

# 针对某型导弹 RCS 的计算与仿真

邹 昕,景占荣,羊 彦

(西北工业大学电子信息学院,陕西 西安 710072)

**摘要:**为研究导弹目标的电磁散射特性,预估和优化导弹系统整体设计,分析了导弹的高频散射机理,并且运用物理光学法计算目标表面反射场的 RCS,以及等效电磁流法计算由弹翼的前后沿、弹体结合部及弹尾产生的边缘绕射场的 RCS。用算法对某已知导弹弹体模型进行仿真,与文献中验证过的结果吻合,且方法运算速度快,不受目标尺寸约束,完全可以满足工程分析的需要。根据某型导弹的设计要求,对其进行了建模,并给出导弹模型及仿真结果。

**关键词:**雷达散射截面;物理光学法;等效电磁流法

**中图分类号:**TM15 **文献标识码:**B

## Calculation and Simulation of a Type of Missile's RCS

ZOU Xin, JING Zhan - rong, YANG - yan

(College of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shanxi 710072, China)

**ABSTRACT:** In order to investigate missile's electromagnetic scattering, preestimate and optimize integrated missile system, scattering effect of missiles was analyzed. Physical optics (PO) was used to calculate RCS of reflecting field, and equivalent currents (MEC) were used to calculate RCS of diffraction caused by front and back edges of wings, joint part of the body and trail of missile. Simulation was carried out using some known missile, which proved that this algorithm can satisfy the analysis need for the RCS calculation of missiles. Therefore, a model was established for a certain type of missile based on its design. And missile's model and simulation result were presented.

**KEYWORDS:** Radar cross section(RCS); Physical optics (PO); Equivalent currents (MEC)

### 1 引言

雷达目标的 RCS 计算既能用于分析现有的各种军事目标,又能用来预估和优化未来武器系统,具有投资少、周期短、灵活多变的特征。因此,长时间以来,雷达散射截面的分析和预估一直是国内外电磁场理论研究的一个重要课题。近几年来,随着隐身与反隐身、雷达识别与反识别、精确制导及仿真等技术的发展,武器系统对目标的电磁散射要求更具针对性,对复杂目标 RCS 的计算也提出了更高的要求。因此,本文根据某型导弹的设计要求,分析了某型导弹的高频散射机理,并且运用物理光学法计算目标表面反射场的 RCS,以及等效电磁流法计算由弹翼的前后沿、弹体结合部及弹尾产生的边缘绕射场的 RCS。从仿真结果来看,该算法符合导弹 RCS 的分布规律,可以为后续工作提供较为可信的数据,并且运算速度快,不受目标尺寸的约束,满足工程研究分析的需要。

### 2 导弹弹体散射机理与计算方法的选择

当对抗常规雷达时,目标具有高频散射特性。不同的高频分析方法都是突出某一个散射机理,而忽略其他的散射要素。因此进行导弹 RCS 分析的思路为:根据目标各种散射机理及相应散射源几何特征,分别采用相应的高频方法计算散射场,适当地应用数值方法和工程修正方法迭加各散射源的散射场后得到总散射场,计算出目标的 RCS。

某飞航导弹的几何结构如图 1 所示,它由理想导体材料构成,其散射主要来源于:①导弹表面(如弹头、弹体、尾翼、前翼)的镜面反射;②表面不连续性(如边缘、拐角等)绕射;③相互作用散射<sup>[1]</sup>。

镜面反射和边缘绕射是两种较强的散射机理,并且在大部分实际情况下,目标的整体散射效果绝大部分来源于单次散射,因此在精度要求不高的情况下,忽略多次散射带来的误差影响不大,完全可以满足工程需要。

对于导弹这种电大物体,它的散射计算应该在高频区域进行,在高频散射计算理论中,对于表面反射场的计算主要



图1 某型导弹模型

是采用几何光学法和物理光学法。但几何光学只能解决镜面反射问题,误差较大,因此本文选择更贴近实际情况的物理光学理论<sup>[2]</sup>。而表面不连续性的绕射部分(如弹翼的前后沿、弹体结合部及弹尾等)则可以用等效电磁流法<sup>[5]</sup>(MEC)进行计算。

