

用于雷达回波信号实时模拟的 弹道目标 RCS 解析公式

王伟杰, 鞠智芹, 季明阳

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 对弹道目标进行满足精度要求的雷达回波实时模拟是一项综合性较强的工程,是目标探测、识别的关键。基于几何绕射理论(GTD)和物理光学法(PO),推导给出了某大型弹道目标在微波频率下任意视线角RCS解析公式。文中方法和FEKO软件的计算结果符合良好且计算速度极快,利用文中方法得到的结果进行的一维距离像仿真与理论结果吻合较好,可以满足基于目标电磁散射特征的再入大气层弹道目标雷达回波信号实时模拟的精度需要。

关键词 几何绕射理论;物理光学法;雷达截面积;弹道目标;回波模拟

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.04.010

中图分类号 TN955 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)04-0042-04

RCS Explicit Formulations of A Large Ballistic Target Used for Real Time Simulation of Radar Based on Reentry Ballistic Target Echo

WANG Weijie, JU Zhiqin, JI Mingyang

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: To meet the real-time simulation of ballistic target radar echo precision requirement is a stronger comprehensive project, it is a key to the target detection and recognition. In this paper, a calculation formula of a large ballistic target in explicit RCS arbitrary angle of sight is given under microwave frequency based on GTD and PO method. The results computed by using this method agree with that by using the FEKO software and the calculation speed is extremely high. Using the data obtained by this method to realize the High Resolution Range Profiles (HRRPs), the results of simulation and theory are in good agreement with each other, and can meet the need of real time simulation precision of radar based on reentry ballistic target echo signal of target electromagnetic scattering characteristics.

Key words: GTD; PO; RCS; ballistic target; echo simulation

对电大尺寸目标进行满足精度要求雷达回波实时模拟是高分辨雷达信号处理系统算法研究中的重要环节,是一项综合性较强的工程,涉及到电磁计算,回波模拟和信号处理等多方面内容。其对弹道

导弹防御系统及时探测、发现目标并做出准确及时反应具有重要意义^[1]。文献[2]通过调用静态散射场数据库实现对弹道目标宽带回波的仿真。文献[3~4]采用矩量法模拟了进动目标的微多普勒运动回

收稿日期: 2014-12-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61372033);航空科学基金资助项目(20130196005)

作者简介: 王伟杰(1989-),男,山西太原人,硕士生,主要从事目标与环境电磁散射特性研究.E-mail:1747439168@qq.com

引用格式: 王伟杰,鞠智芹,季明阳.用于雷达回波信号实时模拟的弹道目标 RCS 解析公式[J].空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(4):42-45. WANG Weijie, JU Zhiqin, JI Mingyang. RCS Explicit Formulations of A Large Ballistic Target Used for Real Time Simulation of Radar Based on Reentry Ballistic Target Echo[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(4): 42-45.

波模型,并分析了自旋、锥旋对目标为多普勒特性的影响。文献[5]将弹跳射线法和等效边缘电磁流法与信号处理相结合,计算了复杂目标宽带雷达回波信号。然而,上述方法在模拟电大尺寸目标回波时,散射场计算所需的计算机内存和计算量非常大,对计算机硬件和编程提出了很高的要求,无法实现雷达回波信号的实时模拟。

某再入大气层弹道目标(以下简称弹道目标)的轴长在数 m 以上,在高频波段属于复杂电大尺寸目标。鉴于弹道目标上的一些主要部件(如除弹翼外部分)是规则的几何不连续部分,可以考虑用 GTD 得到其 RCS;弹翼上起主要散射作用的多边形面可以用 PO 得到其 RCS。带翼弹道目标的 RCS 可以用部件合成法得到。

1 理论推导

1.1 弹道目标模型

图 1 是某再入大气层弹道目标模型的结构图。在本文中,弹体直径 $2a_1$ 为 1 m,弹体长度 $h_3 + h_5$ 为 2.7 m。在微波波段,这是一个电大尺寸复杂目标。

