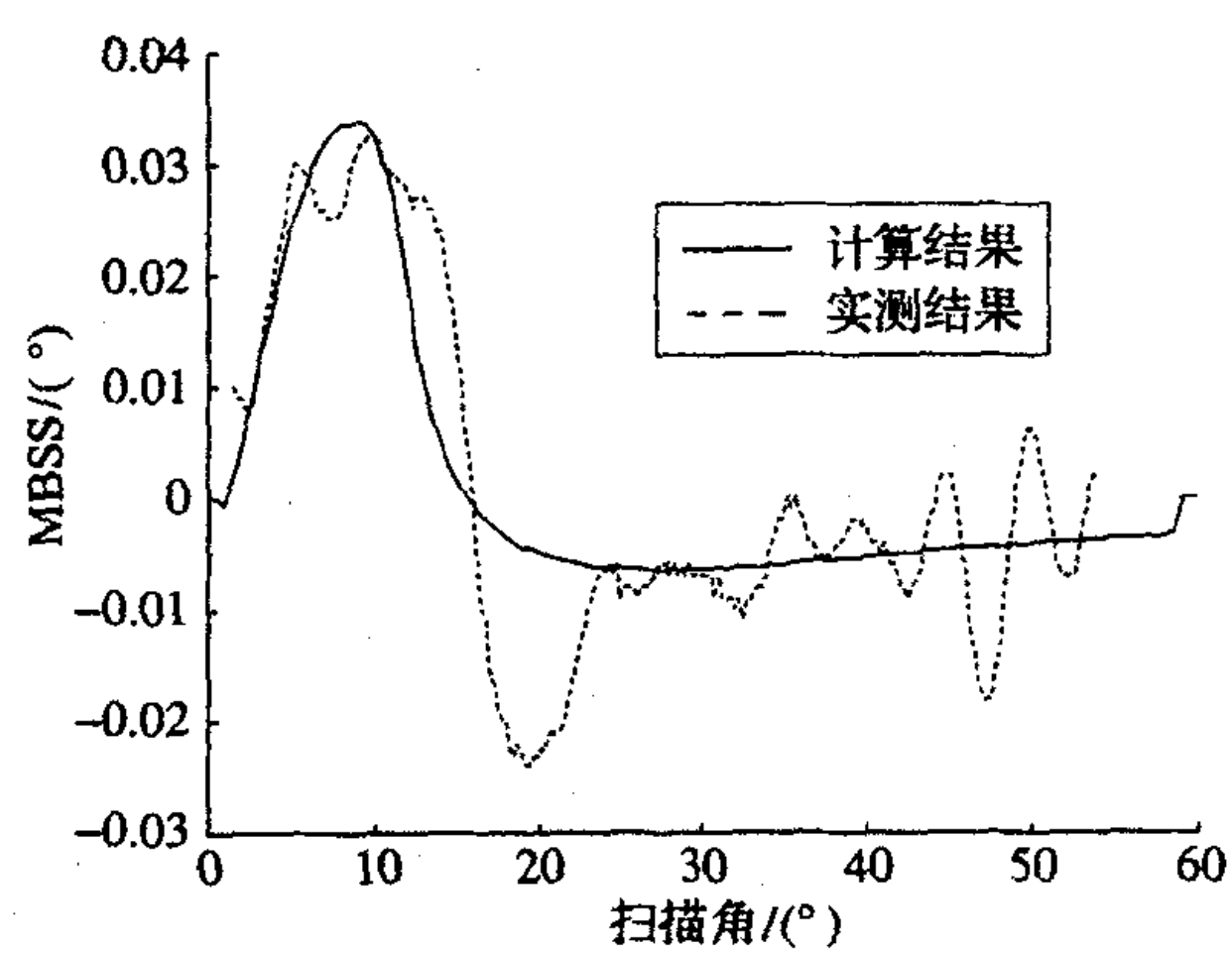


图9 90°极化 MBSS

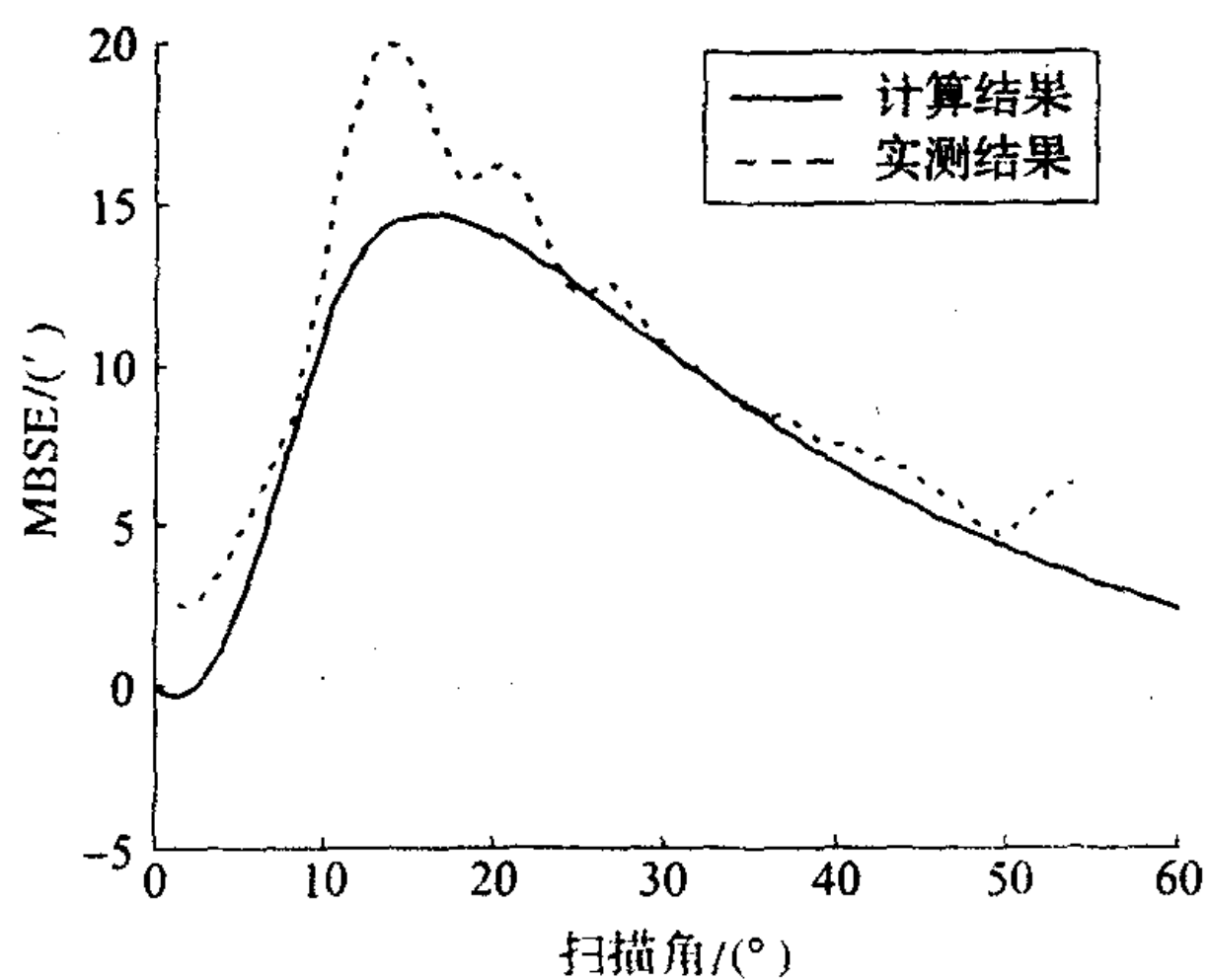


图10 45°极化 MBSE

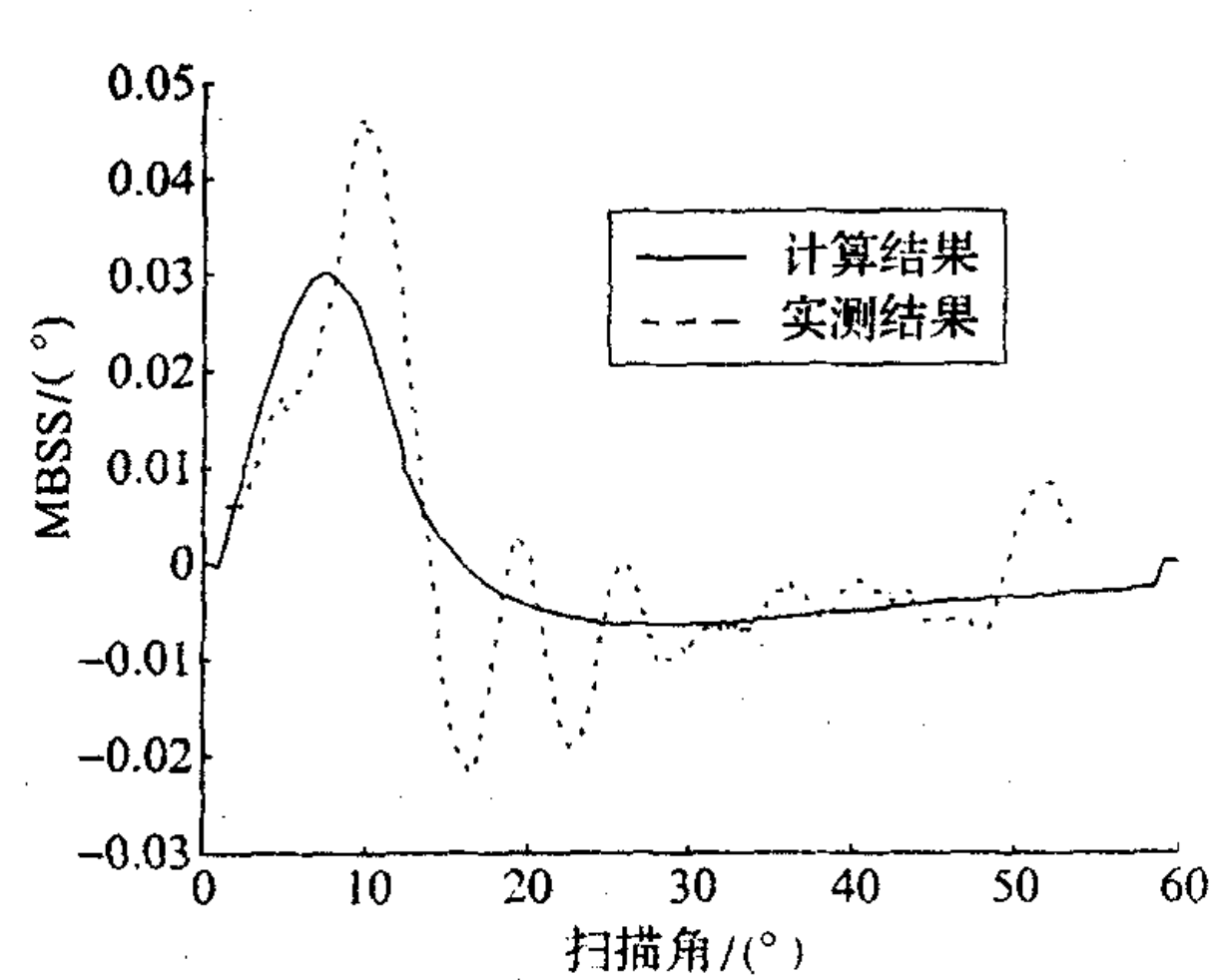


图11 45°极化 MBSS

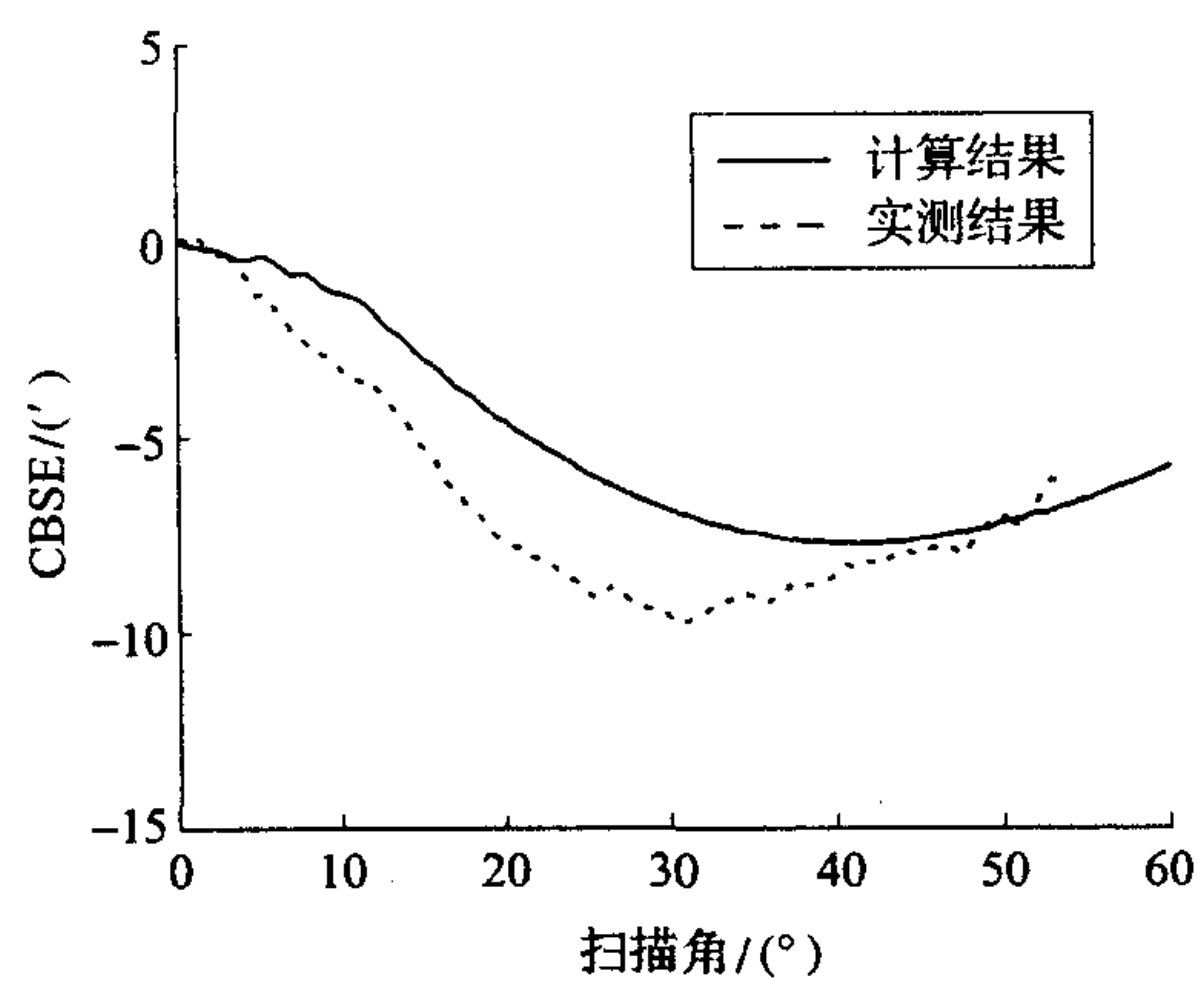


图12 45°极化 CBSE

