

导弹目标的 FDTD 建模与 RCS 计算

郑奎松, 葛德彪, 魏 兵

(西安电子科技大学应用物理系, 陕西 西安 710071)

摘 要: 导弹弹头对后向散射有明显的影响。FDTD 建模时, 为了更精确的模拟弹头的外形轮廓, 采用超椭球 (Superspheroid) 几何体来模拟导弹弹头的雷达罩。通过调整超椭球体方程中 ν 因子值的大小能够得到不同形状弹头的外形轮廓, 其中当 ν 取 1.381 时可近似为传统的 Von Karman 雷达罩。该超椭球方程推导简单且能够模拟大多数传统雷达罩的形状。最后, 给出了用 FDTD 方法计算两种导弹弹头模型的后向散射和侧向散射。结果表明, 采用一定参数下的超椭球几何体弹头比球冠状弹头有效的减小后面 RCS。

关键词: 电磁散射; 雷达散射截面; FDTD 方法; 超椭球体; 导弹

中图分类号: TN011

文献标识码: A

FDTD modeling of missile target and RCS computation

ZHENG Kui-song, GE De-biao, WEI Bing

(Department of Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: The missile warhead has an effect on the back scattering. In order to exactly imitate the contour of the missile warhead in the FDTD modeling, the superspheroid body is successfully applied. The shapes of several warheads are given by adjustment the factor ν value in the superspheroidal equation. The superspheroid with optimized exponent value $\nu = 1.381$ can almost exactly reproduce the traditional Von Karman radome geometry. The superspheroids are mathematically easy, can approximate most of the traditional radome geometries quite well. At the same time, two models at the warhead of the missile are computed by FDTD method. One is the spherical warhead; the other is superspheroid, which can model a number of shapes, such as Von Karman radome available for warhead. The calculated results of the back scattering impinging head-on and broadside are presented, demonstrating that the superspheroid warhead model can effectively reduce the radar cross sections.

Key words: electromagnetic scattering; RCS; FDTD method; superspheroid body; missile

1 引言

时域有限差分 (FDTD) 方法^[1]是求解 Maxwell 方程的一种有效的数值方法。这种方法采取空间和时间逐步推进的方式来求解复杂目标的散射问题, 由于其精度高、可操作性好已广泛地被人们所接受。

Von Karman 雷达罩在导弹弹头设计中起重要作用, 因为此种形状的雷达罩可以有效地减小由弹头引起的后向雷达散射截面 (RCS)。在第一象限二维的超越二次 (superquadric) 方程绕它的主轴旋转, 且调整超越二次方程中的参数, 将会得到一类特殊的旋转体, 称为超椭球体 (superspheroid body)。当选取其中的参数 $\nu = 1.381$ 时, 得到的旋转体与传统的 Von Karman 雷达罩几何体非常相似。

2 FDTD 程序的验证

为了验证所用 FDTD 程序的正确性, 本文计算了 NASA “杏仁核 (almond)” 目标。该目标是美国航空航天局专门用于验证各种数值程序可靠与否的基准目标 (benchmark target), 其几何外形尺寸按如下定义^[2]。

(1) 当 $-0.41667 < t < 0$ 和 $-\pi < \Psi < \pi$ 时

$$\begin{aligned}x &= dt \\y &= 0.193333d\sqrt{1 - \left(\frac{t}{0.416667}\right)^2} \cos \Psi \\z &= 0.064444d\sqrt{1 - \left(\frac{t}{0.416667}\right)^2} \sin \Psi\end{aligned}$$

(2) 当 $0 < t < 0.58333$ 和 $-\pi < \Psi < \pi$ 时

$$x = dt$$

$$y = 4.833\ 45d \left[\sqrt{1 - \left(\frac{t}{2.083\ 35} \right)^2} - 0.96 \right] \cos \Psi$$
$$z = 1.611\ 15d \left[\sqrt{1 - \left(\frac{t}{2.083\ 35} \right)^2} - 0.96 \right] \sin \Psi$$