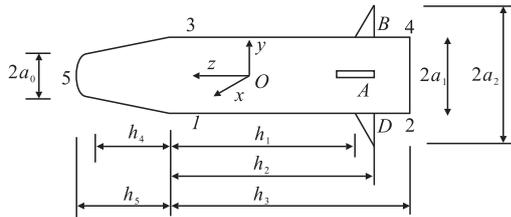


图 1 弹道目标几何模型

Fig.1 The geometry model for target trajectory

应用高频近似方法,图 1 所示的带翼弹头远场后向 RCS 为:

$$\sigma = \left| \sum_{i=1}^5 \sqrt{\sigma_i} e^{j\psi_i} + \sqrt{\sigma_A} e^{j\psi_A} + \sqrt{\sigma_B} e^{j\psi_B} + \sqrt{\sigma_C} e^{j\psi_C} + \sqrt{\sigma_D} e^{j\psi_D} \right|^2 \quad (1)$$

式中: σ_i 为第 i 个绕射点的后向 RCS; σ_A 、 σ_B 、 σ_C 、 σ_D 分别为弹翼 A、B、C、D 的后向 RCS。

该弹道目标在中段飞行过程中受到横向冲量矩的作用以进动形式飞行。

1.2 弹道目标电大光滑部分基于 PO 的 RCS 解析公式

根据雷达目标散射截面 RCS 的定义,可得^[6]:

$$\sqrt{\sigma} = -j \frac{k}{\sqrt{\pi}} \int_S \mathbf{n} (\mathbf{e}_r \times \mathbf{h}_i) e^{jk \mathbf{r} \cdot (\mathbf{i} - \mathbf{s})} dS \quad (2)$$

式中: k 为波数; \mathbf{e}_r 为接收器极化方向; \mathbf{n} 为目标表面单位法向矢量; \mathbf{h}_i 为单位入射磁场; \mathbf{r} 为接收距

离矢量; \mathbf{i} 为入射方向; \mathbf{s} 为散射方向; S 为目标表面照明部分。

对于长、宽分别为 a 和 b ,高为 h 的任意直角三角形纯导体平板弹翼 A,本地坐标系下 $z > 0$ 的空间,本文推导出了简洁的 RCS 解析计算公式:

$$\sigma_A = \frac{\cot^2 \theta \csc^2 \theta}{16k^2 \pi (b \cos \varphi - a \sin \varphi)^2} ((b - b \cos(2ak \sin \theta \sin \varphi)) \csc \varphi + a(-1 + \cos(2bk \sin \theta \cos \varphi)) \sec^2 \varphi + (a \sec \varphi \sin(2bk \sin \theta \cos \varphi) - b \csc \varphi \sin(2ak \sin \theta \sin \varphi))^2) \quad (3)$$

图 1 所示的其他 3 个弹翼 B、C、D,在各自的本地坐标系下,其 RCS 解析计算公式同弹翼 A。

将式(3)及其他 3 个弹翼 B、C、D 的 RCS 计算公式应用于式(1),还需将 A、B、C、D 4 个弹翼的本地坐标系转换为图 1 中的目标本体坐标系^[7]。

1.3 弹道目标几何不连续部分基于 GTD 的 RCS 解析公式

由文献^[8],弹体边缘绕射场为:

$$\vec{E}_d(s_d) = \vec{D} \vec{E}_i(Q_E) A(s_d) e^{-jk s_d} \quad (4)$$

$$\vec{D} = -\beta_i \beta_d D_s - \varphi_i \varphi_d D_h \quad (5)$$

$$D_{h,s} = \frac{e^{-j\pi/4} \sin \frac{\pi}{n}}{n \sqrt{2\pi k} \sin \beta_0} \left[\frac{1}{\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\varphi_d - \varphi_i}{n}} \mp \frac{1}{\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{\varphi_d + \varphi_i}{n}} \right] \quad (6)$$

式中: \vec{D} 称为并矢绕射系数; D_s 、 D_h 称为标量绕射系数,其中, D_s 为满足狄里希利边界条件的绕射系数, D_h 为满足诺依曼条件的绕射系数。

