

飞机动态 RCS 序列的仿真研究

庄亚强, 张晨新, 周超, 张小宽
(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

摘要: 针对飞机实际飞行中的各种随机抖动, 提出了一种飞机动态 RCS 序列仿真方法。首先采用飞机缩比模型的激光测量尺寸在 FEKO 中建立精确电磁计算模型, 得到了飞机全空域静态 RCS 数据。在运动建模中先设定飞行航迹, 推算出飞行过程中飞机的姿态角变化, 叠加实际飞行中随机抖动的影响, 使得运动建模更加贴近实际。仿真结果表明: 叠加随机抖动后的动态 RCS 与初始值相差 3 dB 的点数占总数的 17.5%, 该方法对雷达目标动态特性的仿真研究具有重要的参考价值。

关键词: 动态雷达散射截面; 随机抖动; 坐标转换; 仿真

中图分类号: V271.4; TN95 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)07-0103-04

Simulation of Dynamic RCS Series of Aircraft

ZHUANG Ya-qiang, ZHANG Chen-xin, ZHOU Chao, ZHANG Xiao-kuan
(Institute of Air and Missile Defense, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Considering the random jitter of a flying aircraft, a simulation method for dynamic RCS series of aircraft was proposed. An electromagnetic calculation model of the aircraft based on scaling model size was established in FEKO, and the all-space static RCS was obtained. After the flight path was simulated and the attitude angle of the aircraft in flight was calculated out, the dynamic RCS series of the aircraft flying with random jitter were obtained. Random jitter was considered in movement modeling to make movement more realistic. The simulation results show that there are 17.5% points that have 3 dB or above difference with the initial RCS value after considering the effect of the random jitter. The presented method is beneficial to the study of dynamic characteristics of radar targets.

Key words: dynamic RCS; random jitter; coordinate transformation; simulation

0 引言

雷达散射截面(RCS)是表征目标对照射电磁波散射能力的一个物理量,是描述雷达目标特性最基本、最重要的一个参数^[1],因此,RCS被广泛应用于目标识别、雷达系统研究等领域。RCS分为静态和动态两类:静态数据可以通过外场全尺寸目标测量或者室内缩比模型测量获得;动态数据则通过外场飞行试验获得。在实际情况中,雷达目标姿态处于不断运动变化中,因此动态RCS成为人们研究的重点对象。但是外场测量的实验成本高,实验过程中误差因素较多,且难以预见,无法进行误差补偿,造成数据精度不高,此时,采

用仿真方法来获得动态RCS成为许多研究者的必然选择。文献[2]基于缩比模型测量的静态数据研究了弹道目标的动态RCS,在计算动态RCS时未考虑目标在实际运动过程中的随机抖动,运动建模理想化;文献[3-5]利用GRECO进行飞机建模和静态RCS计算,模型的精确度无法保证,从而影响了静态RCS的准确性。

本文基于缩比模型尺寸建立了精确的飞机电磁计算模型,然后获得了飞机全空域静态RCS数据库;结合飞机的运动学特性,预先设定飞行航迹,考虑了实际飞行中的随机抖动的影响,可以获得与实际情况逼近的飞机动态RCS序列。

1 目标建模与静态 RCS 计算

1.1 飞机的几何建模

飞机静态RCS的可用性取决于所建模型的准确性,因此,建立精确的电磁计算模型是计算静态RCS的前提和基础。本文在用于室内静态测量的缩比模型基础上,

收稿日期:2013-08-10

修回日期:2013-09-08

基金项目:陕西省自然科学基金(2010JQ8007)

作者简介:庄亚强(1990—),男,福建泉州人,硕士生,研究方向为雷达目标动态特性及其应用。

采用激光扫描技术实现对缩比模型尺寸全方位测量。为得到更加准确的飞机模型尺寸数据,对测量数据进行三次样条插值,最后将插值后获得的数据按照缩放比放大后应用于飞机电磁计算模型的几何建模,因此所建立的模型精度高,能用于飞机 RCS 的计算。

