文章编号:1001-506X(2006)05-0687-03

复杂雷达动目标建模及动态 RCS 分析

张海峰,苏东林,曾国奇
(北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100083)

摘 要:针对复杂雷达动目标的建模仿真及动目标雷达散射截面分析的问题,提出了一种外形建模和电磁散射计算的方法。该方法利用 openGL 对某型飞机进行了较为精确的外形仿真建模,运用图形电磁算法计算了静态雷达散射截面,并利用一种抖动模型计算了动目标雷达散射截面。通过将仿真结果与静态值进行比较,证明了在叠加抖振前后雷达散射截面有较大的变化。得出了结论。

关键词:电磁散射;雷达散射截面;动目标;随机抖振
中图分类号:TM15 **文献标识码**:A

Modeling of the complicated radar moving object and analysis of the dynamic radar cross section

ZHANG Hai-feng, SU Dong-lin, ZENG Guo-qi
(*Dept. of Electronic Engineering, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China*)

Abstract: To investigate the modeling of the complicated radar moving object and the effect of the random wobble on dynamic radar cross section, a method of figure modeling and electromagnetic scattering calculation is presented the figure of the plane is modeled accurately, with openGL the static radar cross section is calculated with GRECO and the RCS of the moving object is calculated with a random wobble model. The comparison of the dynamic value and the static value, shows that the effect of the random wobble on dynamic radar cross section is obvious.

Key words: electromagnetic scattering; radar cross section; moving object; random wobble

0 引 言

本文首先对某型飞机的外形进行仿真建模,计算获得的静态雷达散射截面(radar cross section, RCS),接着分析影响动目标 RCS 的因素,并采用一种抖振模型对动目标 RCS 进行了计算。

1 动目标建模及静态 RCS 计算

1.1 复杂雷达目标的三维仿真建模

根据几何建模方法,复杂雷达目标主要划分为三类:机身、机翼、特殊部件。建模综合使用部件建模法、标准体建模法以及样条函数等多种方法构造目标几何模型。首先将复杂目标分解为部件,然后分别建立网格模型,并结合参数样条进行曲线及面的拟合和网格剖分,实现对网格精度的控制。最终在 OpenGL 环境下生成模型的三维造型,通过 OpenGL 的设置,将目标外形信息提供给目标雷达散射截面计算软件,得到高频散射特性。

建模系统不仅可以依照传统飞行器的设计概念来构建目标的 RCS 计算模型,系统设计时还考虑了当详细资料不可获得时,如何解决目标的建模问题。即对于非常关心的目标,而目标的已知信息又非常有限,这时可根据目标的图片或照片等信息构建其 RCS 计算模型,称为目标的快速建模。

对于某些飞行器目标,无法得到其精确外形信息。在缺少复杂目标具体信息的情况下,通过采集目标外形的关键结点,并用二次曲线拟合目标轮廓,便可以获得目标的基本三维外形信息,进而获得复杂目标的离散网格模型,达到逼近实际目标外形的目的。建模系统采用快速建模的思想、方法,有效解决了在缺乏目标精确外形信息的情况下建立目标三维模型的实际问题。

利用图片快速建模的流程如图 1 所示。

利用上述方法建立某型飞机的模型如图 2 所示。

收稿日期:2005-05-08;修回日期:2005-10-13。
作者简介:张海峰(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向为雷达目标电磁散射特征及雷达目标信号处理。E-mail:zhfbuaa@ee.buaa.edu.cn
万方数据

