

光电/红外侦察卫星目标散射特性提取研究

龚俊斌, 丁凡

(中国舰船研究设计中心, 湖北 武汉 430064)

摘要: 卫星雷达波散射特征是对其进行监测、识别及打击的重要依据, 其特征控制同时也是卫星总体设计的重要内容。针对光电传感器侦察卫星的载荷搭载特点和面临的威胁, 确定侦察卫星构型约束条件, 分析卫星散射结构组成, 对不同雷达波散射特性仿真方法进行分析, 提出红外侦察卫星结构的 RCS 仿真方法。以美国 DSP 卫星为例, 对卫星结构剖分, 构建电磁仿真模型, 采用射线追踪法、物理光学近似法及等效边缘电流法, 对 DSP 卫星进行目标散射特性提取, 从入射频率、极化形式等方面分析散射特点, 提出光电侦察卫星的散射亮点部位及隐身改进建议, 可用于对光电侦察类卫星的监测、识别及打击和指导该类卫星雷达波隐身总体设计。

关键词: 雷达波散射截面; 物理光学法; 光电侦察卫星目标; 散射结构

中图分类号: TN973.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201745.0417006

Extracting scattering characteristic from photoelectric/IR reconnaissance satellites targets

Gong Junbin, Ding Fan

(China Ship Development and Design Center, Wuhan 430064, China)

Abstract: Satellites targets scattering characteristics is the basis of the monitoring, identification and striking for the military objectives, the scattering characteristic controlling is also the important part of system design for satellites. Firstly, the boundary conditions of photoelectric reconnaissance satellites configuration was determined, based on the threat of satellites facing and the load characteristics of satellites loading, the composition and character of the complicated satellites' scattering construction were analyzed. The scattering characteristic of typical satellites target was simulated by SBR method, PO method and EEC method on different frequency and angle. The Defense Support Program was taken as an example to build the structure mesh model, electromagnetic simulation model. Based on the scattering simulation conclusion of DSP model for frequency, polarity and incidence angle, the scattering characteristic of photoelectric/IR reconnaissance satellites targets was extracted. The scattering highlights and stealth improvement suggestions were given, which could be used to guide the target detection and stealth design for satellites targets.

Key words: radar wave scattering cross section; PO method; photoelectric reconnaissance satellites targets; scattering construction

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-03

基金项目: 海装预研基金

作者简介: 龚俊斌(1978-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事图像处理、计算机视觉应用、飞行器精确导航技术方面的研究。

Email: gongjunbin@foxmail.com

0 引言

航天技术迅速发展,太空成为新的战场,空间对抗重要性日益提高,航天飞行器的生存能力成为掌握太空赢得信息战争的关键,掌握卫星隐身技术尤为重要,通过降低卫星的雷达波、红外、可见光等物理场的目标特性,可以降低敌方发现概率及探测距离,提升自身防御能力。美国、欧洲、日本及俄罗斯等发达国家均将隐身技术及航天技术列为国防高技术。美国早在 1963 年就提出隐身卫星研究技术,其 Misty-1、Misty-2 卫星均为隐身卫星。俄罗斯及其他航天强国均在研制隐身卫星^[1]。国内南京航空航天大学对微小卫星从外形设计方面开展过相关研究^[2]。以美国预警卫星系统国防支援计划 (Defense Support Program, DSP) 卫星为代表的大型光电侦察卫星,用于弹道导弹防御,实现预警、信息保障,对精度、灵敏度及载荷提出更高要求,与以科学技术试验为用途的微小卫星相比,具有独有的目标特性。国内针对类似卫星尚未开展散射特性研究。

卫星面临的探测威胁主要有雷达波和光学两种^[3],其中雷达波散射特性是对敌作战的基础。侦察卫星通常搭载射频或光电传感器,文中分析光电传感器卫星的雷达波散射结构组成及特点,提出此类卫星结构的 RCS 仿真方法。以 DSP 卫星结构模型为例,利用 PO 算法计算卫星目标镜面散射,利用 SBR 法计算多次散射,利用 EEC 法计算边缘散射,对不同频率及姿态下散射特性进行分析。

1 卫星目标面临的威胁

太空站情况下卫星面对的硬摧毁威胁主要为^[3]:一是敌方定向武器攻击;二是高能辐射、电磁脉冲等攻击。软杀伤威胁主要为电子对抗、网络对抗。针对两种攻击模型,主要采用技术隐身、战术隐身及技术防护等模式进行防护。一是通过信号管制、藏匿、规避等方式;二是通过电子对抗隐身技术对卫星进行构型、材料隐身设计,减少卫星的目标特性;三是提高电子对抗能力。通过上述措施实现敌方难以发现,发现后难以击中。

