**文章编号** 1005-0388(2011)05-0956-05

# 非相干散射雷达探测空间碎片实验研究

金  $E^1$  吴振森<sup>1</sup> 吴  $de^2$  刘拥军<sup>2</sup> 孙明国<sup>3</sup>

徐 $k^2$ 李  $z^2$ 周  $\hat{e}^4$ 

(1. 西安电子科技大学理学院,陕西西安 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,吉林长春 130117;
4. 苏丹基拉地球物理天文台 FIN-99600,苏丹基拉 芬兰)

摘 要 这是我国首次用欧洲非相干散射雷达探测空间碎片的实验。根据非相干散 射探测原理和空间碎片高度分布的规律,采用匹配滤波方法处理了 2010 年 3 月 25 日 15 小时实验数据,每小时平均 24 个碎片,用统计方法分析了碎片高度分布。结果 表明:大部分碎片分布在高度为 800~1000 km 之间,与碎片高度分布理论一致,与 中国科学院国家天文台空间碎片预测理论模型比对,比较 2010 年 3 月 25 日 10 点 31 分 05 秒目标信息,高度误差仅为 0.97 km,确认为碎片国际标识为 1965-016F 的美 国报废业余通信卫星,证实了非相干散射雷达设备直接探测碎片的可行性。 关键词 非相干散射雷达;空间碎片;匹配滤波

**中图分类号** TN959 文献标志码 A

## 1. 引 言

随着人类太空活动的日益增多,空间碎片越来 越多,地面上可以检测到并登记在册的在轨道上运 行的人造物体共有 8600 多个,其重量约为 3000 T, 至于检测不到的碎片更是数以千百万计<sup>[1]</sup>,目前只 能对较大的碎片进行检测也就是登记在册的直径在 10 cm 以上的,碎片运动的平均速度为 10 km/s (36000 km/h),这样的速度下,一个 1 cm 的碎片就 可以把拥有各种防护功能的飞船外壳击穿,引起航 天器损坏,一旦关键部件损坏会导致卫星失灵甚至 报废,报废的卫星又形成新的碎片,如此循环,严重 影响未来的太空活动。因此,研究空间碎片的空间 分布特性,尤其是对其的轨道高度检测,对未来不断 发展的航天事业,具有重要的科学意义及应用价值;

非相干散射雷达可以测量到离地面高度 2000 km 甚至以上的范围<sup>[2-3]</sup>. 欧洲非相干散射雷达协会 J. Markkanen<sup>[4]</sup>等自 2000 年开始研究一套专门的 碎片接收系统安装在非相干散射雷达上探测空间碎 片,日本 Toru Sato<sup>[5]</sup>等 1993 年就开始使用中高层 大气雷达即 MU 雷达观测空间碎片,美国主要使用 Haystack 雷达和 Goldstone 雷达探测碎片,德国使 用成像跟踪雷达探测碎片。对于在低地球轨道的直 径大于1 cm 空间碎片而言,雷达观测是最实际的研 究方法<sup>[5]</sup>。

非相干散射雷达探测接收到的回波信号是发射 信号受到电子离子无规则热运动的起伏调制后引起 的后向散射,其变化是连续的,由于空间碎片运动, 当被雷达波束所照射,发射信号遇到"硬目标",其回 波功率很强,不同于常见的电离层功率谱,如图 2 所 示,英国 J. Porteous<sup>[6]</sup>采用电离层异常功率谱变化 时间,与碎片轨道理论方法计算时间比对证实了这 一现象;中国是欧洲非相干散射雷达协会的正式成 员<sup>[2]</sup>,允许使用常规电离层试验设备,在仔细研究文 献[4]数据接收系统的数据处理方法基础上,尝试使 用常规电离层实验模式从原始数据中采用提取出空 间碎片信息,与中国科学院国家天文台空间碎片理 论预测模型相比较,验证 2010 年 3 月 25 日 10 点 31