### 3 导弹弹体 RCS 具体计算

目标表面的反射场是强散射机理,在整体散射贡献中是占优的。由于本文采用物理光学法对表面反射场进行计算,这就涉及到对表面感应电流的积分。在目标的几何建模中把目标表面划分成了多边形平面,根据场的局部性原理,可以将对目标整个表面的积分运算分解为对各个小面元散射场的计算,然后进行矢量场叠加即可。物理光学表面积分在大多数情况下都无法给出解析解,但对于平面多边形这一特定结构却可以给出闭合的解析解形式,从而避免了复杂耗时的积分运算,这也是物理光学法应用于面元建模目标散射场计算的优点之一。

#### 3.1 平面多边形物理光学散射计算

由于本文在建模仿真时把目标表面划分成三角面元,因此,以平面三角形为例进行推导,平面多边形的散射公式可以类似得到。

对于任意导体曲面  $S$ , 它的 RCS 可由入射磁场来确定,即

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} 4\pi r^2 \frac{|\vec{H}_i|^2}{|\vec{H}_i|^2} \quad (1)$$

式中的散射磁场强度  $\vec{H}_i$  可以通过对物体表面感应电流的辐射积分<sup>[3]</sup>得到。

$$\vec{H}_i = \frac{-jkH_0 e^{jkr}}{2\pi r} \int_S [\hat{s} \times (\hat{n} \times \hat{h}_i)] e^{j\vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_i)} ds \quad (2)$$

其中,  $H_0$  为磁场强度,  $\hat{h}_i$  为磁场极化方向单位矢量,式中的积分表面  $S$  仅是物体的照明部分。

由于积分运算针对平面三角形进行,即  $S$  为三角形区域,则  $\hat{s} \times (\hat{n} \times \hat{h}_i)$  在小平面上是定值,因此积分只需针对相位项进行,即  $\int_S e^{j\vec{k} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_i)} ds$  的运算。运用格林公式可以将对相位的面积分转化为围线积分,通过运算,可以得到如下不含积分的散射场形式:

$$\vec{H}_i(x, y, z) = \frac{H_0 [\hat{s} \times (\hat{n} \times \hat{h}_i)]}{2\pi r T^2} e^{-jkr} \sum_{n=1}^3 (\vec{p} \cdot \vec{a}_n) \exp(jk \vec{r}_n^0 \cdot \vec{W})$$

$$\vec{r}_n^0 \cdot \vec{W}) \frac{\sin(\frac{1}{2} k \vec{a}_n \cdot \vec{W})}{\frac{1}{2} k \vec{a}_n \cdot \vec{W}} \quad (3)$$

其中,  $\vec{W} = \hat{i} - \hat{s}$ ,  $\vec{p} = \vec{W} \times \hat{n}$ ,  $\vec{r}_n^0$  是第  $n$  边中点在原坐标系中的位置矢量,  $\vec{a}_n$  表示第  $n+1$  个顶点和第  $n$  个顶点所夹边的矢量。

扩展到多边形情况为:

$$\vec{H}_i(x, y, z) = \frac{H_0 [\hat{s} \times (\hat{n} \times \hat{h}_i)]}{2\pi r T^2} e^{-jkr} \sum_{n=1}^N (\vec{p} \cdot \vec{a}_n) \exp(jk \vec{r}_n^0 \cdot \vec{W})$$

$$\vec{r}_n^0 \cdot \vec{W}) \frac{\sin(\frac{1}{2} k \vec{a}_n \cdot \vec{W})}{\frac{1}{2} k \vec{a}_n \cdot \vec{W}} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{[\hat{s} \times (\hat{n} \times \hat{h}_i)]^2}{\pi T^4} \left| \sum_{n=1}^N (\vec{p} \cdot \vec{a}_n) \exp(jk \vec{r}_n^0 \cdot \vec{W}) \frac{\sin(\frac{1}{2} k \vec{a}_n \cdot \vec{W})}{\frac{1}{2} k \vec{a}_n \cdot \vec{W}} \right|^2 \quad (5)$$