雷达波散射截面是用来表征雷达目标对电磁波散射能力的物理量,通常采用 RCS 表征^[4]:

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

式中: S_i 、 S_s 为入射电场和散射电场的功率密度; E_i 、 H_i 为入射电场和入射磁场; E_s 、 H_s 为散射电场和散射磁场; R 为目标到雷达天线的距离。

2 卫星目标雷达波散射特性

卫星构型通常姿态控制方法:自旋稳定卫星通常采用球形、方形、圆柱体或多面柱体;重力梯度稳定卫星需要通过加载杆状物使卫星结构形成足够重力梯度力矩;三轴稳定卫星形式相对多样。卫星还有太阳能电池板等框架结构。以 DSP 卫星为例,DSP 卫星采取抗激光致盲技术,由红外望远镜、传感器、探测器、星敏感器、仪器舱、星体、太阳能面板组成,如图 1 所示^[5]。

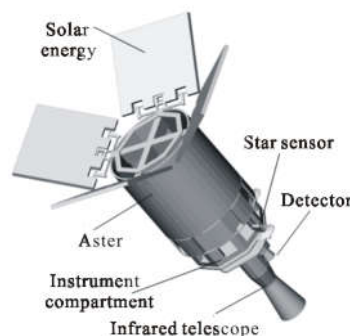


图 1 DSP 卫星结构示意图

Fig.1 Sketch map of DSP satellites structure

以射频传感器为主的侦察卫星通常为有源体制,采用放大和变频功能转发器转发无线信号,其散射贡献主要以电磁类设备散射为主。以光电传感器为主的侦察卫星通常利用可见光、红外线进行照相或者连续影像录制,主要通过光电相机进行侦察和识别。光电侦察卫星因未携带大型传感器,其散射贡献不同于射频传感器探测卫星,其雷达波物理特征主要由以下五类散射构成,如图 2 所示^[6]:一是镜面散射,主要由卫星目标的各散射体结构外表面贡献,如太阳能面板、星体外表面;二是边缘散射,主要由卫星边缘等表面不连续造成的,多面体卫星的棱边、圆柱体卫星底部边缘都会造成边缘散射,如星体底面、望远镜底面;三是多次散射,主要是由于卫星结

构及其附属结构自身或相互之间造成的直接或间接的角反射体结构造成,如太阳能面板与星体构成的间接二面角、星体自身的腔体;四是行波散射,由卫星的鞭状、杆状附属结构造成的,如星敏感器柱状支撑结构;五是爬行波散射,主要由于球体、圆柱体或者曲面结构的卫星形式造成,如星体。射频传感器在结构散射的同时,作为辐射器还会造成二次辐射,以其为载荷的卫星,散射贡献除上述五类外,还有电磁散射贡献。

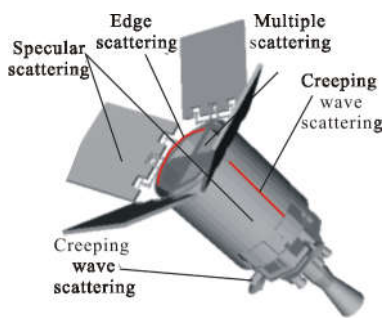


图 2 DSP 卫星散射示意图

Fig.2 Sketch map of DSP satellites scattering DSP

3 计算分析方法

3.1 物理光学近似法

物理光学法是计算大尺寸复杂目标的有效方法,通过对目标表面感应场积分近似求散射场^[7-9]。根据高频场局部性原理,忽略目标表面不同感应电流之间的相互作用。假设入射电磁波照射到封闭表面,即目标表面被照明部分,其观测点 P 处的总场可以表示为入射场和散射场之和。根据物理光学法,目标某一面元上的电磁场是入射到其上的场和按几何光学定律从面元反射出的场的向量和:

$$E_s^{PO}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{jk}{4\pi r} \int_s \hat{\mathbf{s}} \times (M_s(\mathbf{r}') + Z_0 \hat{\mathbf{s}} \times J_s(\mathbf{r}')) \times \exp[jk\mathbf{r}' \times (\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{i}})] ds' \quad (2)$$