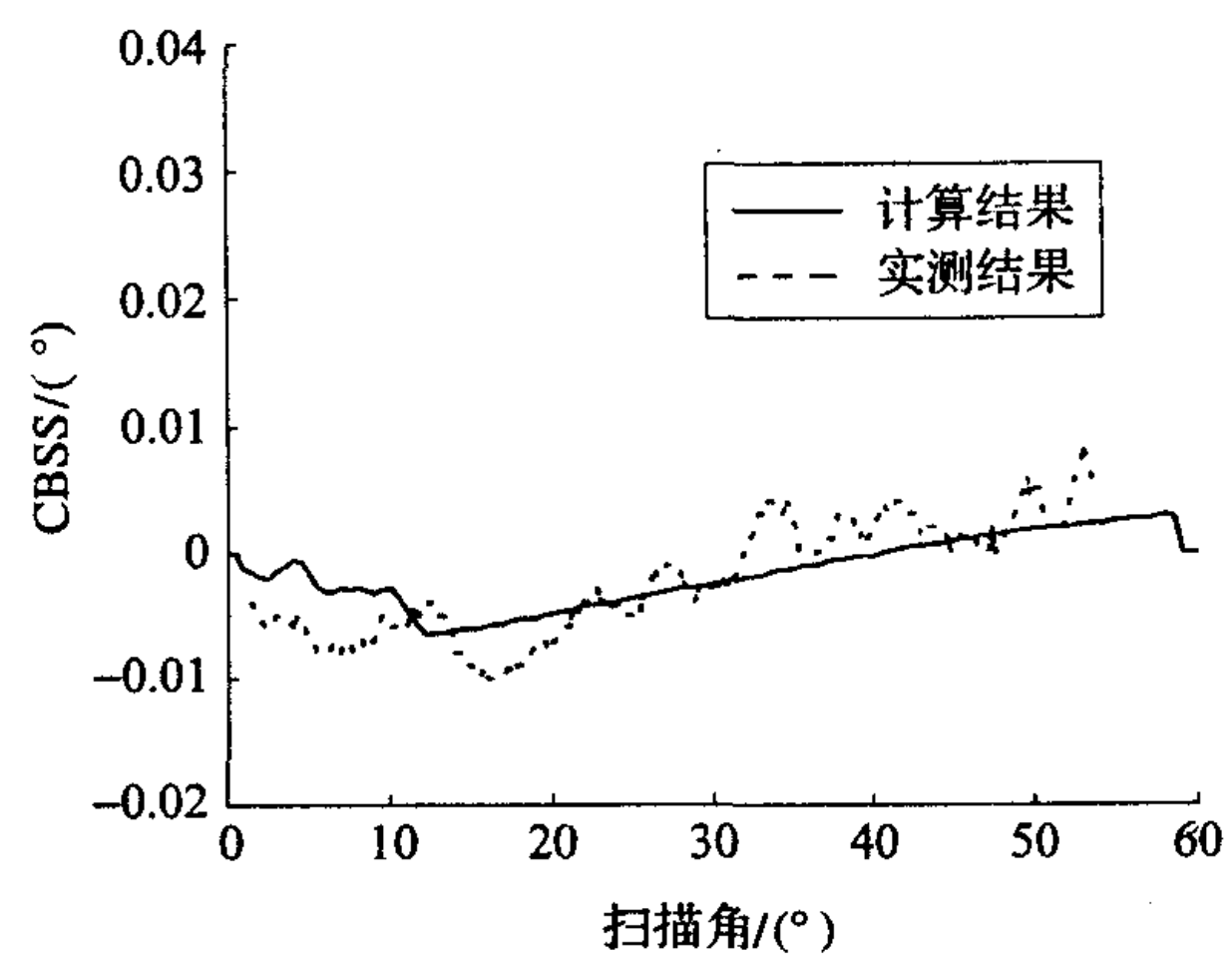


图13 45°极化 CBSS

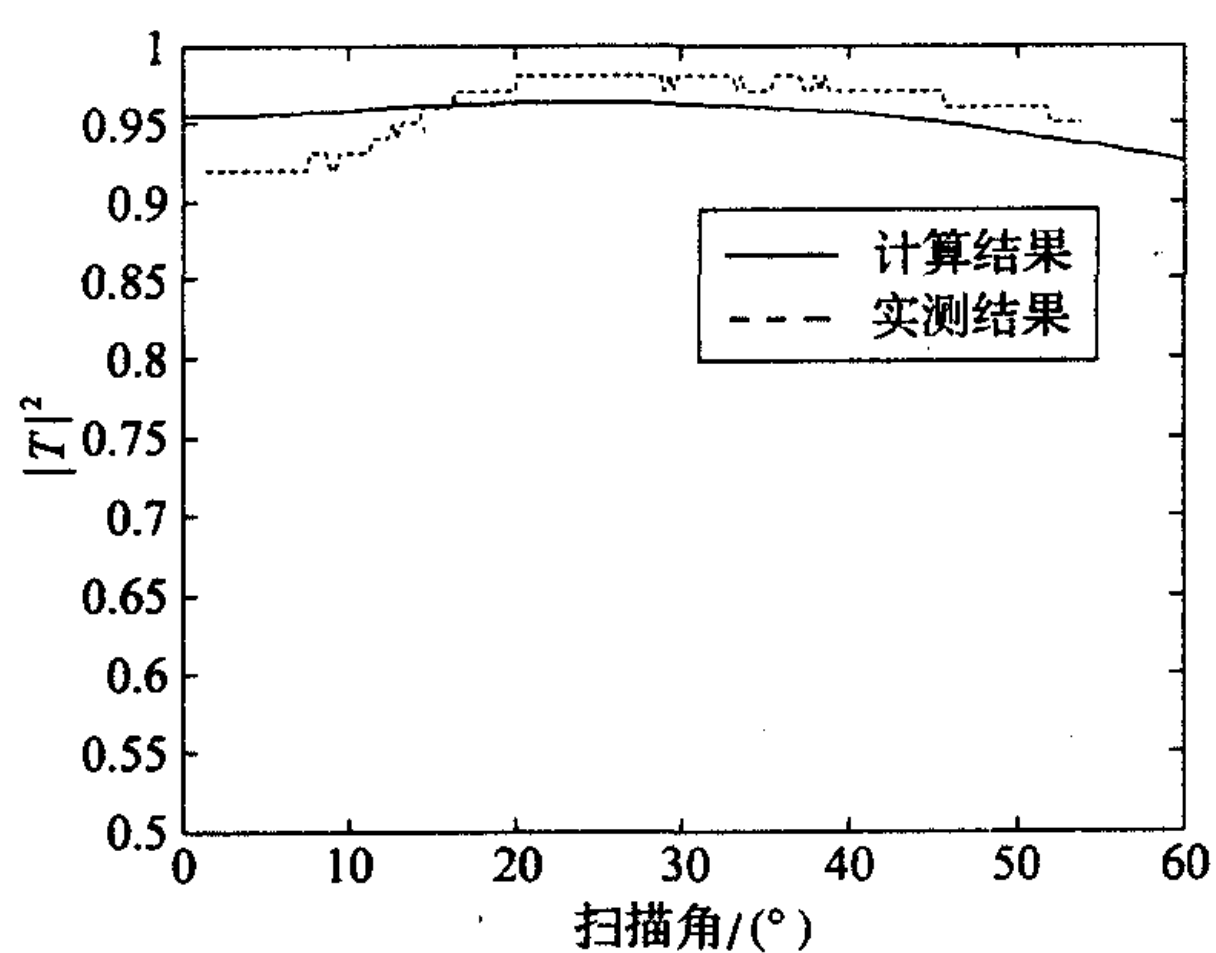


图14 0°极化功率透过率

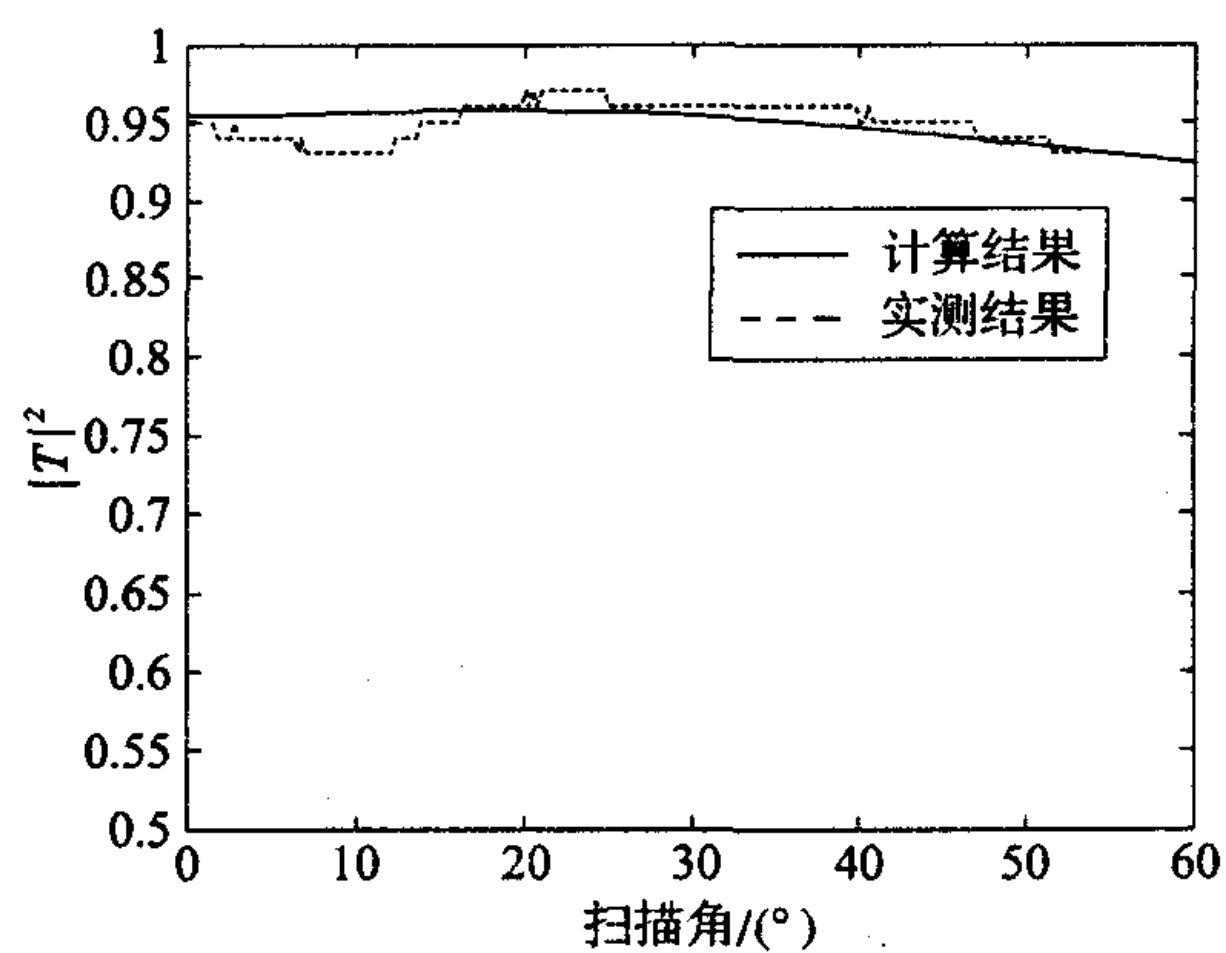


图15 45°极化功率透过率

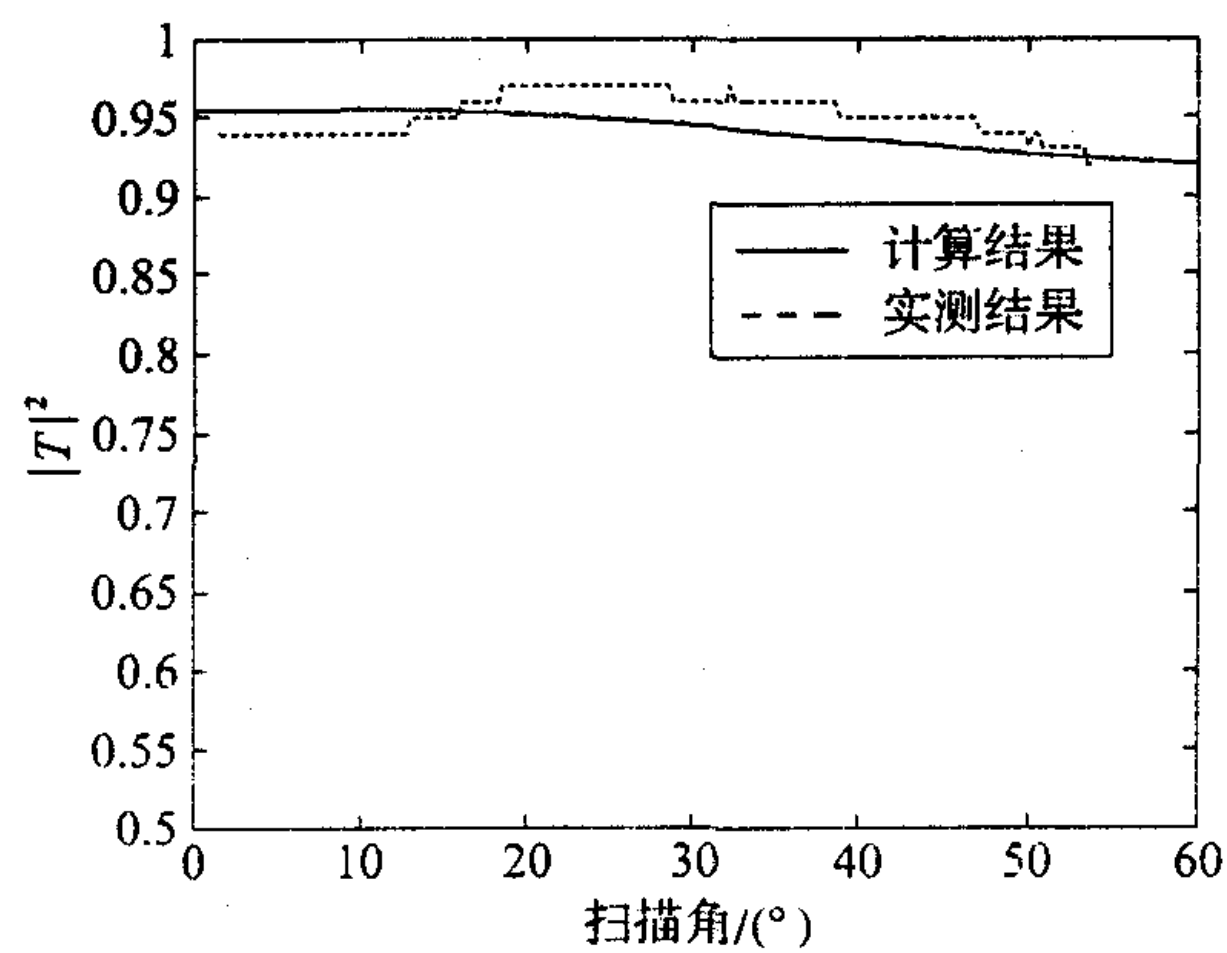


图16 90°极化功率透过率