式中： d ——目标“杏仁核”的总长度，本文取 $d = 9.93\ \text{inch} = 252.374\ \text{mm}$ 。本文计算了金属“杏仁核”在 XOY 面内水平极化的后向 RCS，离散的“杏仁体”如图 1 所示。金属“杏仁核”的离散间隔 $\delta = 0.022\ \text{m}$ ，时间间隔 $\Delta t = \delta/2c$ ，工作频率 $f = 1.19\ \text{GHz}$ 。图 2 给出了“杏仁核”在水平极化情况下的计算结果与相应的测量结果，图 2 中也画出了文献 [2] 中另一种数值方法 FERM 的计算结果。从图中可以看出，本文方法与 FERM 方法计算结果保持在 2 dB 之内，与测量值吻合也较好，误差保持在 5 dB 之内。消除测量误差和模型制作误差，估计会获得与测量值更好的吻合结果。

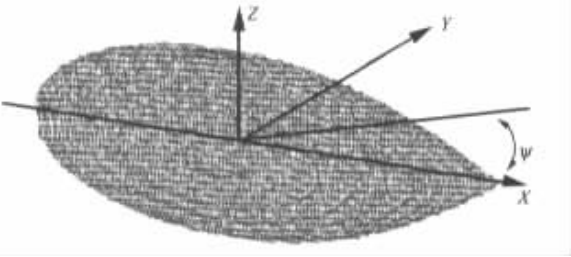


图 1 NASA“杏仁核”的离散图示

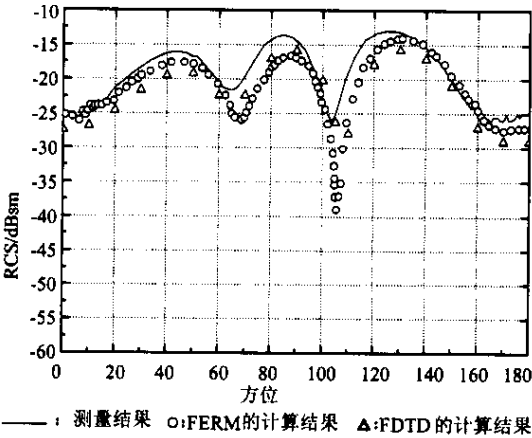


图 2 NASA“杏仁核”后向 RCS 水平极化

3 导弹目标建模

3.1 超回转椭球体简介

二维的超越二次方程 (superquadric equation) 为 [3]

$$(x/a)^\nu + (y/b)^\nu = 1 \tag{1}$$

此曲线方程已广泛应用到具有非球冠的理想圆柱体的电磁散射问题，同样也可以应用到具有超越曲线边界的无源天线的分析中。通常式 (1) 中 x 和 y 的取值范围为 $-a \leq x \leq a$ 、 $-b \leq y \leq b$ 。将式 (1) 改写为

$$y = (b/a) (a^\nu - x^\nu)^{1/\nu} \tag{2}$$

式中： $b \leq a$ ， ν ——正实数。在实际应用中，只关心 $0 \leq x \leq a$ 的情况，这时，不同的 ν 值将会得到不同形状的曲线。式 (2) 所画的曲线为 XOY 平面内的一条弧线，把这条曲线绕着 $y =$

0 旋转，就得到一个旋转体，其解析式可写为

$$y^2 + z^2 = (b/a)^\nu (a^\nu - x^\nu)^{2/\nu} \tag{3}$$

此旋转体 YOZ 平面为圆形截面。图 3 给出不同 ν 值的 XOY 平面内的超越二次曲线。

由图 3 可见，当 $\nu = 2$ 时对应于长椭圆的右半部分，绕 X 轴旋转后为椭球体。若 $\nu \neq 2$ ，相应曲线绕 X 轴旋转后即为超椭球体 (superspheroid)。若参数 a 、 b 和 ν 选取适当，这一类超椭球体就与传统的导弹雷达罩非常相似。定义参数 a 、 b 分别为雷达罩的半径和长度，而雷达罩的径长比 (fineness ratio) 可以定义为 $a/2b$ 。图 3 中选取径长比为 2。考虑如下几种特殊情况。