1.2 全空域静态 RCS 的计算

RCS 的定义^[1]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

$$\sigma = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2} = 4\pi \lim_{R \rightarrow \infty} \frac{|H_s|^2}{|H_i|^2} \quad (1)$$

由于雷达常用波段处于高频,因此人们关心的是飞机目标在光学区的散射特性。目前,许多成熟的电磁仿真计算软件都是基于高频近似方法进行计算的,计算方便快捷且结果准确。因此,本文采用电磁仿真软件 FEKO 来计算飞机的全空域静态 RCS。由于计算频率较高,选择 FEKO 中的物理光学法(PO)来求解静态 RCS^[6]。

对于理想导体,总场的切向分量有

$$\hat{n} \times E^T = 0 \quad (2)$$

$$\hat{n} \times H^T = 2 \hat{n} \times H^i \quad (3)$$

式中: \hat{n} 为表面的外法线矢量; E^T 、 H^T 是表面上 r 处的总场; H^i 为表面单元处的入射磁场;如果入射波在单位矢量给定的方向上传播,磁场强度为 H_0 ,且磁场方向与单位矢量 \hat{h}_i 平行,可得远场散射场的物理光学积分为

$$E^s = \frac{-2jkZH_0 e^{jkR}}{4\pi R} \int_{s_1} \hat{s} \times [\hat{s} \times (\hat{n} \times \hat{h}_i)] e^{jkr(\hat{i}-\hat{s})} ds \quad (4)$$

式中: \hat{i} 为电磁波入射方向的单位矢量; \hat{s} 为散射方向的单位矢量; R 为场点到源点的距离。

据此,可得 RCS 平方根的物理光学表达式为

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \int_{s_1} \hat{n} \times \hat{e}_r \times \hat{h}_i e^{jkr(\hat{i}-\hat{s})} ds \quad (5)$$

通过 FEKO 对飞机进行几何建模和电磁仿真计算,获得飞机模型和全空域静态 RCS 数据如图 1 所示。

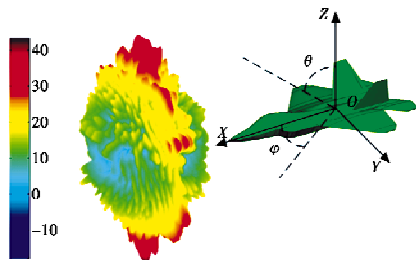


图1 飞机模型及全空域静态 RCS

Fig. 1 Aircraft model and all-space static RCS

2 动态 RCS 序列的仿真

首先根据设定的飞行航迹得到飞机在雷达坐标系中的姿态角,经过坐标变换后,获得飞机在机体坐标系中的姿态角;随后对全空域静态数据进行线性插值获得所需的 RCS 数据,即飞机的动态 RCS 序列;最后叠加上随机抖动,就能得到与实际情况逼近的动态 RCS 序列。仿真流程如图 2 所示。

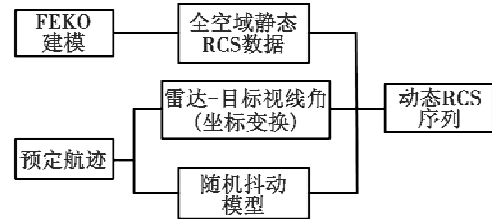


图2 动态 RCS 序列仿真流程图

Fig. 2 The simulation flow chart of dynamic RCS series

2.1 飞机的运动学特性

飞机的飞行状态是由设定航迹的质点运动轨迹和各位置处的姿态组成。飞行航迹在理论上可根据运动学方程和动力学方程进行求解,也可来源于实测数据。

取地面参考系,根据下文中设定的飞机偏航飞行,给出飞机绕质心转动的运动学模型^[7],运动学方程为

$$\begin{cases} \frac{d\phi}{dt} = p + \tan \theta (q \sin \phi + r \cos \phi) \\ \frac{d\theta}{dt} = q \sin \phi - r \cos \phi \\ \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{\cos \theta} (q \cos \phi + r \sin \phi) \end{cases} \quad (6)$$

