

Jin Wang, Wu Jian, Wu Zhensen, Liu Yongjun, Sun Mingguo, Li Hui. Observation of OSCAR-3 satellite radar cross section using the tristatic radar. *Chin. J. Space Sci.*, 2013, **33**(4): 453-457

三站雷达测量 OSCAR-3 卫星散射截面

金旺¹ 吴健² 吴振森¹ 刘拥军²
孙明国³ 李辉²

1(西安电子科技大学理学院 西安 710071)

2(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术国家重点实验室 北京 102206)

3(中国科学院国家天文台 长春人造卫星观测站 长春 130117)

摘要 在中国首次使用欧洲非相干散射雷达三站系统研究空间碎片. 以美国 OSCAR-3 报废业余通信卫星的三站雷达探测散射截面为例, 采用欧洲非相干散射雷达三站标准电离层实验模式, 分析三站雷达目标散射截面的差异性. 比较三站雷达的探测结果表明, Sodanky 站雷达散射截面比 Tromso 站散射截面精度提高 5 倍; 按照中国科学院国家天文台预报理论模型轨道计算, 通过理论方向图修正雷达散射截面后, 在不知道美国太空监测网所公布的数值时, Tromso 站雷达散射截面具有参考价值. 计算结果证实三站雷达能提供较为准确的雷达散射截面.

关键词 空间碎片, 雷达散射截面, 三站雷达探测

中图分类号 P 352

Observation of OSCAR-3 Satellite Radar Cross Section Using the Tristatic Radar

JIN Wang¹ WU Jian² WU Zhensen¹ LIU Yongjun²
SUN Mingguo³ LI Hui²

1(Department of Physics, Xidian University, Xi'an 710071)

2(National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China Research Institute of Radiowave Propagation, Beijing 102206)

3(Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117)

Abstract This is the first space debris observation experiment using 930 MHz Europe Incoherent Scatter (EISCAT) UHF Radar in China. For the purpose of analyzing the discrepancy of tristatic RCS (Radar Cross Section), taking the observation of a satellite called OSCAR-3 as an example, the standard European Incoherent Scatter (EISCAT) ionospheric radar experiment model is used. The results showed that the RCS precision from Sodanky radar is five times higher than that from Tromso radar; according to the forecast debris model of National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences and the theoretical antenna pattern, the revised RCS is referential

when the U.S. Space Surveillance Network does not provide RCS results. Results of the present work confirm that the tristatic radar could provide higher precision RCS than monostatic.

Key words Space debris, Radar Cross Section (RCS), Tristatic radar observation

0 引言

空间碎片是空间环境中威胁低地球轨道航天器安全可靠运行的重要因素之一^[1-2], 其主要来自卫星或火箭的解体和碰撞^[6-8], 直径 1 cm 碎片的撞击就能造成航天器的致命损坏。空间碎片探测技术是非常重要的基础性研究。对于直径大于 1 cm 的低地球轨道空间碎片而言, 地基雷达观测是最实际的探测手段^[3-5]。

大部分雷达利用雷达散射截面 (Radar Cross Section, RCS) 大小作为鉴别系统灵敏度的方法, 目标 RCS 是指雷达接收目标截获发射信号能量的能力。由于 RCS 随雷达照射的视界角和频率变化与目标姿态和雷达工作极化方式有关, 因此, 目标 RCS 的测量比较复杂。来自美国太空监测网的两行根数是唯一的空间碎片公开资料^[9], 对于直径 1~30 cm 的空间碎片, 其数据主要来自 Haystack 雷达, 所报道的 RCS 数据是使用标准球校正过的多次测量的统计平均值^[10], 是唯一的参考标准。

早期雷达都是双站雷达, 发射天线和接收天线放置在两个相距较远的地方, 1936 年, 美国海军实验室发明了收发开关, 实现收发共用一部天线^[11]。当前, 随着人们对特殊目标的探测需要, 双站雷达重新得到了重视。

EISCAT-UHF 三站雷达以探测电离层而著称^[12], Janches 等^[13] 在 1997 年将其用作陨石探测, EISCAT 雷达在 2001 年开始空间碎片的单站雷达探测研究^[14]。Juha 等于 2009 年使用配备专门碎片接收机的三站雷达系统^[15] 首次开展碎片研究, 2010 年 3 月 25 日, 中国首次使用 EISCAT-UHF 三站电离层探测标准模式, 从所记录的原始数据解析空间碎片信息, 并与中国科学院国家天文台空间碎片预测理论模型比对, 证实 2010 年 3 月 25 日 10:31:05 UT 的目标为编号 1293 的美国 OSCAR-3 报废业余通信卫星, 由于该目标所处天线波束位置不同等原因, 经三站雷达计算所得的 RCS 有所差异; 根据预测理论

