

# 舰船高频雷达散射截面的快速精确计算

曲长文, 向迎春, 侯海平, 平殿发

(海军航空工程学院 电子信息工程系, 山东 烟台 264001)

**摘要:** 分析大型舰船类目标高频电磁散射特性对未来海战具有重要实用意义。针对当前目标高频电磁散射计算精度有限的问题,在CAD构建舰船表面模型的基础上,用多层快速多极子方法(MLFMA)对舰船类目标进行高频电磁散射截面进行分析。仿真结果表明,多层快速多极子算法能准确快速预估大型舰船目标的高频散射截面,并且具有耗时较少的特点,为高频雷达系统的研究及舰船设计提供有效的参考数据。

**关键词:** 舰船模型; 高频雷达; 雷达散射截面; 多层快速多极子算法

**中图分类号:** TJ958.93 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7649(2010)04-0125-05 **DOI:**10.3404/j.issn.1672-7649.2010.04.031

## Fast and accurate RCS calculation of ship for HF radar

QU Chang-wen, XIANG Ying-chun, HOU Hai-ping, PING Dian-fa

(Department of Electronic and Information Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** It's of practical importance to analyze scattering characteristic of large ship targets with respect to high frequency (HF) radar in future maritime warfare. Aiming at the limited accuracy problem of general HF methods, and based on modeling the ship surface model by CAD, HF radar cross section (RCS) of ship targets was calculated by multilevel fast multi-pole algorithm (MLFMA). Simulated results indicate that HF RCS of large ship targets can be calculated fast and accurately by MLFMA and is less time-consuming, which can provide effective data reference for HF radar system research and ship design.

**Key words:** warship model; HF radar; RCS; MLFMA

## 0 引言

高频雷达如高频表面波雷达(HF Surface Wave Radar),是一类工作于高频(3~30 MHz)频段、利用高频电磁波沿海面(地表面)绕射传播特性而工作的雷达。由于这种雷达能探测到视距以外的目标,因此,通常也可称之为超视距雷达。由于高频雷达系统可靠性高,探测覆盖面积大,使用和维护费用低,并且可以全天候超视距监测海上移动目标,因此准确计算高频雷达散射截面具有重要的实际意义。高频方法如几何光学法、物理光学法、几何绕射理论等,广泛用于各类复杂目标雷达截面(Radar cross section, RCS)的计算,但该类方法在获取目标表面电流时采用近

似,计算精度不高,而微分方程方法也不利于三维电大尺寸目标的散射分析。因此上述各类方法都不能满足大型复杂舰船对雷达散射特征设计的要求。文献[1]采用矩量法和图形电磁计算方法(Graphical electromagnetic computing, GRECO),矩量法(Method of moment, MOM)精度高但所需内存大且耗时长,而GRECO在忽略了舰船目标的细节结构之后与矩量法的计算结果才比较吻合,因而精度有限。文献[2]采用FDTD对舰船类目标进行短波谐振电磁建模,但随着频率的增加,FDTD方法中网格大小相对于入射波长增大,从而引起数值色散。多层快速多极子算法(Multilevel fast multi-pole algorithm, MLFMA)在MOM和快速多极子方法(fast multi-pole method, FMM)的

收稿日期: 2009-10-17; 修回日期: 2009-11-06

作者简介: 曲长文(1963-),男,教授,博士生导师,主要研究领域为信号处理、SAR成像和电子对抗等。

基础上发展而来,具有矩量法的高精度,同时还有节省内存和缩短耗时的优越性。因此本文采用 MLFMA 计算复杂舰船目标的高频雷达散射截面。

## 1 多层快速多极子算法

### 1.1 基本思想

FMM 是 20 世纪 90 年代初国际上提出的用于积分方程计算的快速算法<sup>[3]</sup>,相比于 MOM 不但大大加速了矩阵与矢量相乘计算,并且也大大降低了存储量。FMM 的数学基础是矢量加法定理,即利用加法定理对积分方程中的格林函数进行处理。通过在角谱空间中展开,利用平面波进行算子对角化,最后将密集阵与矢量的相乘计算转化为几个稀疏阵与该矢量的相乘计算。FMM 将目标表面离散得到的子目标分组,根据他们所在组的位置关系对任意 2 个子目标间的互耦采用不同的处理方法。自身组和相邻组采用直接矩量法计算,非相邻组采用聚合-转移-配置方法计算。