- (1) 当 $\nu = 1$ 时，式 (3) 得到的是圆锥方程 (横截面为楔形)；
- (2) 当 $\nu = 2$ 时，式 (3) 得到的是半个长椭球方程 (横截面为半个椭圆)；
- (3) 当 $1 < \nu < 2$ 时，得到的是一组形状类似于高速运行导弹雷达罩的几何体。如果设计的导弹弹头是钝头的，可以取 $\nu > 2$ ；如果设计的导弹弹头是尖头的，就可以取 $0 < \nu < 1$ 。

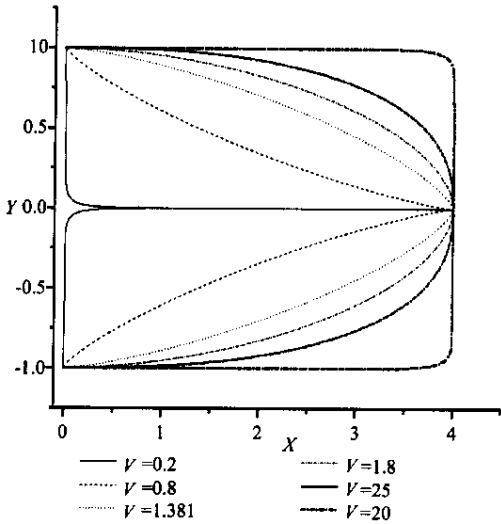


图 3 不同 ν 值时超越二次曲线 ($a/2b = 2$)

在导弹弹头雷达罩的设计上，可以应用式 (1) 或者式 (3)，取合适的 ν 值得到的超椭球体与用传统的雷达罩设计方法 (比如 Von Karman 方程和 Ogive 方程) 得到的超椭球体吻合得很好。下面举例说明 Haack-Von Karman 方程的平面解析式为

$$y^2 = \frac{D^2}{4\pi} \left[\zeta - \frac{1}{2} \sin 2\zeta + k \sin^3 \zeta \right] \tag{4}$$

式中

$$\zeta = \cos^{-1} \left(\frac{2x}{l} - 1 \right) \tag{5}$$

式中： k ——常数， D 和 l ——雷达罩的直径和总长度。当 $k = 0$ 时，得到的是 Von Karman 形状；当 $k = 1/3$ 时，得到的是 Sears-Haack 形状。由于这两种形状的几何体具有特殊的空气动力学特性，因此在实际雷达罩的设计中应用非常多。实际上，这两种常用的雷达罩形状均可用超椭球方程式 (3) 来模拟。对于 Von Kaman 形状取 $\nu = 1.381$ ，对于 Sears-Haack 形状取 $\nu = 1.555$ 。

图 4 给出一个例子，图中 Von Karman 几何体取值为 $D = 2$ 、 $l = 4$ 、 $k = 0$ ，超椭球体参数为 $a = 4$ 、 $b = 1$ 、 $\nu = 1.381$ 。图中的两条曲线符合很好。实际计算表明，在 $1.34 < \nu < 1.4$ 范围内，