计算目标轨道和天线增益方向图, 修正了目标 RCS。此试验方法为利用非相干散射雷达探测空间碎片提供了探索性实验研究, 并从多站雷达探测的角度研究了 RCS 精度。

1 三站雷达探测实验概况及基本原理

EISCAT-UHF 三站雷达是一个雷达发射, 三个雷达同时接收, 三部雷达均为卡塞格伦可动式天线; 发射机在挪威的 Tromso, 接收机分别在挪威的 Tromso、芬兰的 Sodanky 及瑞典的 Kiruna^[16]。接收数据来源于 2010 年 3 月 25 日 EISCAT 雷达的非相干散射 EISCAT-UHF 雷达碎片实验, 实验采用的模式是标准电离层探测模式, 三部雷达同时指向 Tromso 站 (69.586°, 19.227°) 上空 870 km 处, 三站雷达几何结构如图 1 所示。

三站雷达采用波束驻留模式, 即雷达波束指向固定的区域, 捕获经过其波束的空间碎片, 只要回波能量超过设定值就可以检测到目标。

发射机中心频率约为 930 MHz, 峰值功率约为 2 MW, 使用 32 位交替码, 脉冲周期 11 160 μ s, RF 占空比 8.6%, 三站雷达主要参数列于表 1。

EISCAT-UHF 三站雷达系统由两个双站雷达系统和一个单站雷达系统构成, 利用标准雷达方程计算目标 RCS。假设目标是球形散射体, 双站雷达方程与单站雷达方程类似, 其 RCS 表达式为

$$R_{CS} = \frac{(4\pi)^3 R^2 R_1^2 P_{sys} C_{ENR}}{P_t G_t(\theta) G_r(\theta) \lambda^2}$$

式中, R 为发射雷达到目标的距离; R_1 为接收天线到目标的距离; P_{sys} 为单位带宽噪声功率谱密度, C_{ENR} 为能量噪声比, P_t 为发射功率; $G_t(\theta)$ 和 $G_r(\theta)$ 分别为发射天线和接收天线的天线增益, θ 为目标相对于发射或接收天线波束中心的偏离角度; λ 为雷达工作波长。

双站雷达与单站雷达的主要区别在于^[17], 双站雷达方程中发射基地到目标的距离 R 与接收基地到

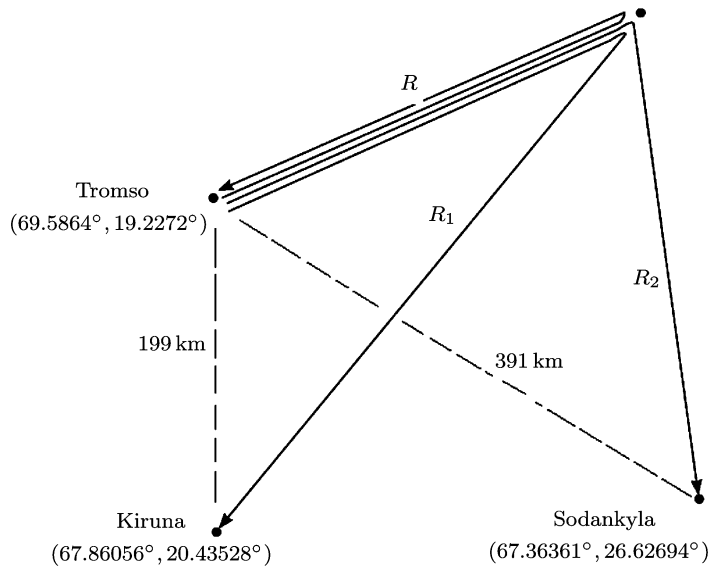


图 1 空间碎片实验三站雷达几何结构

Fig. 1 Geometry of the tristatic space debris experiment

目标的距离 R_1 或 R_2 之积取代了单基地雷达方程中雷达到目标的距离 R 的平方项; 发射天线与接收天线增益 $G_r(\theta)$ 或 $G_t(\theta)$ 取代了单基地雷达收发合一天线的天线增益 $G_r(\theta)$.

如果 $R = R_1$, $G_r(\theta) = G_t(\theta)$, 则双站雷达方程就变成了单站雷达方程.

2 三站雷达探测结果及模型比较分析

2.1 三站雷达探测结果

2010 年 3 月 25 日 10:31:05 UT 三站雷达同时捕获目标, 由于目标对于每个雷达所处的增益方向图位置有所差异, 致使每一个接收雷达收到的回波信号能量差别较大, 三站所得该雷达散射截面结果有所差异, 如表 2 所示.