当目标的电尺寸加大后,用 MLFMA 来实现。MLFMA 采用多层分区计算,基于树形结构,特点是:逐层聚合、逐层转移、逐层配置、嵌套递推。对于三维情况,用立方体包围目标,第一层得到 8 个子立方体。随着层数增加,每个子立方体再细分为 8 个更小的子立方体,直到最细层满足边长小于半个波长为止。在未知量数目  $N \geq 5 \times 10^4$  时,MLFMA 的高效率尤为突出<sup>[4]</sup>。

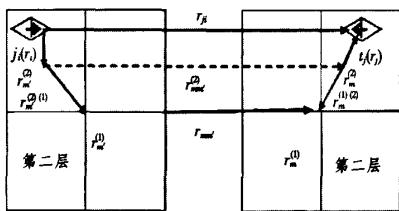


图 1 二层 FMM 的示意图

Fig. 1 The sketch map of two level FMM

考虑 1 个两层的 FMM<sup>[5]</sup>,如图 1 所示。在图 1 中,对于场点  $r_j$  和源点  $r_i$ ,有

$$\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{m'}^{(2)} + \mathbf{r}_{m'}^{(1)(2)} + \mathbf{r}_{mm'} + \mathbf{r}_m^{(2)(1)} + \mathbf{r}_{jm}^{(2)}. \quad (1)$$

于是展开的标量格林函数为:

$$\frac{e^{-jk r_j}}{r_j} = \frac{-jk}{4\pi} \oint d^2 \hat{\mathbf{k}} e^{-jk \cdot [\mathbf{r}_m^{(2)(1)} + \mathbf{r}_{jm}^{(2)}]} \alpha_{mm'}(k \mathbf{r}_{mm'}, \hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{r}}_{mm'}) e^{jk \cdot [\mathbf{r}_{im'}^{(2)} + \mathbf{r}_{m'}^{(2)(1)}]}. \quad (2)$$

其中,

$$\alpha_{mm'}(k \mathbf{r}_{mm'}, \hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{r}}_{mm'}) = \sum_{l=0}^L (-j)^l (2l+1) \cdot h_l^{(2)}(k \mathbf{r}_{mm'}) p_l(\hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{r}}_{mm'}) \quad (3)$$

是转移因子。矢量  $\mathbf{r}$  的上标(2)和(1)表示层数。多极子模式数  $L$  按下式取值:

$$L = k D_{\max} + \alpha_L \ln(k D_{\max} + \pi). \quad (4)$$

其中,  $D_{\max}$  为组的最大直径;  $\alpha_L$  为精度控制参数,  $\alpha_L = 5$  时得到单精度的  $T_L$  值,  $\alpha_L = 10$  时得到双精度的  $T_L$  值。因此,并矢格林函数可表示为:

$$\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{r}_j, \mathbf{r}_i) = \frac{-jk}{4\pi} \oint d^2 \hat{\mathbf{k}} (\bar{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{k}} \hat{\mathbf{k}}) e^{-jk \cdot [\mathbf{r}_m^{(2)(1)} + \mathbf{r}_{jm}^{(2)}]} \alpha_{mm'}(k \mathbf{r}_{mm'}, \hat{\mathbf{k}} \cdot \hat{\mathbf{r}}_{mm'}) \cdot (\bar{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{k}} \hat{\mathbf{k}}) e^{jk \cdot [\mathbf{r}_{im'}^{(2)} + \mathbf{r}_{m'}^{(2)(1)}]}. \quad (5)$$

所以,对于远相互作用的阻抗矩阵

$$\mathbf{Z}_{ji} = \frac{-jk}{4\pi} \sum_{\hat{\mathbf{k}}^{(1)}} \omega_{i(1)} e^{-jk \cdot \mathbf{r}^{(2)(1)}_{im'}} V_{jm}[\hat{\mathbf{k}}^{(2)}] \cdot \alpha_{mm'}(k^{(1)} \mathbf{r}_{mm'}, \hat{\mathbf{k}}^{(1)} \cdot \hat{\mathbf{r}}_{mm'}) \cdot V_{im'}^*(\hat{\mathbf{k}}^{(2)}) e^{jk \cdot \mathbf{r}^{(2)(1)}_{im'}}. \quad (6)$$

