

曲靖非相干散射雷达在 空间碎片探测中的应用

金 旺^{1,2,3}, 杨玉峰⁴, 李清亮², 赵 有³, 吴 健²

(1. 中国电波传播研究所昆明站, 云南曲靖 655333; 2. 电波环境特性及模化技术国家重点实验室, 山东青岛 266107;
3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012; 4. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西西安 710048)

摘 要: 目前, 空间碎片探测方面的研究越来越受重视, 曲靖非相干散射雷达的建成进一步加快了我国空间碎片探测的步伐. 本文基于曲靖非相干散射雷达基本特性, 首先利用 Mie 理论研究了 498MHz、500MHz 和 502MHz 三个频率理想球形目标的散射特性并进行了分析, 结果表明目标大部分散射能量分布在前向及其附近方向; 然后以编目为 14209 的空间碎片为例, 通过该雷达的探测得到其后向雷达散射截面(RCS)为 0.0043m², 并给出了该雷达的最小可探测目标, 这说明了曲靖非相干散射雷达在空间碎片探测方面具有优良的性能, 目标电磁散射截面按 500MHz 计算正确有效, 并能够满足工程需要. 最后, 以西安 7.3m 和 1m 天线为例分析了该结论对非相干散射雷达优化布站以及组网探测空间碎片具有参考价值.

关键词: 电磁散射; 雷达散射截面; 非相干散射雷达; 空间碎片

中图分类号: TN011

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)01-0252-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.035

Application of Qujing Incoherent Scattering Radar in Space Debris Detection

JIN Wang^{1,2,3}, YANG Yu-feng⁴, LI Qing-liang², ZHAO You³, WU Jian²

(1. Kunming Observatories, China Research Institute of Radiowave Propagation, Qujing, Yunnan 655333, China;

2. Kunming Observatories, National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Qingdao, Shandong 266107, China;

3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China;

4. School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: At present, more and more people pay attention to space debris detection, and the completion of the Qujing incoherent scattering radar has further accelerated the pace of China's space debris detection. Based on basic characteristics of this radar, firstly Mie theory is used to study the scattering characteristics of an ideal spherical target at 498MHz, 500MHz and 502MHz, respectively, the results show that most scattering energy distribute in and near the forward direction; For space debris cataloged by 14209, we obtained its radar cross section (RCS) 0.0043m² and gave the minimum detectable object for this radar, which indicated that the radar had excellent performance in space debris detection, and the calculation was precise and could meet the needs of the project. Finally, through the example of 7.3m and 1m antenna in Xi'an, we analyse the conclusion, which is valuable for optimize embattle and network detection of space debris.

Key words: electromagnetic scattering; radar cross section(RCS); incoherent scattering radar; space debris

1 引言

现今, 在外层空间中共有约 10 万片直径大于 1cm 的空间碎片, 这些空间碎片对航天飞机、空间行走的航天员、卫星乃至国际空间站都会造成重大的伤害, 如图

1 所示. 因此, 如何监测、跟踪、识别、编录并躲避围绕地球运动的空间碎片成为当前国际研究的热点. 在太空监视方面最著名的是美国沿北纬 33° 线部署的“太空篱笆”(Space Fence), 它可以探测小至 10cm 左右的中低轨道目标, 且能对轨道倾角约 30° ~ 150° 范围的卫星进

行搜索,是目前美国对太空监视的主要手段之一^[1].俄罗斯为了对抗美国,其航天部队在塔吉克斯坦 2200m 的山顶上部署了“天窗”系统^[2],由于位置理想,其近距望远镜可监视 200 ~ 1000km 高度的目标,远距望远镜能监视各种太空飞行器.即使是一只直径为 1m 的气球飘到 40000km 太空,它也能收入镜中,就如同在地面上看清 1000km 远处的一个 25mm 长的小物体.美国的地基监视系统优势在于计算太空目标的坐标更为精确,而俄罗斯的系统优势在于接收的信息流量更大,可以监视更多空间目标.该系统每天能产生约 5 万条的观测数据,维持近 5 000 个目标的编目^[3].法国成为第 3 个拥有太空监视系统的国家,其“格拉维斯”太空监视雷达^[4]具有极高的分辨能力,甚至能够发现和识别那些反射面积不足一平方米的微型卫星,可有效发现、跟踪和监视距离地球表面 400 ~ 1000km 高空上运行的各种人造地球卫星和太空飞行器,并能够确定其位置和运行轨迹.