式中: $k = \omega/\lambda$ 为自由空间波数; $M_s(\mathbf{r}')$ 为磁流密度; Z_0 为自由空间波阻抗; $J_s(\mathbf{r}')$ 为表面感应电流密度; $\hat{\mathbf{i}}$ 和 $\hat{\mathbf{s}}$ 分别为入射方向和散射方向的单位矢量; s 表示目标表面的照明部分。

3.2 射线追踪法

射线追踪法基于几何光学原理,将入射的均匀平面波划分为密集的射线管,高频电磁波的能量沿

着细长射线管传播,每个射线管在腔体内经多次反射,最终返回口径处。射线经 n 次反射并积分后等到总的散射远场为:

$$E_s^{SBR}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r} \sum_{i=1}^n \int_{\Delta A} Z_0 \hat{\mathbf{s}} \times \hat{\mathbf{s}} \times M_s(\mathbf{r}') + \hat{\mathbf{s}} \times J_s(\mathbf{r}') \times \exp[jk\mathbf{r}' \times (\hat{\mathbf{s}} - \hat{\mathbf{i}})] ds' \quad (3)$$

式中: ΔA 为第 i 个射线管在积分面上的投影面积。

3.3 等效边缘电流法

边缘的 EEC 绕射场可表示为:

$$E_d^{EEC}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{jk e^{-jkr}}{4\pi r} \int_C [Z_0 \hat{\mathbf{s}} \times (\hat{\mathbf{s}} \times \hat{\mathbf{i}}) I^l(\mathbf{r}', \omega) + \hat{\mathbf{s}} \times \hat{\mathbf{i}} M^l(\mathbf{r}', \omega)] e^{jk \hat{\mathbf{s}} \cdot \mathbf{r}'} dl' \quad (4)$$

式中: $E_d^{EEC}(\mathbf{r}, \omega)$ 为 \mathbf{r} 处的 EEC 绕射电场; $\hat{\mathbf{i}}$ 为边缘 C 的正方向; \mathbf{r}' 为边缘积分点位置矢量; dl 为边缘沿 C 的弧长增量。

从第 2 节对红外成像侦察卫星散射贡献组成可以看出,红外成像侦察卫星^[10-12]的散射特性主要由其结构特点造成的,物理光学近似法、射线追踪法及等效边缘电流法基本覆盖了此类卫星的散射特性。

4 计算实例与结果分析

4.1 典型卫星目标 RCS 模型

选用 Rhinoceros 构建数字模型,采用通用有限元网格处理软件 Hypermesh 对数字模型进行网格剖分,选用三角面元进行非均匀网格剖分,生成电磁计算的网格模型见图 3。为保证隐身性能,红外望远镜表面渡有金属导电膜,保证表面的电连续性,仿真中将整个卫星当作金属处理。

选取典型频点 10 GHz、VV 极化、 0° 入射角,对



图 3 典型卫星电磁模型

Fig.3 Typical satellites electromagnetic model

红外成像侦察卫星目标的散射特性进行 RCS 仿真分析。如图 4 所示。

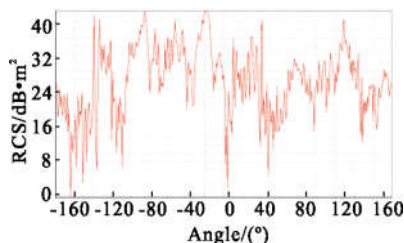


图 4 典型卫星目标 RCS 随入射频率及极化变化趋势

Fig.4 Typical satellites RCS vs incidence frequency and polar

其中水平坐标为角度坐标，垂直坐标为幅度值，由图 4 可以看出，卫星目标在方位角 $-140^{\circ}\sim-20^{\circ}$ 角域范围存在较大的散射量值，在 $120^{\circ}\sim140^{\circ}$ 角域散射量值也较大，采用射线追踪法，定位对上述角域的散射亮点，颜色变化趋势表征能量大小分布，颜色较深区域为能量较强的位置，散射亮点分布图见图 5。

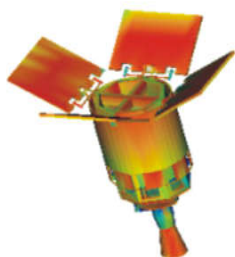


图 5 典型卫星目标散射亮点 10 GHz、VV 极化、 0° 入射角、 -80° 方位角

Fig.5 Typical satellites scattering highlights 10 GHz, VV polarity, 0° incidence angle, -80° azimuth angle