其中,

$$V_{im}[\hat{\mathbf{k}}^{(2)}] = \int d\mathbf{r}_i e^{-jk \cdot \mathbf{r}^{(2)}_{im'}} [\bar{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{k}} \hat{\mathbf{k}}] \cdot \mathbf{j}_i(\mathbf{r}_i); \quad (7)$$

$$V_{jm}[\hat{\mathbf{k}}^{(2)}] = \int d\mathbf{r}_j e^{-jk \cdot \mathbf{r}^{(2)}_{jm'}} [\bar{\mathbf{I}} - \hat{\mathbf{k}} \hat{\mathbf{k}}] \cdot \mathbf{t}_j(\mathbf{r}_j). \quad (8)$$

式中,  $\mathbf{t}_j(\mathbf{r}_j)$  为权函数;  $\mathbf{j}_i(\mathbf{r}_i)$  为基函数;  $\omega_{i(1)}$  为权因子。不同的层级数需要不同数目的平面波,平面波在聚集和发散过程中都需要移置,因而 MLFMA 较 FMM 增加 4 个数学操作。其中聚集过程有 2 个:一个是将以高层组中心为起点的平面波移置到以低层组中心为起点的平面波;另一个是小数目的平面波插值到大数目的平面波。发散过程是聚集过程的逆操作:一个是将以低层组中心为起点的平面波移置到以高层组中心为起点的平面波;另一个是大数目的平面波反插值得到小数目的平面波。平面波中心的移置就是将平面波乘上对应两中心间距的相位因子,然后将相同方向的平面波相加,便可得到一列以低层组中心为起点的平面波。MLFMA 的误差来源于无穷求和序列的截断误差和角谱空间积分的数值积分误差以及内插误差。层数越多,内插误差越大,如果只计算 RCS,则  $\alpha_L = 1$  就可以得到可接受的精度。

### 1.2 求解步骤

经推导,所有源散射体  $i$  对场散射体  $j$  的贡献用 FMM 表达为<sup>[6]</sup>:

$$\sum_{i=1}^N A_{ji} a_i = \sum_{m \in NG} \sum_{i \in G_m} A_{ji} a_i + \frac{ik}{4\pi} \int d^2 \hat{k} V_{mj}(\hat{k}) \cdot \sum_{m' \in FG} \alpha_{mm'}(\hat{k} \cdot \hat{r}_{mm'}) \sum_{i \in G_{m'}} V_{m'i}^*(\hat{k}) a_i. \quad (9)$$

其中,  $a_i$  为第  $i$  个源子散射体的电流幅度;  $V_{mj}$ ,  $\alpha_{mm'}$ ,  $V_{m'i}^*$  分别表示配置、转移、聚合因子;  $NG$  表示附近组贡献;  $FG$  表示非附近组(远组)贡献;  $*$  表示共轭运算。

MLFMA 求解上式的具体步骤为:

#### 1) 最细层的多极展开

计算公式为:

$$S_{m'}(\hat{k}) = \sum_i V_{m'i}^*(\hat{k}) a_i, \quad (10)$$

$$V_{m'i}(\hat{k}) = \int d\mathbf{s}' e^{ik \cdot \mathbf{r}_{im'}} (\mathbf{I} - \hat{k} \hat{k}) \cdot \mathbf{j}_i(\mathbf{r}_{im'}). \quad (11)$$

其中,  $m'$  为最细层中子散射体  $i$  所在组的组中心;  $a_i$  为子散射体的待求感应电流幅度;  $S_{m'}(\hat{k})$  和  $V_{m'i}(\hat{k})$  分别为最细层  $m'$  组的聚合量及聚合因子。

#### 2) 多极聚合

将源子散射体在子层子组中心的聚合量平移到父层父组中心,这时需要对子层的聚合量插值得到父层所需要个数的聚合量,利用插值矩阵,可得:

$$V_{m'l-1}[\hat{k}_{(l-1)n'}] = e^{ik(l-1)n' \cdot \mathbf{r}_{m'l-1}} \cdot \sum_{n=1}^{K_l} W_{n'n} V_{m'n}(\hat{k}_{ln}). \quad (12)$$