图1 航天飞机及碎片撞击孔

在空间探测方面我国起步较晚,小尺度空间碎片探测能力严重不足.但随着我国第一台非相干散射雷达系统在云南曲靖的成功运行,进一步加快了我国在厘米级空间碎片探测方面的步伐.曲靖非相干散射雷达工作频率为 500MHz,这是由所研究对象电离层的物理特性,和对包括发射天线增益、发射机尺寸和造价、接收机噪声、传输损耗在内等因素的综合考量的结果.考虑电离层中电子和离子所要求的分辨率确定了雷达工作带宽 4MHz,即频率范围 498MHz 到 502MHz.

基于曲靖非相干散射雷达开展电磁散射特性理论分析,对空间目标探测研究具有重要的指导意义.本文利用 MIE 散射理论首先仿真分析了空间球形目标的散射特性,给出了 498MHz、500MHz、502MHz 三个频率等效球形目标的雷达散射截面(RCS)的理论值,分析了它随散射角的变化情况.然后以编目 14209 的空间碎片为例,经过曲靖非相干散射雷达波束照射并成功捕获,得到了其雷达散射截面 RCS,分析得到探测目标尺度随探测距离的变化曲线.最后以曲靖非相干散射雷达(发射端)和西安电子科技大学校内现有 7.3m、1m 口径天线

(接收端)为例,研究并分析了空间碎片 RCS 结合目标散射特性仿真分析雷达站址布局的可能性,对将来的雷达站址布置具有一定的指导意义.

2 理论分析

为了校准空间碎片 RCS 的测量值,需要用标准散射体精确的 RCS 值进行校正,通常采用已知物理属性的球形目标,如美国 1994 年 2 月 9 日“发现号”飞机所释放的初始轨道约为 346 ~ 350km 的雷达标定球,球形导体球是研究目标 RCS 的基础定标模型,有必要在新建曲靖非相干散射雷达所属频率下研究球形目标的电磁散射特性,这对工作在 500MHz 附近的窄带雷达开展空间碎片探测具有重要的意义.

本文根据 Mie 散射理论^[5-12],假设偏振光沿 z 轴方向传播,经过散射体散射后,散射场可表示为:

$$E_{s\theta} = E_0 \frac{i \exp(ikr)}{kr} S_2(\theta) \cos\varphi \quad (1)$$

$$E_{s\varphi} = -E_0 \frac{i \exp(ikr)}{kr} S_1(\theta) \sin\varphi \quad (2)$$

基于散射场可以获得任意方向上的 E 面的散射截面和 H 面的散射截面,其中散射振幅函数表达式为:

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos\theta) + a_n \tau_n(\cos\theta)] \quad (3)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2n+1)}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta)] \quad (4)$$

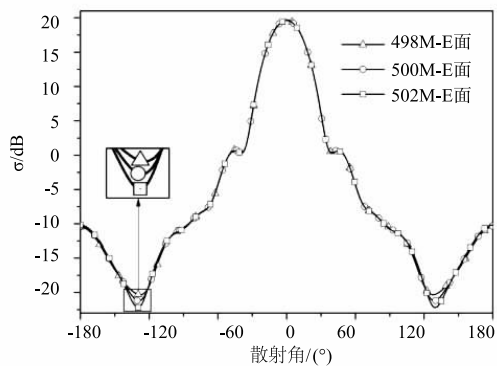
这里的 a_n 和 b_n 为 Mie 散射系数,它与贝塞尔函数和汉克函数有关; $\pi_n(\cos\theta)$ 和 $\tau_n(\cos\theta)$ 为散射角函数,与勒让德函数有关.