联系人: 金旺 E-mail:jinwang0410@163.com

收稿日期: 2010-09-29

分 05 秒发现的经过雷达上空碎片信息,验证了常规 电离层试验模式进行空间碎片研究的可行性。

#### 2. 试验设计和实验现象

自 1959 年开始欧洲非相干散射雷达(EIS-CAT)开始用于研究高空大气探测发展至今,共有 五部雷达,探测频率覆盖:3.85~8 MHz,222~225 MHz,498~500 MHz,926~930 MHz;固定的试验 模式:cp1,cp2,cp3,cp4,cp5,cp6,cp7,在此七种固 定试验模式的基础上又衍生结合出 16 种试验模式 分别为:tau2pl,tau1,arc1,manda,arc\_dlayer,tau8, tau0, steffe, ipy, arc slice, hilde, taro, tau7, folke, beata, comp64, 共计23种试验模式; 五部雷达探测 范围覆盖 80~2000 km;发射码形有三种:长脉冲 码,巴克码,交错码;距离分辨率从 0.45 km 到 14 km. 我们首先考虑雷达工作频率,频率越高雷达波 束越小,其分辨率越高,选择了 UHF 频段;其次考 虑到碎片在距地面高度范围在 800 到 1000 km 分 布密度较大,选择了在 1000 km 以下雷达无盲区的 工作模式;考虑到欧洲非相干散射雷达地处极区,系 统噪声温度易受北极光的影响,降低系统灵敏度,干 扰对碎片的测试,选择了具有发射功能的 tromso 站,探测频率为929 MHz,taul 试验模式,探测范围 为 80~1350 km,发射码选择交错码,距离分辨率为 1.8~9 km. 我国即将建成在云南沾益的非相干散 射雷达也含有这种工作模式。

非相干散射模型给出了自相关函数功率谱,进 行常规电离层参数计算,在试验中以此为依据判别 空间碎片经过雷达波束。图 1 是常规电离层功率 谱,无碎片;初步判断图 2 为碎片或卫星经过雷达波 束所致,在 1000 到 1200 km 处有凸起变化的电离 层功率谱。

图 1 是来自欧洲雷达 2010 年 3 月 25 日 13:00: 04 数据,实验采用 taul 试验模式,发射码为 Alternating Code 码。实验处理结果表明回波功率和功 率剖面,是由于地球物理的原因在高度超过 500 km 功率无变化,其功率起伏发生在 400 km 以下。

图 2 是来自欧洲雷达 2010 年 3 月 25 日 10 点 31 分 05 秒数据,实验采用 tau1 试验模式,发射码为 AlternatingCode码。实验处理结果表明回波功率 和功率剖面,功率变化发生在 400 km 以下和 1000 ~1200 km 处,功率变化是由于空间碎片或者卫星 反射雷达发射功率所致。图 2 与图 1 有着明显的不 同,功率起伏变化较为明显。



#### 3. 匹配滤波方法理论分析

为了在回波信号功率谱中获取空间碎片参数信息,构造了匹配滤波方程,使得信干比(SNR)最大化。接收信号功率是包括噪声的目标回波复信号,可以写为<sup>[11]</sup>

$$z(t) = s(t) + \gamma(t) \tag{1}$$

式中: $\gamma(t)$ 为噪声;s(t)为发射信号x(t)被碎片目标调制后的函数,一般是目标的距离和速度的函数。 对于后向散射测量,设目标的距离为 $R_0$ ,径向速度为 $v_0$ ,则

$$s(t) = b_0 x(t - 2R_0/c) e^{-i2\pi \frac{r_0}{\lambda/2}t}$$
(2)

式中: c为光速;  $b_0$  与目标的散射系数有关。根据 雷达信号处理中的匹配滤波原理<sup>[3]</sup>:当接收滤波器 的响应 h(t)为发射信号的复共轭时,接收信号的信 杂比最大,本文构造了匹配函数也被称为相干积分, 对于离散采样后的数据,匹配函数是距离门  $R_j = j\tau_s c/2(\tau_s)$ 为采样间隔)和多普勒速度的函数,其主 要原理如下:

$$MF(\nu, \mathbf{R}_j) = \frac{\left|\sum_{n} z_n \overline{x}_{n-j} e^{i 2\pi \frac{\nu}{\lambda/2} n \varepsilon_s}\right|}{\parallel x \parallel}$$
(3)

式(3)右边的分子即匹配滤波后的结果,其中:

$$||x|| = (\sum_{n} |x_{n}|^{2})^{1/2}$$
 (4)

如果忽略噪声的影响,则 MF 的最大值的位置由式 (2)和(3)知,就是目标的距离 R。和径向速度 ь 的 位置。即

$$\arg \max MF(\nu, R) = (\nu_0, R_0)$$
 (5)

在有噪声的情况下, MF 的最大值的位置是目标的 距离和径向速度的估计值:

$$(\hat{\nu}, \hat{R}) = \arg\max MF(\nu, R) \tag{6}$$

假设噪声采样 γ<sub>n</sub> 符合均值为 0、方差为 σ<sup>2</sup> 的高斯分 布,则 MF 的最大值平方的数学期望为

$$E(\max MF^{2}) \approx \frac{E|\langle b_{0} x_{0} + \gamma, x_{0} \rangle|^{2}}{\|x\|^{2}}$$
  
=  $\|b_{0} x_{0}\|^{2} + \frac{E|\langle \gamma, x_{0} \rangle|^{2}}{\|x_{0}\|^{2}}$   
=  $\|s\|^{2} + \sigma^{2}$  (7)