动力学方程为

$$\begin{cases} I_x \frac{dp}{dt} + (I_z - I_y) qr = L \\ I_y \frac{dq}{dt} + (I_x - I_z) rp = M \\ I_z \frac{dr}{dt} + (I_y - I_x) pq = N \end{cases} \quad (7)$$

式中: (p, q, r) 为飞机的旋转角速度; (ϕ, θ, φ) 为机体坐标系相对地面坐标系的 3 个欧拉角,分别为偏航角、俯仰角、滚转角; I_x, I_y, I_z 分别为飞机对 OX 轴、 OY 轴、 OZ 轴的惯性矩; L, M, N 分别为合外力矩在机体轴上的投影。旋转角速度和欧拉角的关系为

$$\begin{cases} p = \dot{\phi} - \dot{\varphi} \sin \theta \\ q = \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\varphi} \sin \phi \cos \theta \\ r = -\dot{\theta} \sin \phi + \dot{\varphi} \cos \phi \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

由上述计算得到的姿态角是飞机在雷达坐标系中的姿态角,此时还应在雷达坐标系与机体坐标系之间

进行坐标转换,获得飞机在机体坐标系中的姿态角。两类坐标之间的变换关系为

$$\begin{bmatrix} x_T(t) \\ y_T(t) \\ z_T(t) \end{bmatrix} = \mathbf{P} \begin{bmatrix} x(t) - x_R(t) \\ y(t) - y_R(t) \\ z(t) - z_R(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $(x(t), y(t), z(t))$ 为雷达坐标系中任意一点的坐标; $(x_R(t), y_R(t), z_R(t))$ 为飞机航迹点在雷达坐标系中的坐标; $(x_T(t), y_T(t), z_T(t))$ 为点在机体坐标系中的坐标; \mathbf{P} 为雷达坐标系到机体坐标系的变换矩阵,其分量和具体推导过程详见文献[8-9]。

若知道飞机在雷达坐标系中的坐标,就可以由以上变换关系求出雷达视线在机体坐标系中随时间变化的斜距 $r(t)$ 、方位角 $\varphi(t)$ 和俯仰角 $\theta(t)$

$$r(t) = \sqrt{x_T(t)^2 + y_T(t)^2 + z_T(t)^2} \quad (10)$$

$$\varphi(t) = \arctan(y_T(t)/x_T(t)) \quad (11)$$

$$\theta(t) = \arccos(z_T(t)/r(t)) \quad (12)$$

由此姿态角即可获得未考虑随机抖动时的飞机动态 RCS 序列。

2.2 随机抖动模型

由于飞机在飞行过程中可能受风向、气流等自然因素的影响,会产生飞行的随机抖动,并不能严格精确按预定航迹飞行。飞行环境扰动主要影响在于对飞行器姿态的扰动,从而在目标回波中产生附加的调制频谱分量。随机抖动是一个随机过程,它的影响最终可归结为飞机在机体坐标系中的俯仰角和方位角的抖动。本文在运动建模中叠加了一种飞行扰动模型^[10],即

$$\begin{aligned} \varphi_{t+1} &= \varphi_t \rho + \sqrt{1-\rho} \text{rand}_1(t+1) \sigma_\varphi \\ \theta_{t+1} &= \theta_t \rho + \sqrt{1-\rho} \text{rand}_2(t+1) \sigma_\theta \end{aligned} \quad (13)$$