3 仿真计算

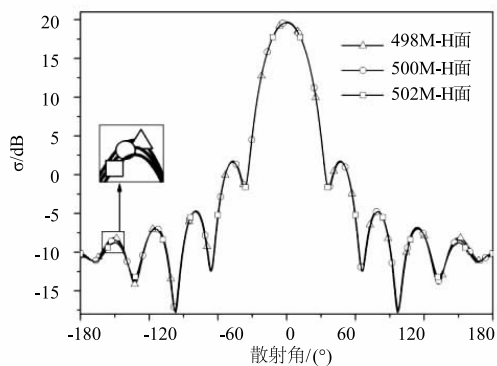
通常为了校准雷达的 RCS 测量而采用标校球标校法,即采用一个已知物理属性的球形标校球作为标准散射体对测量系统进行校准.如近似标准球体的国际编号为 05398 的雷达标校星^[13].因此,这里我们假设空间碎片为球形,其直径为 1m,入射电磁波沿 z 轴正向入射.按照曲靖非相干散射雷达的频率计算球形目标雷达散射截面,频率取值 498MHz、500MHz、502MHz.

图 2 给出了 498MHz、500MHz、502MHz 三个频率球形目标雷达散射截面中 E 面和 H 面随散射角的变化情况,其中 0 度表示前向散射,180°表示后向散射.由图 2 可知,对于直径 1m 的球体在 500MHz 频率条件下其 E 面和 H 面的前向(0 度)RCS 最大,在 $\pm 130^\circ$ 附近 E 面有最小值,后向($\pm 180^\circ$)RCS 也有一个小的峰值.但是,对于 H 面来说情况就比较复杂了,虽然在前向(0 度)RCS 最大,但与 E 面不同的是 H 面的 RCS 出现了多

个峰值,这些峰值随着散射角(绝对值)的增大而减小的趋势,并且在后向(0度)附近与E面RCS重合了.三个频率的RCS情况变化趋势大致相同,只是在数值上出现了微小的差距.这说明了该球形目标对入射电磁波进行了散射,散射能量主要集中在前向及其附近方向;后向散射虽然只占散射能量的一小部分,但由于后向峰值的存在,因此也成为目标采取后向雷达探测的依据.而在雷达工作频率4MHz范围内,前向附近RCS变化很小,近似认为是一致的.



(a) 目标E面RCS随散射角的变化曲线



(b) 目标H面RCS随散射角的变化曲线

图2 空间球形目标RCS随散射角的变化曲线

4 曲靖非相干散射雷达实验测量

曲靖非相干散射雷达是中国电波传播研究所承建的,东半球空间环境地面综合监测子午链(简称“子午工程”)中的一个重要研究基地,是进行空间天气监测和预报的重要技术手段,对航天技术及卫星应用技术也具有重要的应用价值.曲靖非相干散射雷达位于云南省曲靖市沾益区大坡乡劲松山顶部,海拔2072m,视野开阔.发射机峰值功率为2MW,具备观测距离1000km左右尺寸在厘米量级目标的能力,是目前我国唯一的开放民用雷达,如图3所示.

北京时间2014年11月18日11点30分51秒编目为14209的空间碎片经过曲靖非相干散射雷达波束,虽



图3 曲靖非相干散射雷达

然后向散射能量只占总散射的一小部分,但该目标仍然被成功捕获,目标后向雷达散射截面为 0.0043m^2 .这标志着我国曲靖非相干散射雷达探测尺度在厘米量级空间碎片的开始,为500MHz频段目标电磁散射特性研究提供了实验平台.为了更好地服务于未来的空间探测任务,我们通过大量的实验、跟踪、记录、统计及分析,最终获得了曲靖非相干散射雷达更详尽的探测参数,绘制了该雷达最小探测目标随探测距离的关系曲线,如图4所示.