式中:  $m'_l, m'_{l-1}$  分别表示第  $l$  层及第  $l-1$  层中源子散射体  $i$  所在组的组中心;  $\mathbf{r}_{m'_l}, \mathbf{r}_{m'_{l-1}}$  分别为  $m'_l, m'_{l-1}$  的矢径;  $W_{n'n}$  为插值矩阵,由于插值节点为二维非均匀分布,故插值用拉格朗日插值公式方法实现。

#### 3) 多极转移

多极聚合到第二层后,便不再向上聚合。此时开始多极转移,即将源区的外向波转移为场区的内向波,为发散过程做准备。在第二层,源区组中心  $m'$  的聚合量  $S_{m'}(\hat{k})$  即为以  $m'$  为中心的外向波,以场区组中心  $m$  为中心的内向波  $B_{m2}(\hat{k})$  如下计算:

$$B_{m2}(\hat{k}) = \sum_{m' \in m-FG} a_{mm'}(\hat{k}) S_{m'}(\hat{k}), \quad (13)$$

$$a_{mm'}(\hat{r}_{mm'} \cdot \hat{k}) = \sum_{l=0}^L i^l (2l+1) \cdot$$

$$h_l^1(k \hat{r}_{mm'}) p_l(\hat{r}_{mm'} \cdot \hat{k}). \quad (14)$$

其中,  $a_{mm'}(\hat{k})$  为第二层上的转移因子。之所以选择第二层开始多极转移,是因为在第二层,远亲组即为

非附近组,通过远亲组的转移计算可得到待求的所有非附近组的贡献。

以上步骤为多层快速多极子的聚合过程,下面步骤为其发散过程。

#### 4) 多极配置

将父层父组中心为中心的内向波转化为以子层子组中心为中心的内向波表达。多极配置为多极聚合的逆过程。公式如下:

$$B_{m_l}^{(1)}(\hat{k}_{ln}) = \sum_{n'=1}^{K_{l-1}} W_{n'n} e^{ik(l-1)n' \cdot \mathbf{r}_{m'l-1}} \cdot B_{m_{l-1}}^{(1)}(\hat{k}_{(l-1)n'}) w_{n'}/w_n. \quad (15)$$

#### 5) 多极转移

为了继续从父层到子层递推下去,就必须得到来自于子层子组的所有非附近组的贡献。在多极配置过程中,已经考虑了父层父组的所有非附近组的贡献,尚未考虑的是该子层子组的远组贡献。于是,在多极配置的基础上再叠加子层子组的远亲贡献,就得到子层子组的所有非附近组的贡献。计算公式如下:

$$B_{m_l}^{(2)}(\hat{k}_{ln}) = \sum_{m' \in m \text{ 的远组}} a_{mm'}(\hat{k}) S_{m'}(\hat{k}_{ln}), \quad (16)$$

$$B_{m_l}(\hat{k}_{ln}) = B_{m_l}^{(1)}(\hat{k}_{ln}) + B_{m_l}^{(2)}(\hat{k}_{ln}). \quad (17)$$

重复步骤 4) 和 5), 直到最细层为止。

#### 6) 部分场展开

对于最细层每个非空组  $m$ , 在其组中心进行部分场展开,得到  $m$  的所有非附近组对组内场点  $j$  的贡献:

$$I_1 = \int d^2 \hat{k} V_{mj}(\hat{k}) \cdot B_m(\hat{k}). \quad (18)$$

其中,  $V_{mj}(\hat{k})$  为最细层的配置因子;  $B_m(\hat{k})$  为最细层上以组  $m$  为中心的内向波,代表了组  $m$  的所有非附近组对组  $m$  的贡献。

7) 直接计算附近组的贡献,与非附近组的贡献相叠加,便得到所有源子散射体对场子散射体的贡献。

#### 1.3 预条件的设置

预处理方法有很多,用得较多的主要有以下几种:不完全(完全)分解预处理方法、超松弛预处理方法、对角预条件、块对角预处理方法和近场预处理方法等。综合积分方程的具体预处理技术,为更好地结合 MLFMA 高效运算,本文采用共轭梯度法(Conjugate Gradient),详细流程可参阅文献[7],限于篇幅不再赘述。