由图 5 可以看出， -80° 角域的散射峰值主要为卫星顶部的红外望远镜镜面散射及顶部仪器舱凹陷的多次散射构成的。可以看出传统设计中对外红外望远镜的镀导电膜处理并没有减缩出红外成像侦察卫星的散射特征，红外望远镜由于其较大的物理尺度，在典型角域形成较大的镜面散射。另一方面，由于仪器舱形成的凹陷结构，造成电磁波多次散射，对整体隐身性能产生破坏。

选用 2~40 GHz (步长为 1 GHz) 频点， 0° 入射角情况进行 RCS 仿真。该卫星沿中轴与 Z 轴呈 60° 夹角。仿真计算中未考虑天线带来的电磁散射影响。对该卫星目标的散射特征进行统计，从入射频率和

极化形式两个方面对其特性进行分析。对 $0^{\circ}\sim360^{\circ}$ 的 RCS 仿真数据进行统计分析，变化趋势见图 6，各频点对应散射量值见表 1。

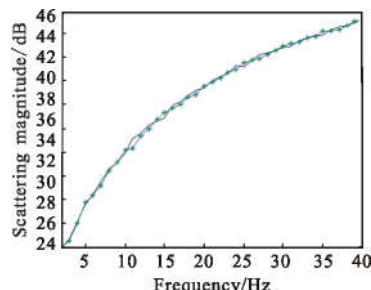


图 6 典型卫星目标 RCS 随入射频率及极化变化趋势

(实线为 VV 极化,* 为 HH 极化)

Fig.6 Typical satellites RCS vs incident frequency and polarity(solid line is -VV polarity,* is HH polarity)

表 1 典型卫星目标 RCS 随频率变化量值

Tab.1 Typical satellites RCS with frequency varying

Frequency/GHz	Polarity		Frequency/GHz	Polarity	
	VV	HH		VV	HH
40	45.14	45.33	20	39.42	39.51
39	44.89	45.04	19	39.21	38.88
38	44.67	44.73	18	38.74	38.65
37	44.64	44.42	17	38.24	38.04
36	44.35	44.21	16	37.92	37.66
35	43.94	44.23	15	36.91	37.29
34	43.84	43.74	14	36.70	36.73
33	43.68	43.69	13	36.34	36.00
32	43.37	43.30	12	35.54	35.40
31	42.97	43.22	11	35.16	34.42
30	42.82	42.99	10	33.98	34.19
29	42.61	42.59	9	33.15	33.23
28	42.39	42.27	8	32.57	32.51
27	42.23	41.86	7	31.57	31.18
26	41.77	41.78	6	30.34	30.41
25	41.19	41.55	5	29.72	29.81
24	41.28	40.97	4	28.17	28.06
23	40.65	40.71	3	26.68	26.48
22	40.33	40.27	2	26.04	26.06
21	40.08	39.89	-	-	-

由图 6 可以看出, 该为卫星目标随入射频率的增加, RCS 散射量值呈递增趋势; 相同频点下垂直极化的散射量值略小于水平极化。对该卫星目标探测, 水平极化的探测方式要优于垂直极化。

对 2~40 GHz 的卫星 RCS 方向图, 按照能量分布、极坐标为频率, 颜色表征能量大小, 得到随着频率增加, 卫星 RCS 能量变化趋势见图 7, 分析如下。

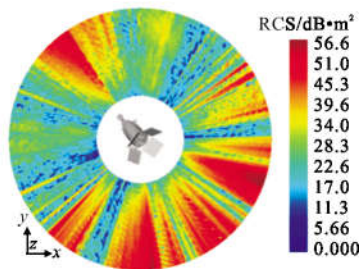


图 7 2~40 GHz、VV 极化、0°入射角时, 卫星 RCS 方向图

Fig.7 RCS of satellites (2~40 GHz, VV polarization, 0° incidence angle)

由图 7 可以看出, 垂直极化入射时, 该卫星在卫星顶部的尖凸区域存在较大的散射量值, 该部分的贡献主要是由于红外望远镜结构构成的二面角效应造成, -135°~45°区域间存在多个散射量值集中区域, 该部分贡献主要是由于卫星顶部仪器舱凹腔构成多次散射效应造成。红外成像侦察卫星在隐身设计时, 需要重点针对红外望远镜的构型进行整形, 另一方面还需要对顶部仪器舱凹腔结构进行遮蔽, 避免在多个角域范围上造成强散射。同理, 得到水平极化的能量变化图 8。