## (2) 制造公差及测量误差

计算中只考虑了理想情况, 而实际的罩子存在外形尺寸的公差, 厚度的不均匀性、介电常数的不均匀性等都会影响天线罩的电性能。

## 4 结 论

本文推导了天线—天线罩系统相互作用的数学模型,并对天线罩的电性能给出了计算结果。使用三维射线跟踪法计算天线—天线罩系统的性能,有两个基本的假设:

- (1) 天线罩的曲率半径相当大,局部区域可用平板结构来近似;
- (2) 当天线足够大时(天线口径线度大于10个波长),辐射的近区场是一个单一的平面波。

本文所计算的天线罩是满足以上假设的。

运用三维射线描极法可以为天线罩的设计提供理论依据,优化天线罩的各个设计参数,使天线罩达到最佳的电性能指标,尤其适用于毫米波天线罩和多层宽带天线罩的设计。

## 致 谢

感谢宋银锁研究员就射线跟踪法理论给予指导,并提供了测试数据,为论文最终完成提供了很大帮助。

## 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] 宋银锁. 天线—天线罩系统的方向性图计算 [J]. 航空兵器, 2002 (5): 8-11.

作者简介:

侯瑞 (1977— ) 男, 内蒙古呼和浩特人, 工程师, 学士, 2000年毕业于西安电子科技大学机电工程学院, 目前在中国空空导弹研究院7室从事天线罩设计工作。电话: (0379) 63384831

## The Radome Electric Performance Computation with 3-D Ray Tracing Method

HOU Rui

(Laboratory 7, China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

**Abstract:** The radome is considered as multilayer medium flat, the 3-D ray tracing method is used to build antenna-radome mathematical model for the radome electric performance computation. By comparing the computation with the measurement, and analyzing computation error, the validation of the model is verified, which indicates that the 3-D ray tracing method can be used to compute the electric performance of an electric large size waveguide slot antenna-radome system.

**Key Words:** electric performance computation; ray tracing method; radome; missile



## 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，一直致力和专注于微波、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>