## 2 舰船模型构造

### 2.1 舰船几何模型

目前几何图形软件很多,常用的有 Auto CAD, 3DS Max, Ansys 和 GiD 等,通过这些软件,一般只需目标的点线面体等几何元素信息,经过一系列平移、旋转以及并、交、差等操作即可产生所需的模型。本文采用 CAD 先构造舰船实体模型后提取表面模型,所得舰船模型如图 2 所示。舰船参数为:长 180 m,高 15 m,最宽处 40 m,最窄处 25 m。

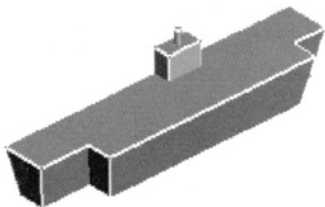


图 2 舰船模型  
Fig. 2 Warship model

### 2.2 基函数和权函数的选择

对应不同的单元类型,需要在单元上定义适合的基函数,即为未知电流的一个数学完备展开。基函数和权函数选取的好坏,直接影响结果的精度和计算的复杂度。

RWG 基函数是 1982 年由 Rao, Wilton 和 glisson 提出的定义在相邻平面三角贴片上的基函数,称为广义屋脊基函数。通常,选取基函数和权函数一致,即采用 Galerkin 方法。在 Rao 提出的电流模型中,以共棱的三角形对作为模拟导体表面的基本面元,电流在公共棱上的分量为一个单位,任何一个三角形所对应的的 3 个棱单元电流在该三角形内线性叠加,用来近似三角形块内分布的任意大小和方向的定长矢量电流分布。这种基函数能灵活模拟任意复杂的三维几何形体如尖点、凹槽及目标表面的突出物。因此,平面三角贴片的 RWG 基函数在复杂形体目标的电磁计算中被广泛采用。这也正是本文所采用的方法。RWG 基函数的表达式为:

$$f_n(r) = \begin{cases} \frac{l_n}{2A_n^+} \rho_n^+ & r \in T_n^+, \\ \frac{l_n}{2A_n^-} \rho_n^- & r \in T_n^-, \\ 0 & \text{其他。} \end{cases} \quad (19)$$

其中,  $T_n^-$  和  $T_n^+$  为共棱三角形对;  $l_n$  为公共棱边;  $A_n^-$

和  $A_n^+$  分别为 2 个三角形的面积;  $\rho_n^-$  和  $\rho_n^+$  分别为 2 个三角形内点的位置矢量。

## 3 仿真分析

为避免可能出现的内谐振带来模糊问题,本文通过求解混合积分方程 (Combined field integral equation, CFIE) 来解决。考虑远场条件下入射波可近似为平面波,在 HF 波段的雷达多采用垂直极化方式,因此本文在计算时未考虑水平极化情况。图 3 ~ 图 5 分别为 15 MHz 平面波从不同方向入射时的双站 RCS 分布图,图中  $\theta$  表示天顶角,  $\varphi$  表示水平方位角。

在一些高频近似计算中往往用 MLFMA 的精度和 MOM 作为验模标准<sup>[8]</sup>,因而在精度上 MLFMA 和 MOM 都是比较高的。在表 1 中,作为比较各方位入射时的入射角仅考虑  $\theta = 50^\circ$ ,  $\varphi = 270^\circ$ 。计算时的计算机配置为:双核 E5200,物理内存 4 GB,虚拟内存 20 GB。在 10 GHz 时,MLFMA 和 MOM 内存需求很大且耗时很长(超出了计算机能力),表中的数据由预估获得。从表中的计算记录数据可以看出,MLFMA 在厘米波段计算大型复杂目标的散射时虽然耗时较长,但在 HF 段计算精度不变条件下网格可以划分得较大,因而耗时比较少,可以快速精确计算出雷达散射截面积。

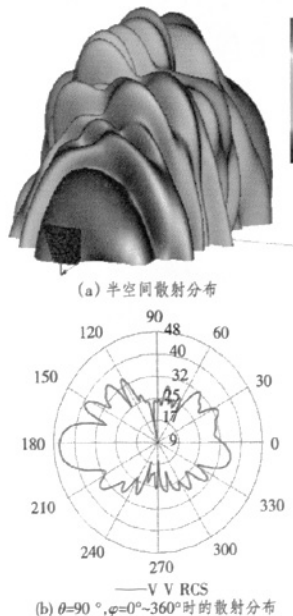


图 3 端面入射:  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  (单位: dBsm)