式中: φ_{t+1} 、 θ_{t+1} 分别为 $t+1$ 时刻在机体坐标系中方位角和俯仰角的扰动量; $\text{rand}_1(t+1)$ 、 $\text{rand}_2(t+1)$ 分别为在 $[-1, 1]$ 上的正态分布; σ_φ 、 σ_θ 分别为飞机目标在机体坐标系中方位和俯仰方向各自的扰动方差; $\rho = \exp(-\Delta t/T)$; Δt 为取样间隔, T 为飞机扰动周期。

3 仿真计算与结果分析

本文仿真了偏航匀速飞行的飞机动态 RCS。仿真参数设定:飞行速度为 300 m/s;飞行高度 $z = 6$ km;起点为 (100 km, 1 km, 6 km);终点为 (10 km, 4 km, 6 km)。雷达站的位置为 (0 km, 0 km, 0 km)。抖动模型的扰动方差均为 0.5°, 取样间隔为 1 s, 周期为 2 s。飞行航迹如图 3 所示。

根据设定的飞行航迹,推算出飞机姿态角随时间变化的关系,在姿态角上叠加了上文中随机抖动模型,叠加前后的姿态角变化如图 4 所示。

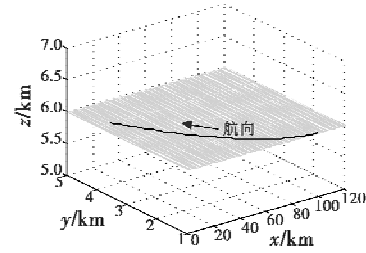
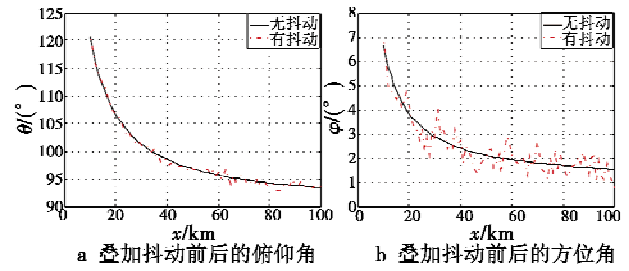


图 3 飞机的飞行航迹

Fig. 3 The flight path of the aircraft



a 叠加抖动前后的俯仰角 b 叠加抖动前后的方位角

图 4 姿态角变化的比较

Fig. 4 Comparison of varying attitude angle

根据预定航迹和随机抖动的姿态角变化,仿真得到了飞机的动态 RCS 序列。叠加随机抖动前后的飞机动态 RCS 序列仿真结果如图 5 所示。

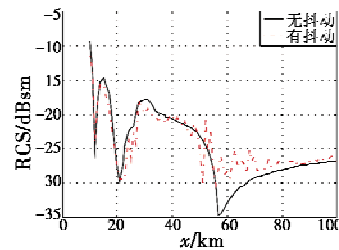


图 5 动态 RCS 序列的比较

Fig. 5 Comparison of dynamic RCS series

由图 5 可以看出,在叠加随机抖动前后的 RCS 有较大变化,在不同的姿态角范围内,随机抖动的影响结果不同。二者相差 3 dB 以上的点数占总数的 17.5%,说明了随机抖动对动态 RCS 序列影响较大。

4 结论

本文介绍了飞机的精确建模方法,重点讨论了利用全空域静态 RCS 数据获得飞机动态 RCS 序列的仿真方法,并采用了一种雷达目标随机抖动模型,分析了随机抖动对动态 RCS 的影响,得出了抖动对动态 RCS 序列有较大影响。考虑随机抖动的动态 RCS 序列仿真能更贴近实际情况,对运动雷达目标 RCS 的仿真研究具有重要的参考价值。文中仅研究了飞机偏航飞行时的动态 RCS 序列,当飞机采取其他机动时亦可以采用本方法进行仿真。雷达目标的动态 RCS 序列的快速获得,对研究雷达目标的动态特性具有重要意义,为