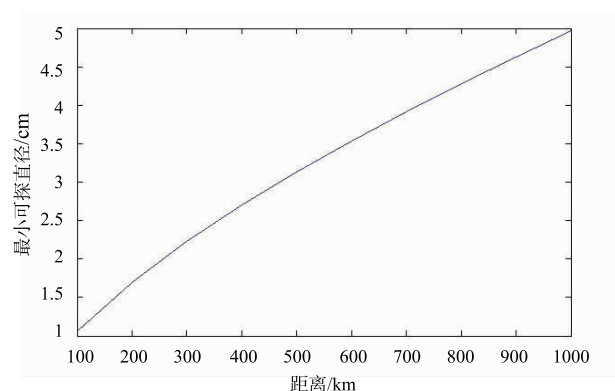


图4 曲靖非相干散射雷达最小可探目标

5 多站雷达组网探测碎片分析

随着曲靖非相干散射雷达的建成,以非相干散射雷达为发射源,利用我国现有天线设备形成双站、多站雷达组网探测空间碎片,研究其电磁散射特性对于航天器预警和避轨有重要意义.在寻求与之匹配的遥测设备中,首先要考虑的就是工作频率,中心频率500MHz成为关键参数.在我国现有具有500MHz潜力的天线中,只要增添匹配的终端设备便具备了与云南曲靖非相干散射雷达组网的基本条件.现已知云南省内就有10m,11m和40m口径射电望远镜可以作为遥测站,即

使 1m 口径卫星接收天线只要地理位置和选取目标合适,也会有不错的观测效果。

以位于西安电子科技大学校园内口径为 7.3m 的天线为例,其相距曲靖 500MHz 雷达的直线距离为 1054km,可作为其接收设备. 假设天线系统具备 500MHz 的接收终端,系统噪温为 100K,假定此刻 500MHz 雷达俯仰角为 30°,按照等效导体球尺度换算,7.3m 可观测到观测校园垂直上空 800km 处直径为 8cm 目标,这样简单的双站系统具备测量目标前向 RCS 的条件,800km 附近高度正好是空间碎片的密集分布区. 由于空间碎片数量众多,使得该研究具有较高的应用价值,可以形成空间碎片、500MHz 雷达和地面遥测天线三角形拓扑结构,不同轨道高度的空间碎片和双站雷达构建不同形状的三角结构,形成不同的散射角以全面测量目标碎片信息. 同样位于西安电子科技大学校园内存在的口径为 1m 价位极其低廉的卫星电视接收天线,当其指向曲靖非相干散射雷达方向,以重庆大学上空 300km 为例,可以接收到尺寸为 11cm 的等效导体球反射的 500MHz 雷达电磁波. 此刻曲靖 500MHz 和西安 1m 天线俯仰指向均大于 25°.

具有强大空间探测能力的曲靖非相干散射雷达和我国现有众多射电望远镜设备的存在,在空间碎片测量迫切需要的背景下,实现以曲靖非相干散射雷达为发射中心,协同现有设备组网探测. 此种协同具备了从不同角度接收空间碎片反射的电磁波并研究其目标 RCS 的条件,结合电磁散射特性分析空间目标 RCS 可以为我国在轨航天器提供有价值的服务.

6 下一步工作

空间碎片是人类空间活动的产物,联合国和平利用外层空间委员会下属科技小组委员会已经将空间碎片列入议事日程,我国政府及国内相关研究所和高校对此都高度重视. 随着《国务院关于国家重大科研基础设施和大型科研仪器向社会开放的意见》的发布实施,曲靖非相干散射雷达已是我国第一个向民众开放的地基雷达设备,利用其开展空间碎片数据探测是对现有数据库的有益补充,辅以我国现有天线设备,联合探测将是很有意义的基础科研工作. 为了更广泛地研究空间碎片,下一步将积极推进利用价位极其低廉的 1m 口径农用卫星接收天线接收带有空间碎片调制的 500MHz 雷达信号的相关基础研究,由于 1m 天线较小,主要考虑距离曲靖非相干散射雷达在 1000km 以内,如西安电子科技大学、重庆大学、武汉大学和国防科技大学以及有意向的师范院校等高校联测,通过对空间碎片研究这一课题,给学生在校园内认识航天工作和地基雷达在空间探测领域基本应用的机会. 本文没有考虑空间

碎片实际形状的复杂性,也没涉及目标位于雷达波束位置引起的 RCS 误差和电离层的存在造成的测量误差等因素,相关的理论和数值分析有待于进一步研究和验证.