Fig. 3 The angles of incidence at  $\theta = 90^\circ$ ,  $\varphi = 0^\circ$  (unit: dBsm)

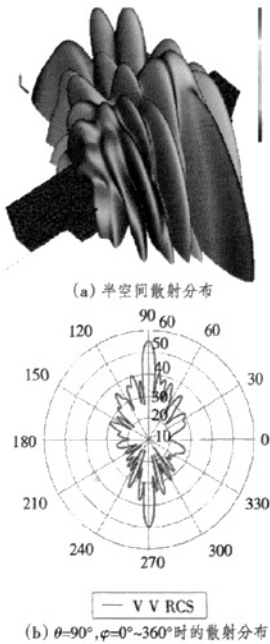


图 4 侧面入射:  $\theta = 90^\circ, \varphi = 270^\circ$  (单位: dBsm)

Fig. 4 The angles of incidence at  $\theta = 90^\circ, \varphi = 270^\circ$  (unit: dBsm)

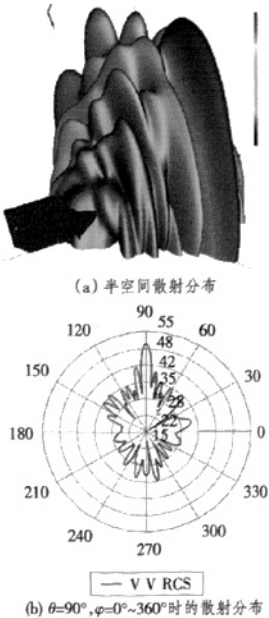


图 5 各方位  $\theta = 50^\circ, \varphi = 270^\circ$  (单位: dBsm)

Fig. 5 The angles of incidence at  $\theta = 50^\circ, \varphi = 270^\circ$  (unit: dBsm)

表 1 计算数据记录

Tab. 1 The data of computation

方法	频率/MHz	入射方向	占用内存/MB	计算耗时/h
MLFMA	10 000	端面入射	37 328.08	约 25
MOM	10 000	端面入射	771107.35	> 500
MLFMA	15	端面入射	36.91	0.025
MOM	15	端面入射	636.24	0.481
MLFMA	15	侧面入射	36.91	0.028
MOM	15	侧面入射	636.24	0.482
MLFMA	15	各方位入射	36.91	0.027
MOM	15	各方位入射	636.24	0.483

#### 4 结 语

本文利用 MLFMA 计算了复杂舰船目标在 HF 波段的 RCS,从计算的结果分析来看,在满足高精度的同时耗时较短,对 HF 雷达系统的设计具有重要参考价值。尤其对舰船隐身设计来说,通过获得舰船的精确 RCS 可以有针对性地采取措施降低对 HF 雷达的散射截面积,这在未来的海战中对舰船的生存具有重要的实用价值。

#### 参考文献:

- [1] 杨正龙,倪晋麟,熊郢. 短波雷达目标散射截面的计算[J]. 现代雷达, 2003, (11): 1-3.
- [2] 陈聪,高火涛,柯亨玉. 舰船短波雷达散射截面数值分析[J]. 现代雷达, 2009, 31(2): 75-77.
- [3] LU C C, CHEW W C. Fast algorithm for solving hybrid integral equations[J]. IEE PROCEEDINGS-H, 1993, 140(5): 455-460.
- [4] 聂在平,胡俊,姚海英,等. 用于复杂目标三维矢量散射分析的快速多极子方法[J]. 电子学报, 1999, 27, (6): 104-110.
- [5] 庄钊文,袁乃昌,莫锦军,等. 军用目标雷达散射截面预估与测量[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [6] CUI Tie-Jun, WENG Cho Chew, CHEN Guang, et al. Efficient MLFMA, RPFMA, and FAFFA algorithms for EM scattering by very large structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004, 52(3): 759-771.
- [7] 温剑. 基于快速多极子方法的高效迭代方法及其工程应用[D]. 成都: 电子科技大学, 2005.
- [8] 徐丰,金亚秋. 计算粗糙海面与大型舰船复合散射的双向解析射线追踪法[J]. 自然科学进展, 2008, 18(7): 814-825.

## 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/>