快速做出飞行决策提供参考依据,同时促进了隐身与反隐身技术研究的发展。

参 考 文 献

- [1] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
HUANG P K, YIN H C, XU X J. Radar target characteristic[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.
- [2] 张居凤,冯德军,王雪松,等. 雷达目标动态 RCS 仿真研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(4):834-837.
ZHANG J F, FENG D J, WANG X S, et al. Simulation of dynamic RCS data of radar targets[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(4):834-837.
- [3] 李民权,吴先良. 飞行目标的抖动及雷达散射截面计算[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2003,26(5):1021-1024.
LI M Q, WU X L. On the random wobble of flying radar targets and the computation of radar cross section [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2003, 26(5):1021-1024.
- [4] 张海峰,苏东林,曾国奇. 复杂雷达动目标建模及动态 RCS 分析[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(5):687-688,698.
ZHANG H F, SU D L, ZENG G Q. Modeling of the complicated radar moving object and analysis of the dynamic radar cross section [J]. System Engineering and Electronics, 2006, 28(5):687-688, 698.
- [5] 苏东林,曾国奇,刘焱,等. 运动目标 RCS 特性分析[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(12):1413-1417.
SU D L, ZENG G Q, LIU Y, et al. RCS study of moving radar targets [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(12):1413-1417.
- [6] 阎照文,苏东林,袁晓梅. FEKO 5.4 电磁场分析技术与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
YAN Z W, SU D L, YUAN X M. FEKO 5.4 electromagnetic field analysis techniques and examples [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2009.
- [7] 孙金标. 高性能战斗机飞行动力学[M]. 北京:蓝天出版社,2007.
SUN J B. High performance aircraft flight dynamics [M]. Beijing: Blue Sky Press, 2007.
- [8] 周超,张小宽,张敬伟,等. 典型隐身飞机动态 RCS 时间序列研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(3):15-18.
ZHOU C, ZHANG X K, ZHANG J W, et al. Analysis of dynamic RCS time series of typical stealth aircraft [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(3):15-18.
- [9] 刘英芝,曾勇虎,汪连栋,等. 动态雷达目标仿真中目标姿态角的计算[J]. 电光与控制,2007,14(1):38-41.
LIU Y Z, ZENG Y H, WANG L D, et al. Calculation of attitude angle in dynamic radar target simulation [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(1):38-41.
- [10] 呼玮,杨建军,龙光正,等. 弹道导弹被动段动态 RCS 建模与仿真[J]. 电光与控制,2010,17(4):22-25.
HU W, YANG J J, LONG G Z, et al. Dynamic modeling and simulation of RCS for TBM's post-boost guidance phase [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(4):22-25.
- (上接第 97 页)
- [4] 董绪荣,张守信,华仲春. GPS/INS 组合导航定位及其应用[M]. 长沙:国防科学技术大学出版社,1998.
DONG X R, ZHANG S X, HUA Z C. GPS/INS integrated navigation positioning and its applications [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1998.
- [5] 许丽佳,陈阳舟,崔道远. GPS/INS 组合导航系统中的信息融合算法研究[J]. 计算机仿真,2004,21(5):20-23.
XU L J, CHEN Y Z, CUI P Y. Study on information fusion technology in GPS/INS integrated navigation system[J]. Computer Simulation, 2004, 21(5):20-23.
- [6] 边德飞. 多传感器融合导航系统性能评估算法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
BIAN D F. Performance evaluation of multi-sensor fusion navigation system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [7] HWANG D H, OH S H, LEE S J, et al. Design of a low-cost attitude determination GPS/INS integrated navigation system [J]. GPS Solutions (S1080-5370), 2005, 9(4):294-311.
- [8] 李睿佳,李荣冰,刘建业,等. 卫星/惯性组合导航事后高精度融合算法研究[J]. 系统仿真学报,2010,22(1):75-78.
LI R J, LI R B, LIU J Y, et al. Research on high precision INS/GPS integrated navigation off-line fusion algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(1):75-78.