以上推导均基于磁场积分方程<sup>[4]</sup>,电场积分方程的推导完全相同。至此,得到了单个面元 PO 场的计算公式,这样也就可以用简单的代数运算求得平面多边形平板的散射场和它的 RCS。分析的目标是经过几何建模处理后的目标,其表面被划分成许多三角面元,将所有剖分后得到的可见面元的 PO 场矢量叠加就得到了整个目标表面的 PO 场,从而也就可以近似得到曲面的 RCS 值。而这个近似程度是随着曲面划分的精细度提高而提高。

#### 3.2 边缘绕射场的计算

边缘绕射场主要由弹翼的前后沿、弹体结合部及弹尾产生,可采用等效电磁流法对其进行计算。边缘绕射场可表示为<sup>[6]</sup>:

$$\vec{E}^d(s) = jk \int_C [Z \cdot \vec{I} \cdot \hat{s} \times (\hat{s} \times \hat{l}) + M \cdot \hat{s} \times \hat{l}] G(\vec{r}', \vec{r}) d\vec{l} \quad (6)$$

上式中,  $Z$  为自由空间波阻抗;  $G(\vec{r}', \vec{r})$  为自由空间格林函数;  $\hat{s}$  为绕射方向的单位矢量;  $\hat{l}$  为边缘的单位切线矢量;  $I$  为边缘的等效电流;  $M$  为等效磁流。在向后散射情况下有<sup>[7]</sup>:

$$I = E_i^i \frac{(\cos \phi - 1)}{jkZ \sin^2 \beta' \cos \phi} - H_i^i \frac{2 \cos \beta' (1 + \cos \phi)}{jk \sin^2 \beta' \cos \phi} \quad (7)$$

$$M = H_i^i \frac{Z(1 + \cos \phi)}{jk \sin^2 \beta' \cos \phi} \quad (8)$$

其中:  $E_i^i$  是入射电场在  $\hat{i}$  方向分量;  $H_i^i$  是入射磁场在  $\hat{i}$  方向分量;  $\phi$  是  $\vec{e}^i$  与  $\hat{i}$  构成平面  $\hat{i}$ 、 $\hat{s}$  构成平面间的二面角;  $\beta' = \cos^{-1}(\vec{e}^i \cdot \hat{i})$ 。算出  $\vec{E}^d$  后可由下式计算 RCS<sup>[6]</sup>:

$$\sigma = \lim_{r \rightarrow \infty} (4\pi S^2 |\vec{E}^d|^2 / |\vec{E}^i|^2) \quad (9)$$

### 4 某导弹弹体 RCS 计算实例

用以上计算方法对图2所示某导弹弹体模型进行建模

仿真,其中圆柱半径  $r = 0.0803\text{m}$ ,圆柱段长  $0.267\text{m}$ ,椎半角  $11^{\circ}18'$ 。



图2 椎柱几何模型

令椎柱尖点指向  $z$  方向,入射频率  $f = 5.975\text{GHz}$ ,仿真结果如图3。

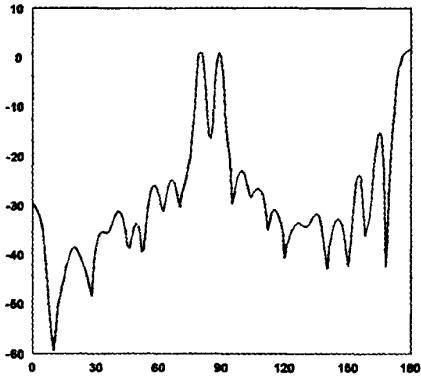


图3 某导弹弹体模型仿真结果

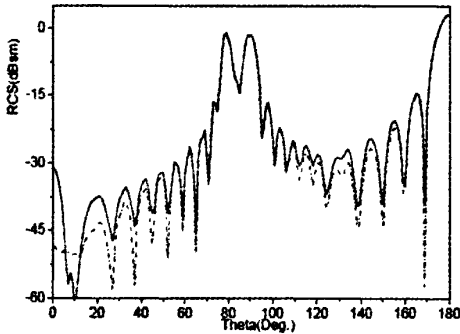


图4 文献[8]中给出的结论

文献[8]中给出此模型经过验证的仿真结果(图4),与图3相比较,发现两者基本吻合,证明此计算方法有效,基本可以满足工程上的需要。因此,用此方法对图1所示导弹模型进行仿真计算,该导弹长  $4\text{m}$ ,入射频率  $10\text{GHz}$ ,方位面为选择圆周  $-90^{\circ} - 270^{\circ}$  ( $-90^{\circ}$ 代表头部),分辨率  $1^{\circ}$ 。结果如图5、图6所示。