2.2 理论模型预测结果

中国科学院国家天文台根据理论模型预测了空

表 1 三站雷达参数

Table 1 Parameters of tristatic radar

| 雷达 | 系统噪声/K | 口径/m | 增益/dB |
|---------|--------|------|-------|
| Tromso | 110 | 32 | 48.1 |
| Sodanky | 50 | 32 | 48.1 |
| Kiruna | 48 | 32 | 48.1 |

间碎片经过 Tromso 雷达站上空的理论信息, 预测值列于表 3.

2.3 实测结果与理论模型比较分析

根据中国科学院国家天文台理论预报模型, 此目标为美国 1965 年发射的业余通信卫星 OSCAR-3, 现已报废, 目标编目为 1293, 国际标识为 1965-016F, 对照美国公开资料可知, 该碎片的雷达散射截面为

表 2 三站雷达所得结果

Table 2 Computed results of tristatic radar

| 雷达 | 信噪比 | 高度/km | RCS/m ² |
|-----------|------|-------|--------------------|
| Tromso | 240 | 884.6 | 0.0007 |
| Sodankyla | 1840 | 886.2 | 0.0034 |
| Kiruna | 640 | 884.8 | 0.0012 |

表 3 轨道预测编目信息

Table 3 Catalog number information from orbit prediction

| 时间 | 目标编目 | 偏离雷达波束角度/(°)* | 高度/km |
|-------------|------|---------------|-------|
| 2010-03-25 | | | |
| 10:31:05 UT | 1293 | 0.52 | 885.5 |

* 目标偏离 Tromso 雷达站天线波束中心位置的角度.

0.2191 m². 由表 2 可以看出, Sodanky 雷达站的 RCS 值比 Tromso 雷达站大了近 5 倍, 更加接近于预报理论值.

将表 2 中三站雷达高度实际计算值与表 3 中的中国科学院国家天文台理论模型预测高度值进行比较, 得到的高度误差列于表 4.

由表 4 可以看到, 高度误差最大为 0.9 km, 而此次实验雷达距离分辨率为 1.8 km, 三站高度误差均处于三站理论距离分辨率误差范围之内. 根据表 3 可知, 目标所处雷达波束中心位置为偏角 0.52°; 从而造成接收能量的损失, 目标 RCS 测量数值远小于真实值. 图 2 给出的是无偏角和偏角为 0.52° 时, Tromso 雷达天线的理论方向图, 横坐标为 x 轴偏角, 纵坐标为天线增益.

由图 2 可以看出, 由于目标偏离天线轴中心 0.52°, 致使 Tromso 雷达接收信号能量存在约 22 dB 的损失, 使用这一理论值修正所得目标散射截面为 0.11 m². 该值为假设目标经过 Tromso 雷达天线

表 4 三站雷达高度误差

Table 4 Altitude difference of the tristatic radar

| 雷达 | 与预测值差值/km |
|-----------|-----------|
| Tromso | 0.9 |
| Sodankyla | 0.7 |
| Kiruna | 0.9 |

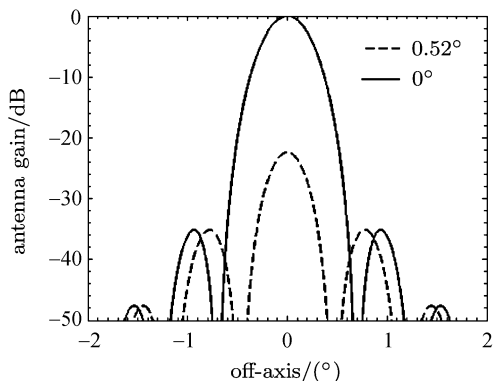


图 2 无偏角和偏轴 0.52° 双程理论天线方向图

Fig. 2 Double-ways theoretical antenna pattern at off-axis of 0° and 0.52°

波束中心得到的散射截面数值, 与美国公开的目标散射截面 0.2191 m² 有一致性, 具有一定参考价值.

3 分析与结论

理想情况下波传播是在自由空间进行的, 传播媒质为均匀各向同性, 而实际的传播路径介质是非均匀的. 由于对流层中的水蒸气、压强和温度变化造成的折射效应, 雾、灰尘和云所造成的衰减以及电离层中大量自由电子对电磁波传播存在折射、吸收和极化旋转影响等原因, 使得能被雷达天线所接收的雷达能量减少了很多, 从而造成目标 RCS 比实际值小, 并且电离层所处高度较低, 产生的回波功率与空间碎片相比低很多, 易于鉴别.

非相干散射雷达是地基雷达探测电离层的强有力设备, 可以兼做空间碎片探测, 双站测量可以作为单站的重要补充, 提高测量精度. 由于双站雷达测量到的目标散射中心不同, 回波相位相应也有所差异, 当目标所处双站天线波束位置增益高于单站天线波束增益值, 双站雷达波束中心更接近目标实际轨迹时, 双站 RCS 大于单站 RCS. 三站雷达探测空间碎片能较为准确地探测到目标轨迹信息, 其优越性在于降低了目标相对于接收雷达天线方向图中心位置的偏差不确定性, 提高了目标 RCS 的测量精度.