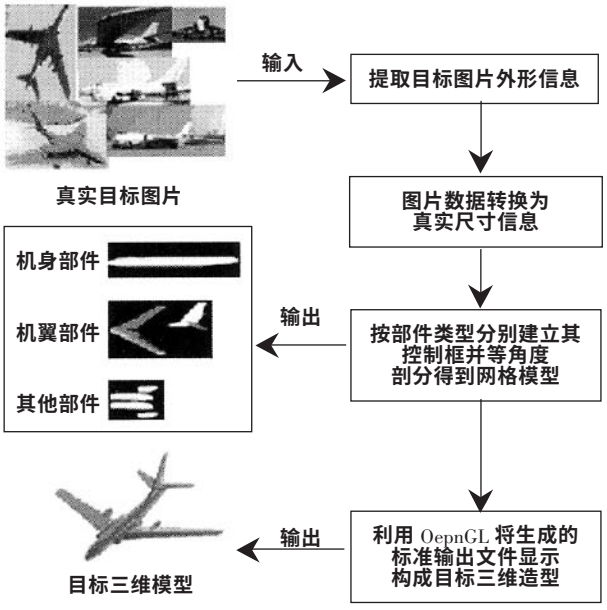


图 1 快速建模图解

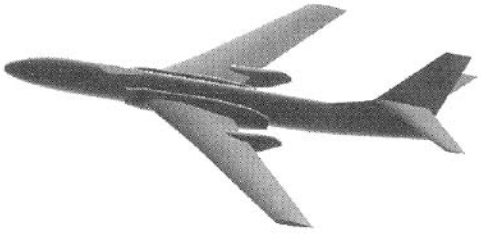


图 2 某型飞机的三维仿真模型

1.2 目标静态 RCS 计算

RCS 是表征雷达目标对于照射电磁波散射能力的一个物理量，定义为单位立体角内目标朝接收方向散射的功率与从给定方向入射于该目标的平面波功率密度之比的 4π 倍。即

$$\sigma = 4\pi \lim_{R\to\infty} R^2 \frac{|\boldsymbol{E}_s|^2}{|\boldsymbol{E}_i|^2} = 4\pi \lim_{R\to\infty} R^2 \frac{|\boldsymbol{H}_s|^2}{|\boldsymbol{H}_i|^2}$$

高频散射中，雷达截面预估有很多高频近似方法。图形电磁算法（graphic electromagnetic computing，GRECO）就是结合计算机图像处理的硬件特性与雷达散射截面计算高频方法的一种新型算法，具有存储量小、运算速度快、实时性强等特点，可以自动处理目标的消隐和遮挡计算。通过目标的光照模型从屏幕显示的亮区中获取每个像素点的法矢和深度信息，再经过棱边、劈等特殊散射中心的识别，选用高频算法得到目标的 RCS。

面元散射模型　根据物理光学法，全金属后向 RCS 在高频条件下的计算公式为

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_s \cos\theta e^{2jKz} ds \right|^2 \tag{1}$$

式中：θ——面元法向量与入射方向之间的夹角，z——面元 ds 到观察点的距离，ds——照亮区的面积。

目标的图像为目标三维表面在计算机屏幕上的投影，因为在计算机屏幕上的积分 ds'（即一象素点），可表示为

$$ds' = \cos\theta ds$$

最后得到全金属面元的 RCS 计算公式为

$$\sigma = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \sum_{pixel} \sin c(Kl\tan\theta) e^{2jKz} \right|^2 \tag{2}$$

棱边的散射模型　棱边的计算采用等效电磁流（MEC）方法。根据高频理论，棱边产生的远区散射场可看成是其上一等效电流的辐射。此电流大小由入射方向和观察点相对棱边的方向来决定。等效电流通常表示为一些增量长度绕射系数的函数。

本文考虑了面元及棱边的散射模型，利用 GRECO 对某目标的静态 RCS 进行了仿真。

2 目标动态 RCS 计算与分析

本节研究分析了目标在运动过程中，雷达观测的目标 RCS 变化。

基本思路：假定目标按一定的航迹运动，通过运动学方程计算出各个时刻目标在大地坐标系下的姿态角度，通过坐标变化，计算出目标在雷达中观测到的姿态角度（目标不认为是一个质点），计算出目标在各个姿态下的 RCS，即为目标随时间变化的 RCS 分布；再在计算中加入目标的随机抖振模型，计算出动目标在有抖振情况下的 RCS 分布。