由 RCS 的定义可得^[9]图 1 中的 5 个边缘绕射点的远场 $\sqrt{\sigma_i}$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) 为:

$$\sqrt{\sigma_1} = \frac{\sin \frac{\pi}{n_1}}{n_1} \sqrt{\frac{a-a_1}{k \sin \theta}} [(\cos \frac{\pi}{n_1} - 1)^{-1} \mp (\cos \frac{\pi}{n_1} - \cos \frac{2(\pi-\theta)}{n_1})^{-1}], \theta \leq \pi - \arcsin \frac{1}{k(a-a_1)} \quad (7)$$

$$\sqrt{\sigma_2} = \frac{2 \sin \frac{2\pi}{3}}{3} \sqrt{\frac{a-a_1}{k \sin \theta}} [(\cos \frac{2\pi}{3} - 1)^{-1} \mp (\cos \frac{2\pi}{3} - \cos \frac{4\theta}{3})^{-1}], \theta \geq \arcsin \frac{1}{k(a-a_1)} \quad (8)$$

$$\sqrt{\sigma_3} = \begin{cases} \frac{\sin \frac{\pi}{n_1}}{n_1} \sqrt{\frac{a-a_1}{k \sin \theta}} [(\cos \frac{\pi}{n_1} - 1)^{-1} \mp (\cos \frac{\pi}{n_1} - \cos \frac{2(\pi+\theta)}{n_1})^{-1}] & , \theta \leq \gamma \\ 0 & , \theta > \gamma \end{cases} \quad (9)$$

$$\sqrt{\sigma_4} = \begin{cases} \frac{2\sin \frac{2\pi}{3}}{3} \sqrt{\frac{a-a_1}{k \sin \theta}} \left[\left(\cos \frac{2\pi}{3} - 1 \right)^{-1} \mp \right. \\ \left. \left(\cos \frac{2\pi}{3} - \cos \frac{4\theta - 2\pi}{3} \right)^{-1} \right], & \theta \geq \pi/2 \\ 0, & \theta < \pi/2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\sqrt{\sigma_5} = \begin{cases} \sqrt{\pi b} \left\{ 1 - \frac{\sin[2kb(1-\sin\gamma)]}{kb \cos^2 \gamma} \right\}^{\frac{1}{2}}, & \theta = 0 \\ \sqrt{\pi b}, & 0 < \theta < \pi/2 - \gamma \\ 0, & \theta \geq \pi/2 - \gamma \end{cases} \quad (11)$$

式中: $n_1 = 1 + \gamma/\pi$ 。

图1中5个边缘绝射点的相位分别为:

$$\psi_1 = \pi/4 - 2k[(a-a_1)\sin\theta + \frac{h}{2}\cos\theta]$$

$$\psi_2 = \pi/4 - 2k[(a-a_1)\sin\theta - \frac{h}{2}\cos\theta]$$

$$\psi_3 = -\pi/4 + 2k[(a-a_1)\sin\theta - \frac{h}{2}\cos\theta]$$

$$\psi_4 = -\pi/4 + 2k[(a-a_1)\sin\theta + \frac{h}{2}\cos\theta]$$

$$\psi_5 = 2k\{[(a-a_1)\cot\gamma - b/\sin\gamma]\cos\theta + b + h\cos\theta/2\}$$

在一些特别的视线角下,式(7~11)需修正。

在 $\theta = \pi$ 附近,

$$\sqrt{\sigma_2} e^{i\psi_2} + \sqrt{\sigma_4} e^{i\psi_4} = 2\sqrt{\pi} k(a-a_1)^2$$

$$\frac{J_1(2k(a-a_1)\sin\theta)}{2k(a-a_1)\sin\theta} e^{-j\pi/2+jkh\cos\theta} \quad (12)$$

$$\text{平滑范围: } \pi - \theta_{ca} \leq \theta \leq \pi, 2k(a-a_1)\sin\theta_{ca} = 2.44$$

在 $\theta = \pi/2$ 附近,

$$\sqrt{\sigma_1} e^{i\psi_1} + \sqrt{\sigma_2} e^{i\psi_2} = -\sqrt{(a-a_1)kh} \frac{\sin(kh\cos\theta)}{kh\cos\theta} e^{j3\pi/4-j2k(a-a_1)\sin\theta} \quad (13)$$

$$\text{平滑范围: } \theta_{ca} \leq \theta \leq \pi/2, kh\cos\theta_{ca} = 2.25$$

在鼻锥方向 $\theta = 0$ 及其附近入射时:

$$\sqrt{\sigma_1} e^{i\psi_1} + \sqrt{\sigma_3} e^{i\psi_3} = \frac{2\sqrt{\pi}(a-a_1)\sin \frac{\pi}{n_1}}{n_1} \left[\left(\cos \frac{\pi}{n_1} - \cos \frac{2\pi}{n_1} \right)^{-1} J_0(2k(a-a_1)\sin\theta) - \frac{j \frac{2\tan\theta}{n_1} \sin \frac{2\pi}{n_1}}{\left(\cos \frac{\pi}{n_1} - \cos \frac{2\pi}{n_1} \right)^2} J_1(2k(a-a_1)\sin\theta) \pm \left(\cos \frac{\pi}{n_1} - 1 \right)^{-1} J_2(2k(a-a_1)\sin\theta) e^{-jk h \cos\theta} \right] \quad (14)$$