除去噪声后的接收信号的能量为

$$\| s \|^2 = \max MF^2 - \sigma^2 \tag{8}$$

根据匹配滤波原理,滤波器输出的信杂比(ENR)为 信号的能量 E<sub>s</sub> 与噪声功率谱密度 N 的比值,即

$$ENR = \frac{E_s}{N}$$
(9)

则利用 MF 的最大值可得到 ENR 的估计值 ENR 为

$$ENR = \frac{\max MF^2}{\sigma^2} - 1$$
(10)

通过设置不同的门限阈值 θ 可以得到目标不同的探 测概率和虚警率:

detection  $\leftrightarrow \sqrt{\text{ENR} + 1} > \Theta$  (11)

4. 数据结果分析

数据来源于2010年3月25日EISCAT 雷达的 非相干散射雷达碎片实验,实验采用的模式是常规 电离层探测模式。

天线位于北纬 69.586°,东经 19.227°,海拔高

度 0.086 km,天线垂直向上指向 90°。天线增益 48.1 dB,发射机中心频率约为 930 MHz,波束宽度 约 0.1°,系统温度约 110K,峰值功率约为 2 MW,时 间分辨率为 5 s,使用 16 位交替码,脉冲周期为 11160 s,RF 占空比 8.6%,取距离 R>500 km,信噪 比检测门限为 SNR = 25,为标定实验雷达检测标 准。假定被检测目标信号信噪比为 25,在 1000 km 处,是球型粒子为参考标准,对于 0.1 s 积分时间, 在距离雷达 1000 km 处,雷达可以清楚地测到直径 为 2.3 cm 的碎片微粒,为此次实验检测目标灵敏 度。实际上在数据处理时,检测信噪比门限低于 25,也是可以看到目标的。

2010 年 3 月 25 日非相干散射雷达从 UT8:12 ~22:59,共取得 363 个碎片,平均每小时 24 个,比 2005 文献[4]报道每小时 20 个增加了 20%,说明了 空间碎片(也包括在规卫星)增加的趋势;其中高度 分布位于 800~1000 km 的共 203 个,占总数的 55.9%,如图 3 所示。

其中图 3 中 2010 年 3 月 25 日 10 点 31 分 05 秒数据,与中国科学院国家天文台预测理论模型计 算比对,证实为国际标识 1965-016F 的已报废业余 通信卫星<sup>[7-8]</sup>,1965 年 3 月 9 日发射,重约 13.6 kg, 长方形。



图 3 空间碎片高度分布

表1中预测值高度是中科院国家天文台理论模型碎片模型计算得到的,雷达散射截面预测值是根据编目查美国碎片网站<sup>[7]</sup>得到,微粒直径预测值是根据雷达散射截面计算得到。

表 1 2010 年 3 月 25 日 10 点 31 分 05 秒碎片信息比对

	高度/km	雷达散射	微粒直径
		截面 $/m^2$	/m
预测值	885.523	0.219	0.361
实测值	884.550	0.116	0.384

高度测量值与实测值相差 0.973 km,在距离分 辨率范围内,散射截面误差很小,证实了匹配滤波方 法在非想干散射雷达固定模式下测量碎片的可行 性。

从图 3 可以看到大部分碎片分布于最稠密的低 地球轨道及静止轨道 800~1000 km 区间与文献 [9]-[14]是一致的。

利用现有电离层探测欧洲非相干散射雷达设备 探测空间碎片,实验的成功给我们提供了一条新的 雷达功能开发使用的途径,为我国即将建成的非相 干散射雷达应用于空间碎片探测做了探索准备。

感谢 欧洲非相干散射科学联合会(EISCAT) 雇员在实验期间提供的帮助以及碎片试验数据。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 组织 Ingemar 教授、Mike 教授 和 Assar Westman 博士给予的指导。

#### 参考文献

- [1] 李 爽,徐敏强,崔平远.小空间碎片环境数据库的 生成[J].飞行力学,2004,22(1):79-82.
  LI Shuang, XU Minqiang, CUI Pingyuan. Small space debris environment database building[J]. Flight Dynamics, 2004, 22(1):79-82. (in Chinese)
- [2] 吴永宏,吴 健,吴振森. 非相干散射的一种非线性 反演方法[J]. 电波科学学报, 2008, 23(1): 74-78.
  WU Yonghong, WU Jian, WU Zhensen. Non-linear inversion algorithm for incoherent scattering[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008, 23(1): 74-78. (in Chinese)
- [3] 姬红兵,王 玮,李 林. 高纬极区 D、E 层等离子体 非相干散射谱研究[J]. 电波科学学报, 2010, 25(5): 953-959.

JI Hongbing, WANG Wei, LI Lin. Incoherent scattering spectra of plasma in the D, E region of high latitude auroral ionosphere[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2010, 25(5): 953-959. (in Chinese)

[4] MARKKANEN J, LEHTINEN M, LANDGRAF M. Real-time space debris monitoring with EISCAT[J]. Advances in Space Research, 2005, 35 (7): 1197-1209.