参考文献

- [1] 杨玉峰. 不规则褶皱表面目标的光谱散射特性研究[D]. 陕西西安: 西安电子科技大学,2012.
YANG Yu-feng. Study on Spectral Scattering Properties of Target with Irregular Folded Surface [D]. Xi'an, Shaanxi: Xidian University, 2012. (in Chinese)
- [2] 王综. 俄罗斯“天窗”探秘(航空与航天)[J]. 军民两用技术与产品,2003,(7): 11.
- [3] 谭莹. 天基空间目标探测技术探讨[J]. 空间电子技术, 2006,(3): 5-9.
- [4] 夏传顺. 格拉维斯:法“太空侦探”曝美太空诡秘[J]. 中国国防报,2007,(2): 1.
- [5] WISCOMBE W J. Improved Mie scattering algorithms [J]. Applied Optics, 1980, 9(9): 1505-1509.
- [6] 赵延文,贾苗苗,邹克利,刘海良. 金属-各向异性介质体组合目标频域体表积分方程矩量法[J]. 电子学报,2013, 41(2): 273-280.
ZHAO Yan-wen, JIA Miao-miao, ZOU Ke-li, LIU Hai-liang. Method of moments of the volume-surface integral equations for the composite objects of perfect electric-conductor and anisotropic media [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(2): 273-280. (in Chinese)
- [7] 邱兆杰,侯新宇,许家栋,万伟. 三维目标电磁散射矢量有限元/边界元法的公式研究[J]. 电子学报,2006,34(9): 1734-1737.
QIU Zhao-jie, HOU Xin-yu, XU Jia-dong, WAN Wei. A study of the formulations of hybrid vector FEM/BEM for EM scattering from 3-D objects [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1734-1737. (in Chinese)
- [8] 杨正龙,金林,倪晋麟,方大纲. 复杂目标双站 RCS 的图形电磁计算[J]. 电子学报,2004,32(6): 1033-1035.
YANG Zheng-long, JIN Lin, NI Jing-ling, FANG Da-gang. Bistatic RCS calculation of complex target by GRECO [J]. Acta Electronica Sinica, 2004, 32(6): 1033-1035. (in Chinese)
- [9] 王海彬. 基于高频电磁散射理论的电大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 Hai-bin. 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)
- [10] 王新,黄志祥,吴先良. 基于高阶抛物线方程求解目标雷达散射截面[J]. 电子学报,2010,38(9): 2118

-2121.

WANG Xin, HUANG Zhi-xiang, WU Xian-liang. Solving objects radar cross section based on high-order parabolic equation method [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38 (9): 2118 - 2121. (in Chinese)

- [11] XU F, REN K F, GOUESBET G, et al. Generalized Lorenz-Mie theory for all arbitrarily oriented, located, and shaped beam scattered by a homogeneous spheroid [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24 (1): 119 - 131.
- [12] DOOST H A, ARA M H M, KOUSHKI E. Synthesis and complete Mie analysis of different sizes of TiO₂ nanoparticles (Original Research Article Optik) [J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127 (4): 1946 - 1951.
- [13] 马林. 空间目标雷达截面积的测量理论与实践[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(4): 11 - 15.

作者简介



金旺男, 1976年1月出生, 山东茌平人. 2013年毕业于西安电子科技大学无线电物理专业, 现在中国电波传播研究所昆明站工作. 现为中国电波传播研究所和中科院国家天文台联合培养博士后, 从事非相干散射雷达和雷达天文学方面的研究.

E-mail: jinwang0410@163.com



杨玉峰(通讯作者)男, 1980年10月出生, 河北石家庄人. 2012年在西安电子科技大学获得博士学位. 现为西安理工大学自动化与信息工程学院硕士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事电波传播与散射、目标光散射特性以及图像处理方面的有关研究.

E-mail: yangyufeng@xaut.edu.cn