40 范围内,超椭球体都近似于 Von Karman 形状。

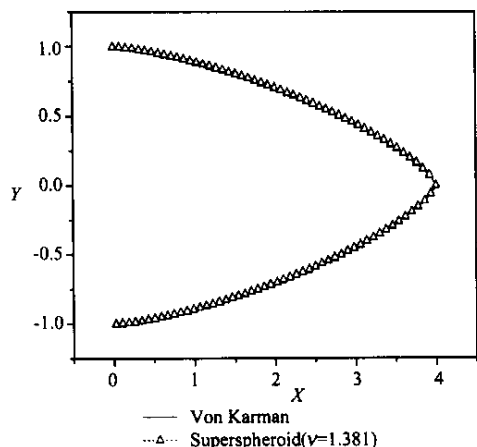


图4 Von Karman 形状和超椭球体($v=1.381$)的比较

3.2 导弹目标的两种模型

导弹目标主要有陆上发射、空中发射和海上发射 3 种型号。由于这种长翼式导弹雷达截面较小,飞行高度低,所以雷达很难发现。

图 5 为导弹目标的 A 型模型。模型长约 6.79 m,最大翼展为 2.62 m,弹体直径为 0.52 m,弹头曲面采用 $v=1.381$ 时的超椭球几何体(近似于 Von Karman 形状)。本文把这一模型称为 A 型。为了比较,也建立了另一种导弹模型,弹头改用半球形,称为 B 型。此外,B 型与 A 型的差别还在于 B 型的前翼形状为矩形。

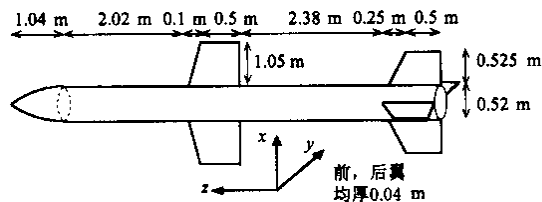


图5 导弹目标的 A 型模型

计算中用的高斯脉冲频谱的最高频率为 750 MHz,相应波长为 0.40 m 。FDTD 离散网格尺寸 $\delta = 0.4/20 = 0.02 \text{ m}$ 。FDTD 计算中 A 型导弹取吸收边界为 -82.8 K (x 方向),以离散

间隔 δ 为单位), -56.5 K (y 方向), -191.19 K (z 方向)输出边界取为 -77.7 K (x 方向), -51.5 K (y 方向), -186.18 K (z 方向);连接边界取为 -72.71 K (x 方向), -46.45 K (y 方向), -181.18 K (z 方向)。图 6 为离散后导弹的三维图示。



图6 导弹目标 A 型模型的三维图示

4 FDTD 计算结果及后向 RCS

在 FDTD 计算中设平面入射波为高斯脉冲

$$E_x(t) = \exp\left[-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right] \quad (6)$$

式中:脉冲宽度 $\tau = 80 \Delta t$ ($\Delta t = \delta/2c$)。脉冲峰值出现在 $t_0 = 0.8\tau$ 时刻。计算中用的最高频率为 750 MHz,相应最短波长是 0.4 m 。脉冲迎头入射,后向接收。A 型和 B 型导弹均为金属,按以上所述的方式离散,计算中所耗的内存可按式(7)进行估计^[4]。

$$\begin{aligned} \text{3D FDTD 所需内存} &= N \times \left(6 \frac{\text{变量}}{\text{元胞}} \times 4 \frac{\text{Bytes}}{\text{变量}} + \right. \\ &\quad \left. 6 \frac{\text{材料}}{\text{元胞}} \times 1 \frac{\text{Bytes}}{\text{材料}} \right) = 30N \text{ Bytes} \quad (7) \end{aligned}$$

则 A 型导弹所需内存约为 210 Mb, B 型导弹约为 188 Mb。两种模型计算所用的时间步都为 2 700 步,计算所用的时间分别为 9 863 μs (A 型)和 9 211 μs (B 型)。计算时入射波电场垂直于前翼,称为垂直极化。