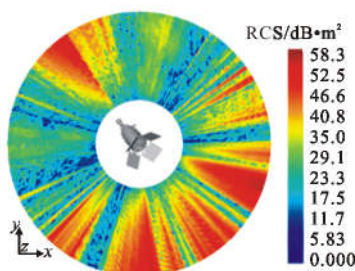


图 8 2~40 GHz、HH 极化、0°入射角时, 卫星 RCS 方向图

Fig.8 RCS of satellites(2~40 GHz, HH polarization, 0° incidence angle)

图 8 可以看出, 水平极化与垂直极化变化趋势基本一直。

5 结论

以典型卫星目标为例, 进行散射特性提取仿真, 通过采用 PO 算法、SBR 算法、EEC 算法, 选取典型频点及极化形式, 计算该类目标的雷达波散射特性, 可用于指导红外成像侦察卫星目标的散射特性提取。文中通过对典型角域进行散射亮点定位, 发现卫星红外望远镜、卫星顶部仪器舱凹腔破坏了卫星的整体隐身性, 上述结论可用于指导同类卫星的雷达波隐身性设计。

参考文献:

- [1] Kang Kaihua. Study on abroad stealthy satellite [J]. *Space International*, 2014(1): 36-40. (in Chinese)
康开华. 国外隐身卫星技术研究 [J]. 国际太空, 2014(1): 36-40.
- [2] Liu Bin, Zhang Xiang, Zhou Jianjiang, et al. A shape design scheme for radar-stealth minisatellite [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32 (12): 2628-2634. (in Chinese)
刘斌, 张翔, 周建江, 等. 一种可实现雷达隐身的微小卫星外形设计[J]. 宇航学报, 2011, 32(12): 2628-2634.(in Chinese)
- [3] Wang Caiyun, Liao Wenhe. Development status and application in space attack-defense of stealthy satellite [J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2011, 27(4): 17-19. (in Chinese)
王彩云, 廖文和. 隐身卫星的现状及其在空间攻防中的应用[J]. 航天电子对抗, 2011, 27(4): 17-19.
- [4] Rao Peng, Wang Chengliang. Optics simulation of the payload of U.S Defense Support Program (DSP) Satellites [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12 (5): 83-86. (in Chinese)
饶鹏, 王成良. 美国国防支援计划预警卫星红外有效载荷的光学仿真[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(5): 83-86.
- [5] Ding Lufei, Gen Fulu. Principles of Radar [M]. Xi'an: Xidian Press, 2006. (in Chinese)
丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.
- [6] Zhang Sen. Research of scattering characteristics and recognition method for satellite targets [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [7] Liu Jia, Qu Shenfeng, Wang Baofa. Multiple scattering RCS computation of complex targets on GRECO [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010,

- 36(5): 614–616. (in Chinese)
刘佳,渠慎丰,王宝发.基于 GRECO 的复杂目标多次散射 RCS 计算[J].北京航空航天大学学报,2010,36(5): 614–616.
- [8] Li Jie, Guo Lixin, He Qiong, et al. Accurate geometry modeling in analysis of composite EM scattering [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 39 (6): 92–98. (in Chinese)
李杰,郭立新,何琼,等.复合电磁散射分析中的精确几何建模[J].西安电子科技大学学报(自然科学版),2012,39(6): 92–98.
- [9] Huang Peikang, Yin Hongcheng, Xu Xiaojian. Radar Target Feature [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005: 30–60. (in Chinese)
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: 30–60.
- [10] Han Yuge, Xuan Yimin. Infrared feature of the satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34 (1): 34–37. (in Chinese)
韩玉阁,宣益民.卫星的红外辐射特征研究 [J].红外与激光工程 2005, 34(1): 34–37.
- [11] Wang Hongyuan, Chen Yun. Modeling and simulation of infrared dynamic characteristics of space-based space targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 45 (5): 11–17. (in Chinese)
汪洪源,陈贇.天基空间目标红外动态辐射特性建模与仿真[J].红外与激光工程,2005,45(5): 11–17.
- [12] Yang Fan, Xuan Yimin, Han Yuge. Infrared characteristics of spacecraft undulating surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 18–24. (in Chinese)
杨帆,宣益民,韩玉阁.航天器起伏表面的红外辐射特性 [J].红外与激光工程,2016,45(5): 18–24.