2.1 雷达动目标运动学模型

取地面参考系，建立动目标的运动学模型[3]。

静止空气中飞行的刚性飞机的运动方程是

$$\begin{aligned} m(\dot{u} + q\omega - rv) &= X + mg_x \\ m(\dot{v} + ru - p\omega) &= Y + mg_y \\ m(\dot{\omega} + pv - qu) &= Z + mg_z \end{aligned} \tag{3}$$

式中：$\dot{u}$，$\dot{v}$，$\dot{\omega}$——飞行加速度在机体坐标系中的分量，p，q，r——飞机角速度分量。

飞机绕质心转动的动力学方程为

$$\begin{aligned} I_x\dot{p} - I_{yz}(q^2 - r^2) - I_{zx}(\dot{r} + pq) - I_{xy}(\dot{q} - rp) - (I_y - I_z)qr &= L \\ I_y\dot{q} - I_{zx}(r^2 - p^2) - I_{xy}(\dot{p} + pr) - I_{yz}(\dot{r} - pq) - (I_z - I_x)rp &= M \\ I_z\dot{r} - I_{xy}(p^2 - q^2) - I_{yz}(\dot{q} + rp) - I_{zx}(\dot{p} - qr) - (I_x - I_y)pq &= N \end{aligned} \tag{4}$$

（下转第 698 页）

万方数据

3 结 论

由以上仿真结果可以看出，该算法在给定测量精度下，角度误差为 1°～2°时，利用电视信号作为非合作辐射源，通过增加多普勒频率作为观测量来改进原有的多普勒频率变化率算法，并结合 EKF 进行定位，可以在很短的时间内(<2 s)估计出空间目标的位置和速度，并且定位精度小于 2%。相比参考文献[6]中介绍的多普勒频率变化率算法(定位时间小于等于 30 s，测距精度小于等于 5%)[6]，提高了收敛速度和定位精度，能够满足实时跟踪的要求，在新型无源探测系统中将具有一定的应用前景。

参考文献：

[1] 单月晖，孙仲康，皇甫堪. 不断发展的无源定位技术[J]. 航天电子对抗，2002(1)：36-42.

[2] 唐小明，何友，夏明革. 基于机会发射的无源雷达系统发展评述[J]. 现代雷达，2002，3(2)：1-6.

[3] 李宗华，肖予钦，周一宇，等. 利用频域和空域信息的单站无源定位跟踪算法[J]. 系统工程与电子技术，2004，26(5)：613-616.(Li Zonghua，Xiao Yuqin，Zhou Yiyu，et al. Single-observer passive location and tracking algorithms using frequency and spatial measurements[J]. *Systems Engineering and Electronics*，2004，26(5)：613-616.)

[4] 郭艳丽，杨绍全. 多普勒频率差无源定位技术[J]. 航天电子对抗，2002(4)：33-35.

[5] Howland P E. Target tracking using television-based bistatic radar [J]. *IEE Proc. ～Radar. Sonar Navig*，1999，146(3)：166-174.

[6] 单月晖，孙仲康，皇甫堪. 单站无源定位跟踪现有方法评述[J]. 航天电子对抗，2002(6)：4-7.

(上接第 688 页)

式中：X，Y，Z 和 L，M，N 通常称为飞机总力和总力矩(在机体坐标系中的分量)。它们分别是空气动力/力矩，发动机力/力矩，以及起落架力/力矩之和。

飞机的姿态通常由三个姿态欧拉角(即滚转角、俯仰角和偏航角)来确定。

求解姿态角需要姿态角变化率和飞机角速度分量之间的关系，这种关系是

$$\begin{aligned}\dot{\varphi} &= p + q\sin\varphi\operatorname{tg}\theta + r\cos\varphi\operatorname{tg}\theta\\ \dot{\theta} &= q\cos\varphi - r\sin\varphi\\ \dot{\Psi} &= q\sin\varphi\sec\theta + r\cos\varphi\sec\theta\end{aligned}$$