图 7 显示 FDTD 的计算结果。由图可以看出,时域波形出现几个峰值区段,分别对应于弹头、前翼、后翼和导弹尾部的后向散射。比较图中的两条曲线,由于 A 型导弹和 B 型导弹弹头和前翼上有所区别,特别是 A 型导弹的弹头采用了 Von Karman 几何体,明显地减少了后向散射。垂直极化方式下, A 型导弹比 B 型导弹的时域波形有一个位移,那是因为 A 型导弹的弹体长度比 B 型导弹的要长一些。图 8 给出了脉冲从侧面照射导弹时的计算结果,此时入射脉冲沿着 x 方向传播,电场沿着 z 轴,后向接收。从侧面看,除了 A 型导弹的弹体比 B 型导弹的长一些外,两种导弹外形基本一样,所以从图 8 可以看出两条曲线基本上是吻合的。

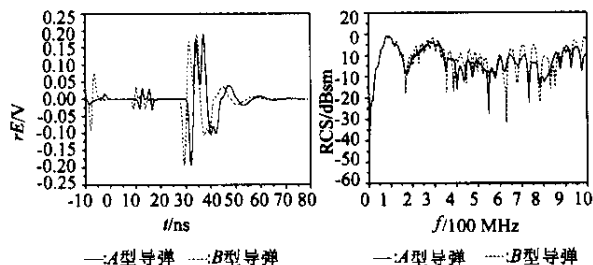


图7 脉冲迎头照射 A 型和 B 型导弹:垂直极化
万方数据

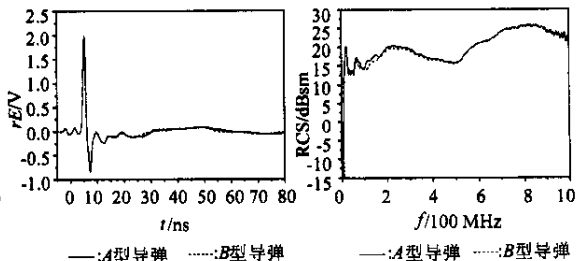


图8 脉冲从侧面照射 A 型和 B 型导弹:水平极化

5 结束语

本文建立了两种导弹目标模型,并利用时域有限差分方法计算了电磁波迎头入射时两种导弹弹头模型在100MHz~750 MHz 频段上的后向 RCS。介绍了用不同参数下的超椭圆曲面来模拟头部雷达罩的情况,例如用 $\nu = 1.381$ 的超椭圆方程来模拟 Von Karman 形状。计算结果表明,在迎头照射时, Von Karman 形状弹头的导弹比半球状弹头的导弹有更小的后向 RCS。

参考文献:

[1] Yee K.S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems in Volv-

(上接第 888 页)

表 1 2 次 B 样条小波系数

滤波器系数	0	1	2	3	4	5
$h(n)$	0.000 0	0.125 0	0.375 0	0.375 0	0.125 0	0.000 0
$g(n)$	-0.006 1	-0.086 9	-0.579 8	0.579 8	0.086 9	0.006 1

- (3) 原始图像进行了 3 级小波变换,每级变换后的高频信息分别存于 D_j^1, D_j^2, D_j^3 中 $j = 1, 2, 3$;
- (4) 通过零交叉方法确定 D_j^1, D_j^2, D_j^3 $j = 1, 2, 3$ 中的极大值,非极大值点置零。通过设定阈值去除一些噪声对应的极值点;
- (5) 根据李氏指数规律分别比较 $D_3^1, D_2^1, D_1^1, i = 1, 2, 3$ 的极值点的大小以确定取舍,其中 D_3^1 与 D_2^1 比较时, D_3^1 二插值成与 D_2^1 大小相同后再进行比较。 D_2^1 与 D_1^1 同理;
- (6) 对 D_1^1, D_1^2, D_1^3 中对应点处的极大值进行比较取最大