平滑范围: $0 \leq \theta \leq \gamma$

1.4 弹道目标进动下弹翼遮挡判断

由于弹道目标弹体和弹翼之间存在遮挡效应,电磁波不能同时对全部弹翼产生照射作用,根据物理光学法中凸曲面驻像点自身遮挡效应的判断方法,即判断散射点处雷达视线方向 \mathbf{k}_i 与弹翼所在面元法向量 \mathbf{n} 的内积是否为负,如果 $\mathbf{k}_i \cdot \mathbf{n} < 0$,那么弹翼被雷达波照射,否则弹翼被弹体遮挡。

2 数值结果

为验证本文提出的弹道目标全空域、全频域 RCS 解析公式的有效性和正确性,将本文计算结果与 FEKO 进行了对比研究,并利用本文计算结果对进动弹道目标进行了一维距离像序列仿真。

计算平台:联想 P4, CPU E5200 主频 2.50 GHz,内存 2 GB。

2.1 无翼弹道目标的 RCS 计算

主要考察 1.3 节解析公式的有效性和正确性。图1的弹道目标,在无弹翼 A、B、C、D 的情况下,用本文方法和 FEKO 软件在频率 $f = 10$ GHz 时,分别计算过 z 轴任意 φ 平面的 $\sigma(\theta)$ 曲线,见图2。

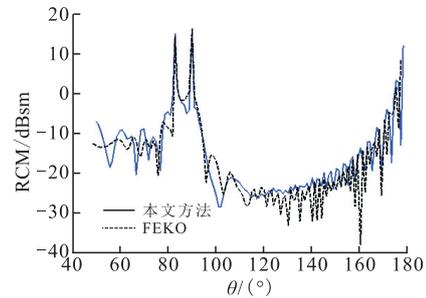


图2 无弹翼弹道目标 RCS 计算结果

Fig.2 Wingless ballistic target RCS calculation

2.2 带翼弹道目标的 RCS 计算和一维距离像序列仿真

图1所示的弹道目标,分别用本文方法和 FEKO 软件计算在频率 $f = 10$ GHz 时,过 z 轴 $\varphi = 45^\circ$ 平面的 $\sigma(\theta)$ 曲线,见图3。

用本文方法算得的数据对图1中的弹道目标的一维距离像序列进行仿真^[10],雷达发射信号为 LFM 信号,自旋角速度 $\omega_z = 4 \pi \text{ rad/s}$,锥旋角速度 $\omega_0 = 2 \pi \text{ rad/s}$,进动角 $\theta = 6^\circ$ 。结果见图4。

由图2、图3对比可见,图1所示的弹道目标的弹翼对 RCS 的贡献较小。因此,计算弹翼对弹道目标 RCS 的贡献时,只需考虑弹翼的三角形导体表面 PO 场即可,不必计及弹翼棱边的 GTD 场对 RCS 的贡献。