利用上述关系式编写程序，输入飞机在初始状态下的运动参数，通过程序处理，得到飞机在运动过程中各时刻下的 x，y，z 坐标、速度 V、加速度 a 和姿态角。

2.2 动目标的随机抖振模型

飞行目标的随机抖振比较复杂，是一个随机过程。随机抖振的影响最终可归结为目标的俯仰和方位角度的抖动。一种飞行抖动模型如下[4]

$$\begin{aligned}\varphi_{t+1} &= \varphi_t\rho + \sqrt{1-\rho}\,rand_1(t+1)\sigma_\varphi\\ \theta_{t+1} &= \theta_t\rho + \sqrt{1-\rho}\,rand_2(t+1)\sigma_\theta\end{aligned} \tag{4}$$

式中：φ_{t+1}，θ_{t+1}——$t+1$ 时刻在飞行坐标系中的方位角和俯仰角的扰动量

$$\rho = \exp(-\Delta t/T) \tag{5}$$

式中：Δt——取样间隔，T——目标扰动周期。$rand_1(t+1)$，$rand_2(t+1)$——服从[-1，1]上的正态分布。σ_φ，σ_θ——目标在飞行坐标系中方位和俯仰方向各自的扰动方差。

2.3 计算结果

本文仿真了匀速直线飞行目标的动态 RCS。目标距离雷达 $X=20$ km，飞行高度 $Y=5\,000$ m，向 Z 轴的负方向运动，飞行速度为 200 m/s，如图 3～图 6 所示。

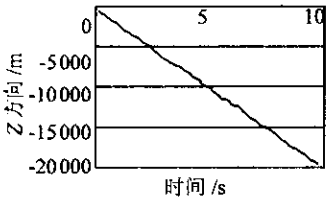
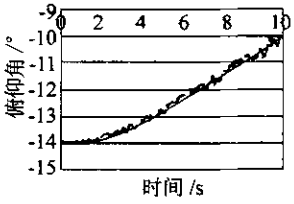
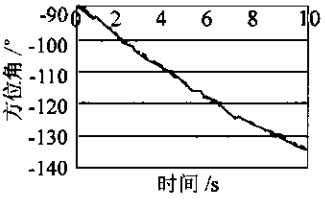


图 3 匀速直线运动的目标飞行航迹数据



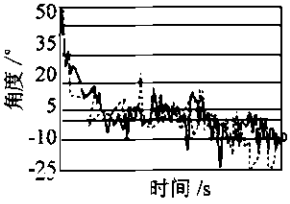
——：有抖动；- - -：无抖动

图 4 雷达观测俯仰角比较



——：有抖动；- - -：无抖动

图 5 雷达观测方位角比较



——：无抖动；……：有抖动

图 6 叠加抖振前后 RCS 的变化

由图 4 可以看到，在叠加抖振前后 RCS 有较大的变化。

3 结 论

本文详细讨论了雷达动目标的建模仿真方法及飞行过程中随机抖振对动态雷达散射截面(RCS)的影响。使用了一种目标抖振模型，分析了动态目标抖振前后 RCS 的变化。可见，抖振对 RCS 有较大的影响。

参考文献：

[1] 刘天舒. 任意雷达目标建模软件的研究和开发[D]. 北京航空航天大学硕士论文，2004.

[2] 杰里 L 伊伏斯，爱德华 K 里迪. 现代雷达原理[M]. 北京：电子工业出版社，1991.

[3] 王行仁. 飞行实时仿真系统及技术[M]. 北京：北京航空航天大学出版社. 1998，9：31－32.

[4] 李民权，吴先良. 飞行动目标 RCS 可视化计算[J]. 安徽大学学报(自然科学版)，2002，26(3).

万方数据

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/