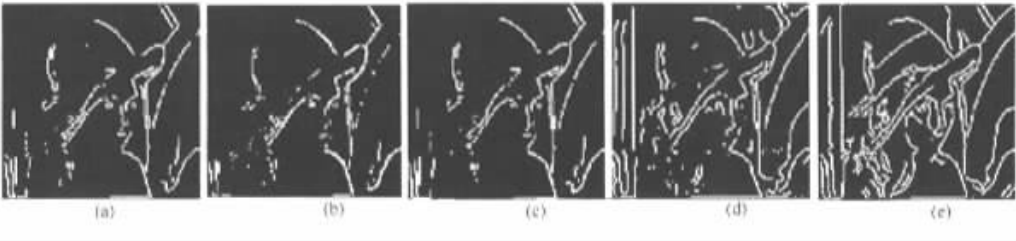


图 2 采用 Sobel, Robert, Prewitt, Log, Canny 检测的图像边缘

5 结 论

实验结果表明,采用本文算法检测的图像边缘效果明显好于采用 Sobel, Roberts, Prewitt, Log 算子检测的图像边缘。采用 Canny 算子检测出的边缘很细腻,虽丢掉了一些边缘信息,但从处理效率上看还是 Canny 算子好于本文算法。本文算法相对于梯度算法的优点是计算量小,不用对边缘点进行串接,边缘提取得较细腻,丢失信息较少。在算法的实现过程中发现,对于检测边缘信号,小波函数应采用反对称的为好,一般大多采用 B 样条小波。在去除噪声上,阈值的确定非常关键,需要根据具体情况选择适当的阈值确认方法。通过本文方法提取的边缘特征,为下一步图像匹配与目标跟踪打下很好的基础,该算法在边缘检测方面是非常有效的。

ing Maxwell's Equations in Isotropic Media[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagat., 1969, 14: 302-307.

[2] Woo A C, Wang H T G, Schuh M J. Benchmark Radar Targets for the Validation of Computational Electromagnetics Programs[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagat., 1993, 135: 84-89.

[3] Overfelt P L. Superspheroids: A New Family of Radome Shapes[J]. IEEE Trans. on Antennas Propagat., 1995, 43: 215-220.

[4] 葛德彪, 闫玉波. 电磁波时域有限差分方法[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002. 151-152.

值放到与 D_1^i 大小相同的数组 D 中,然后采用阈值方法对 D 进行二值化,最后得到图像的边缘。

4 实验结果及与其它边缘检测方法的比较

为了说明本文算法的有效性,分别对图 1 中的 3 幅图像进行了检测。图 1(c) 图 1(j) 图 1(o)是采用本文算法得到的图像边缘。图 1(b) 图 1(g) 图 1(l)是采用本文算法得到的水平高频的边缘信息。图 1(c) 图 1(h) 图 1(m)是得到的垂直高频的边缘信息。图 1(d) 图 1(i) 图 1(n)是得到的对角线方向的边缘信息。为了和传统的边缘检测算子进行比较,图 2 给出了分别采用 Sobel, Roberts, Prewitt, Log, Canny 边缘检测算子对图像 Lina 进行边缘检测的结果。

参考文献:

[1] 章玉晋. 图像处理和分机[M]. 北京:清华大学出版社, 1999. 180-215.

[2] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京:科学出版社, 2001. 145-176.

[3] Mallat Stephane, Zhong Sifen. Characterization of Signals from Multiscale Edge[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 710-733.

[4] Mallat Stephane. Zero-Crossing of a Wavelet Transform[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1991, 37(4): 1019-1033.

[5] Mallat Stephane, Wen Liang Hwang. Singularity Detection and Processing with Wavelet[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.

[6] 陈武凡. 小波分析及其在图像处理中的应用[M]. 北京:科学出版社, 2002.

雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

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, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、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。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念, 也是电磁理论研究的重要课题, 使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起, 系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授, 边操作边讲解, 直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程, 其中: 《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程, 帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用; 《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面, 包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义, 实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程, 专家讲授, 从零讲起, 直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

更多培训课程:

- HFSS 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- CST 培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- 天线设计培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>