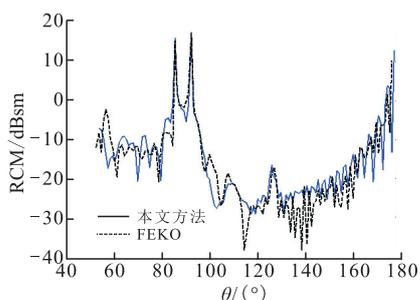


图3 弹道目标 RCS 计算结果

Fig.3 The calculation results of ballistic target RCS

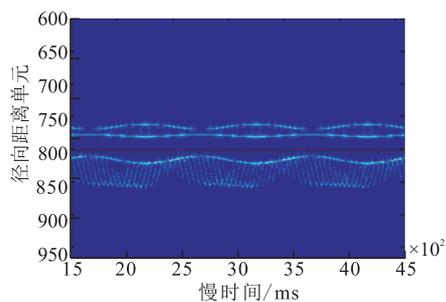


图4 弹道目标一维距离像序列

Fig.4 HRRPs for ballistic target

在高频区,入射波长远小于物体尺寸,散射变成了局部效应,个散射单元独立散射能量,而与其他部分无关。这样就大大简化了感应场的计算和表面电流的积分。此外,与 SBR、PO 等高频方法相比,本文采用了 GTD 理论计算弹体 RCS,节省了射线追踪和面积积分的过程,在微波波段计算全空域 RCS 分布瞬间即可完成。实验结果表明,使用本文方法在 Matlab 上完成图 3 仅用时 0.056 s,而 FEKO 商业软件采用高频计算方法用时 59 min。2 种方法计算时间相差巨大,但计算结果符合良好。从图 4 可以看出,由于弹道目标的姿态变化,导致目标的雷达视线角发生改变,散射点模型产生了变化。对于绕射机理所产生的散射点,其移动只和进动有关,所以它的变化曲线基本上是按照进动周期在移动;对于弹翼散射,由于弹体自旋和自旋引起的遮挡对回波影响,所以弹翼的一维距离像序列移动更快,而且出现周期性的消失现象,与理论结果基本相符。因此,本文所推导出的弹道目标解析公式基本满足了雷达回波实时计算的精度和时间要求。

3 结语

本文基于几何绕射理论和物理光学法,推导出了弹道目标全解析 RCS 计算公式。在微波 $f = 10$ GHz 时,将本文方法和 FEKO 软件的计算结果进行了对比,并利用本文计算结果对图 1 所示的弹道目标进行了一维距离像序列仿真。本文方法和 FE-

KO 软件的计算结果符合良好;本文方法计算速度极快,在微波波段计算全空域一个平面的 RCS 分布只需 0.056 s;利用本文方法所得数据成的一维距离像序列与理论分析结果基本吻合,可以满足基于目标电磁散射特征的再入大气层弹道目标雷达回波信号实时模拟的需要。

参考文献(References):

- [1] 王胜. 动态目标雷达回波实时模拟技术及应用[D].长沙:国防科学技术大学,2011.
WANG Sheng. Moving Target Radar Echo Real-Time Simulation: Technologies and Application[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)
- [2] 姚汉英,李星星,孙文峰. 基于电磁散射数据的弹道目标宽带回波仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 599-611.
YAO Hanying, LI Xingxing, SUN Wenfeng. Wideband Echo Simulation of Ballistic Targets Based on Electromagnetic Scattering Data[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 599-611. (in Chinese)
- [3] Chen V C. Doppler Signatures of Radar Backscattering from Objects with Micro-motions[J]. IET Signal Processing, 2008, 2(3): 291-300.
- [4] Chen V C, Lin C, Pala W P. Time-varying Doppler Analysis of Electromagnetic Backscattering from Rotating object[C]// IEEE Radar Conference. Shanghai: IEEE Press, 2006: 807-812.
- [5] 王海彬. 基于高频电磁散射理论的大电复杂目标宽带雷达回波快速计算方法[J]. 电子学报, 2010, 38(3): 561-566.
WANG Haibin. A Fast High Frequency Algorithm for Predicting Wide Band Radar Signal of Large Complex Targets[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(3): 561-566. (in Chinese)
- [6] 曲婧华,何广军,张晨新,等. 超宽带雷达引信电磁散射特性[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2014, 15(3): 53-56.
QU Jinghua, HE Guangjun, ZHANG Chenxin, et al. Research on the Ultra Wide Band Radar Fuse Electromagnetic Scattering Characteristic[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2014, 15(3): 53-56. (in Chinese)
- [7] 金光虎. 中段弹道目标 ISAR 成像及物理特性反演技术研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
JIN Guanghu. Research on ISAR Imaging and Physical Feature Extraction of Midcourse Ballistic Target[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [8] 彭鹏,童创明,孙佳佳. 弹道导弹助推段动态 RCS 特征仿真[J]. 空军工程大学学报:自然科学版, 2013, 14(5): 44-47.
PENG Peng, TONG Chuangming, SUN Jiajia. A Simulating Study of BM's Dynamic RCS Characteristics in Flight Boost Phase[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(5): 44-47. (in Chinese)
- [9] Knott E F al. Radar Cross Section[M]. MA: Artech House Inc, 1985.
- [10] Victor C Chen. The Micro-Doppler in Radar[M]. London: Artech House, 2011.

(编辑:徐楠楠)