- [5] SATO T, IKEDA K-I, KIMURA I, et al. Shape of space debris as estimated from radar cross section variation[J]. Journal of Spacecraft and Rocket, 1994, 31 (4): 665-670.
- [6] PORTEOUS J, SAMSON A M, BERRINGTON K A, et al. Automated detection of satellite contamination in incoherent scatter radar spectra [J]. Annales Geophysicae, 2003, 21 (5): 1177-1182.
- [7] Satellite Catalog(SATCAT) Search Form [OB/OL]. http://celestrak.com/satcat/search.asp.
- [8] 龚万骢.业余无线电通信卫星的魅力[J].现代通信, 2009,29(1):48-49.
- [9] 薛福兴,杨晓燕. 空间碎片研究概况[J]. 国际太空, 2004,27(5):14-19.
  Xue Fuxing Yang Xiaoyan Study on general situation of space Debris[J]. Space International 2004, 27(5): 14-19. (in Chinese)
- [10] 宋正鑫,唐 辉,胡卫东. 基于相控阵雷达波束篱笆的空间碎片数量与分布估计方法[J]. 空间科学学报,2007,27(4):321-326.
  SONG Zhengxin, TANG Hui, HU Weidong. A method for estimating space debris population and distribution based on phased array radar fence[J]. Chinese Journal of Space Science, 2007, 27(4): 321-326. (in Chinese)
- [11] MARKKANEN J, JEHN R. EISCAT space debris during the IPY [C] // 14<sup>th</sup> International EISCAT Workshop 2009.
- [12] 童国梁. 空间碎片问题的现状和未来[J]. 现代物理知识, 2008, 20(2): 36-31.
  TONG Guoliang. Problem of space debris present and future[J]. Modern Physics, 20(2): 36-31. (in Chinese)
  [13] 龚松波,徐敏强,崔平远,等. 基于解体事件的空间
  - [3] 異松波, 保敏强, 崔平远, 守. 茲丁肼体事件的空间 碎片轨道演化算法研究[J]. 空间科学学报, 2005, 25(4): 304-308.
     GONG Songbo, XU Minqiang, CUI Pingyuan. An algorithm for the orbital evolution of space debris from breakup events[J]. Chinese Journal of Space Science, 2005, 25(4): 304-308. (in Chinese)
- [14] 李灿安, 庞宝君. 空间碎片的密度算法研究[J]. 空间科学学报, 2008, 26(6): 522-530.
  LI Shanan, PANG Junbao. Research on the spatial density algorithm of space debris[J]. Chinese Journal of Space Science, 2008, 26(6): 522-530. (in Chinese)



金 旺 (1976—),男,山东 人,现为西安电子科技大学无线电 物理专业博士生,主要从事非相干 散射雷达相关方面的研究



吴健 (1962-),男,安徽 人,中国电波传播研究所研究员,博 士生导师,主要从事空间物理与电 波传播方面的研究。



吴振森 (1945-),男,湖北 人,西安电子科技大学教授,博士生 导师,主要从事电磁波传播相关方 面的研究

### Space debris experimentation study using incoherent scatter radar

JIN Wang<sup>1</sup> WU Zhen-sen<sup>1</sup> WU Jian<sup>2</sup> LIU Yong-jun<sup>2</sup> SUN Ming-guo<sup>3</sup> XU Bin<sup>2</sup> LI Hui<sup>2</sup> ZHOU Liang<sup>4</sup>

(1. Department of Physics, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China;

2. China Research Institute of Radiowave Propagation, National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, Beijing 102206, China; 3. ChangChun Observatory National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun Jilin 130117, China; 4. Sodankyla

Geophysical Observatory, Fin-99600 Sodankyla Observatory, Finland)

Abstract This is the first space debris exploration experiment in China that use Europe Incoherent Scatter (EISCAT) Radar. Based on the principle of ionosphere exploration in EISCAT radar and space debris with high population, the match filter method is used to analyze debris data from Europe incoherent scatter radar expriment on March 25 2010, a 15 hour debris measurement, get 24 enents per hours, and by statistical analysis debris population height is got. The result shows that most debris target high locate at between 800 km and 1000 km, which shows good agreement with existent theory model of space debris high population, we run a 15 hour debris measurement, get 24 enents per hours, and compared the debris target information at 10:31:05 am March 25, 2010 with theory forecast debris model of National Astronomical Observatories Chinese Academy of Sciences, authenticated that debris target is discard communications satellite of United States, international designator is 1965-065F, errors in high is only 0.97 km, which verify that debris detection method used fixed ionsphere exploration pattern in incoherent scatter radar is feasible.

Key words incoherent scatter radar; space debris; match filter

作者简介