从上图计算结果曲线可看出,不同角度时,弹体的 RCS 变化较大,平均 RCS 约为  $0.01\text{sm}$ ,且目标的 RCS 在头部较小,双翼处较大,这是因为导弹侧向主要散射源为弹翼二面角、弹身柱面、弹翼翼面,因此在该方向的电磁散射很强;在

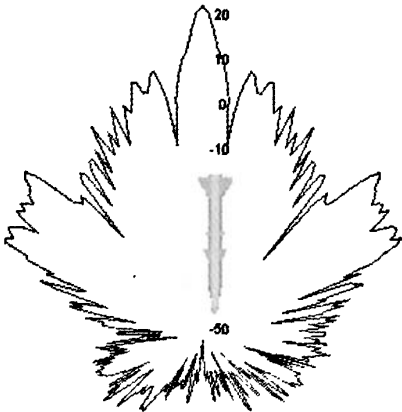


图5 某型导弹仿真结果(极坐标)

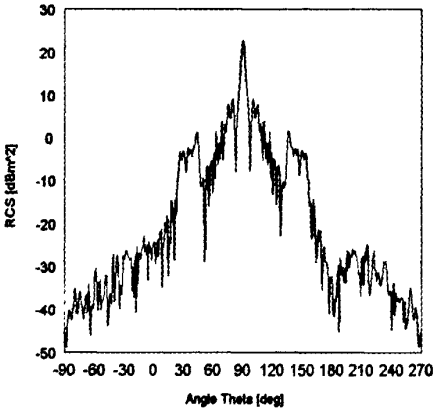


图6 某型导弹仿真结果(直角坐标)

尾部达到最大值,主要由于尾部圆面(实际应为腔体)及弹身正侧面的垂直尾翼的贡献。由于没有实验结果,本文无法直接验证计算结果的精度,但是根据经验和实际的其它导弹目标测试结果可以看出该仿真曲线符合实际情况,因此理论结果较准确地反应了实际变化趋势。证明这种方法贴近工程需要,可以基本满足电大尺寸的复杂目标设计的前期估算。

5 结论

使用物理光学法等高频方法计算导弹弹体 RCS,虽然其精度不如矩量法、有限元等算法,但是它物理概念清晰简单,不受目标尺寸约束,运算速度快,对硬件要求较低,在处理电大尺寸复杂目标时,具有较大的优势,完全可以满足导弹弹体前期设计估算 RCS 时的工程需要。这种算法的缺点是 PO 法假定目标处于阴影部分的表面电流严格等于零,从而人为地引入了电流的不连续性,因此随着散射方向离开镜面反射方向越远,误差越大。

## 参考文献:

- [1] Shuen - Yih Wang, Shyh - Kang Jeng. A Compact RCS Formula for a Dihedral Corner Reflector at Arbitrary Aspect Angles [J]. IEEE Trans. Antennas Propagat. 1998, 46 (7): 1112 - 1113.
- [2] 李建周. 一体化雷达散射截面计算方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2003, 21(4): 449 - 451.
- [3] David C Jenn. Radar and laser cross section engineering [R]. AIAA education series, 1995.
- [4] 李舰, 段文义, 徐彦明. 飞行器 RCS 建模方法研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(12): 54 - 56.
- [5] 张云飞, 等. 导弹的 RCS 计算研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(3): 325 - 328.
- [6] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

- [7] Arie Michaeli. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1984, (3): 252 - 258.
- [8] 王超. NURBS 曲面 RCS 算法研究[D]. 西北工业大学硕士学位论文, 2004 - 2.