致谢 欧洲非相干散射科学联合会 (EISCAT) 工作人员在实验期间提供了碎片试验数据. 科学联合会由中国电波传播研究所 (CRIRP)、德国 DFG 基金会、芬兰科学院 (SA)、日本国立极地研究所 (NIPR) 和日地环境研究所 (STEL)、挪威 NFR 基金会、瑞典 VR 基金会、英国 STFC 基金会联合资助. 感谢 EISCAT Ingemar 教授、Mike 教授和 Assar Westman 博士给予的指导.

参考文献

- [1] Finckenor M M, Edwards L D, Vaughn J A, *et al.* Test and Analysis Capabilities of the Space Environment Effects Team at Marshall Space Flight Center [R]. NASA/TP-2002-212076
- [2] Li Hongwei, Cai Minghui, Han Jianwei, Huang Jianguo, Li Xiaoyin, Yu Jinxiang, Gao Zhuxiu Liu Danqiu. Research of combined effect of small space debris and atomic oxygen [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4):503-508. In Chinese (李宏伟, 蔡明辉, 韩建伟, 黄建国, 李小银, 于金祥, 高著秀, 刘丹秋. 微小空间碎片与原子氧协同效应研究 [J]. 空间科

- 学学报, 2011, **31**(4):503-508)
- [3] Toru S, Ken-ichiro I, Toshio W, *et al.* MU radar observations of space debris [C]//Proceedings of the 4th International Space Conference of Pacific-basin Societies. Kyoto: Pacific-basin Societies, 1991. 273-282
- [4] Kessler D J. Orbital debris environment for spacecraft in low earth Orbit [J]. *J. Spacecr. Rocket.*, 1991, **28**(3):347-351
- [5] Toru S, Takuji N. Orbit determination of meteors using the MU radar [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 2000, **E83-B**(9):1990-1995
- [6] Yang Xu, Liu Jing, Wang Ronglan, Yu Youcheng. Collision Prediction analysis using refined error data [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(4):520-526. In Chinese (杨旭, 刘静, 王荣兰, 于友成. 利用精化误差进行危险交会分析 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(4):520-526)
- [7] Wang Ronglan, Liu Jing, Zhang Qingming. Study on fragmentation velocity increments [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2009, **29**(6):599-604. In Chinese (王荣兰, 刘静, 张庆明. 解题速度增量计算方法研究 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**(6):599-604)
- [8] Wang Ronglan, Liu Jing, Zhang Qingming. Fragmentation analysis of Cosmos 2421 satellite [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2010, **30**(1):43-48. In Chinese (王荣兰, 刘静, 张庆明. Cosmos2421 卫星解体事件分析 [J]. 空间科学学报, 2010, **30**(1):43-48)
- [9] Ono K, Tajima T, Mizutani A, *et al.* Development of the first Japanese space debris observation radar [C]//The Third European Conference on Space Debris. Noordwijk, Netherlands: ESA Publication Division, 2001. 265-272
- [10] Foster J L, Stansbery E G, Matney M J, *et al.* Haystack and Hax Radar Measurements of the Orbital Debris Environment, 1999-2002 [R]. NASA/JSC-49875, 2003
- [11] Merrill I S. Radar Handbook (2nd Ed.) [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005
- [12] Aruliah A L, Griffin E M, McWhirter, I, *et al.* First tristatic studies of meso-scale ion-neutral dynamics and energetic in the high-latitude upper atmosphere using collocated FPIs and EISCAT radar [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**, L03802, doi:10.1029/2003GL018469
- [13] Janches D, Pellinen-Wannberg A, Wannberg G A, *et al.* Tristatic observations of meteors using the 930 MHz European incoherent scatter radar system [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**, doi:10.1029/2001JA009205
- [14] Markkanen J, Landgraf M. Real-time small-size space debris detection with EISCAT radar [J]. *Adv. Space Res.*, 2005, **35**:1197-1209
- [15] Vierinen J, Markkanen J, Krag H. High Power Large Aperture Radar Observations of the Iridium-Cosmos collision [C]//Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2009, 1:4
- [16] Perraut S, Brekke A, Baron M, *et al.* EISCAT measurement of ion temperatures which indicate non-isotropic ion velocity distributions [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1984, **46**, doi:10.1016/0021-9169(84)90072-2
- [17] Yang Zhenqi, Zhang Yongshun. Bistatic (Multistatic) Radar Systems [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 1998. In Chinese (杨振起, 张永顺. 双(多)基地雷达系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998)