## [作者简介]



邹 昕(1983 - ), 女(汉族), 安徽人, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达的目标特性。

景占荣(1946 - ), 男(汉族), 陕西人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达与控制。

羊 彦(1970 - ) 女(汉族), 四川人, 副教授, 主要从事电力电子与电控系统的研究和产品开发。

## (上接第 25 页)

2) 从表 1 中的仿真结果看出, 声诱饵最早被鱼雷发现的发射角度与鱼雷报警舷角接近。如果按鱼雷报警舷角发射声诱饵, 虽然能够使声诱饵在最短的时间内被鱼雷发现, 但由于发现时间较短, 潜艇机动距离不远, 很有可能导致鱼雷在识别声诱饵为假目标后, 潜艇还没有逃出鱼雷的搜索范围, 影响对抗效果。我们希望声诱饵不仅能被鱼雷最先发现而且应该给潜艇争取尽量多的机动时间, 因此, 在实施声诱饵对抗干扰鱼雷时, 应该避免按照鱼雷报警舷角方向发射声诱饵而选择迎雷方向并提前一定角度发射声诱饵, 这样不仅能够使得声诱饵尽快被鱼雷发现, 并且会在一定程度上增加潜艇的机动规避时间。

3) 声诱饵以可行发射方向的边界值角度发射时, 潜艇和声诱饵可能同时被鱼雷探测到, 由于误差的存在, 声诱饵很可能诱骗失败, 减小对抗成功概率。

在实战中, 应该首先保证声诱饵保证鱼雷先探测到声诱饵, 与此同时, 希望能给潜艇争取更多的宝贵的机动时间, 从而提高潜艇的生存概率。经过分析, 发现迎雷方向并偏离鱼雷报警舷角一定的提前角发射为最佳选择, 这样可以使鱼雷识别声诱饵为假目标时, 潜艇已机动逃离鱼雷自导搜索区域, 对抗效果比较好。鱼雷、声诱饵和潜艇的航向、航速都存在误差, 但是在误差允许的范围内, 表 1 中所得仿真结果能够反映在不同鱼雷报警舷角下, 声诱饵能够成功诱骗鱼雷的可行发射区域, 研究结果具有较高的参考价值。

## 5 结束语

现代海战中, 正确快速做出决策至关重要。潜艇在使用自航式声诱饵对抗声自导鱼雷时, 由于声诱饵发射时机、发射方向、航速、弹道等因素的确定都对其对抗效果有一定的

影响, 而其中声诱饵发射方向的影响最为显著, 如果发射方向选择恰当, 则可大大提高潜艇的生存概率。针对这一问题, 本文通过建立模型, 并采用了一种较为简单直观的方法, 对声诱饵对抗干扰模型进行了简化, 然后通过数学仿真分析研究了声诱饵朝水下空间各个方向发射时所产生的对抗效果, 并得到了不同鱼雷报警舷角下声诱饵的可行发射区域以及最不利发射方向角。最后结合实际作战情况对仿真结果做出了分析, 研究结果对声诱饵的作战使用方法的进一步研究有一定得参考价值。

## 参考文献:

- [1] 孟庆玉, 张静远. 鱼雷作战效能分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003 - 5. 135 - 136.
- [2] 田坦, 刘国枝, 孙大军. 声纳技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000 - 3.
- [3] 陈春玉. 反鱼雷技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006 - 4.
- [4] 赵洪海, 闫海蛟, 张宁. 潜艇机动对鱼雷捕获概率影响的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2005 - 9.
- [5] 刘保果, 章新华. 拖曳声诱饵对抗自导鱼雷的效能评估[J]. 2001 - 4.

## [作者简介]



侯 琳(1985 - ), 女(汉族), 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为电子对抗系统建模与仿真。

胡 波(1968 - ), 男(汉族), 湖北荆州人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电子对抗系统建模与仿真。

章桂永(1982 - ), 男(汉族), 江西南昌人, 硕士研究生, 主要研究方向为电子对抗系统建模与仿真。

## 雷达散射截面 ( RCS ) 分析培训课程

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, 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/>