

空间碎片的 国际法治理

黄韵 著

KONGJIAN SUIPIAN DE GUOJIFA ZHILI



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NNUP.COM

东北师范大学出版社

空间碎片的 国际法治理

黄韵 著



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS

WWW.NNUP.COM

东北师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

空间碎片的国际法治理 / 黄韵著. -- 长春: 东北
师范大学出版社, 2017.11
ISBN 978-7-5681-2745-5

I. ①空… II. ①黄… III. ①太空垃圾—垃圾处理—国
际法 IV. ①D996.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 297301 号

☐ 策划编辑: 王春彦

☐ 责任编辑: 卢永康

☐ 封面设计: 优盛文化

☐ 责任校对: 肖茜茜

☐ 责任印制: 张允豪

东北师范大学出版社出版发行
长春市净月经济开发区金宝街 118 号 (邮政编码: 130117)

销售热线: 0431-84568036

传真: 0431-84568036

网址: <http://www.nenup.com>

电子函件: sdcbs@mail.jl.cn

河北优盛文化传播有限公司装帧排版

北京一鑫印务有限责任公司

2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 次印刷

幅画尺寸: 170mm×240mm 印张: 11.5 字数: 210 千

定价: 41.00 元

前言



随着人类空间活动的飞速发展，空间碎片的数量高速增长，空间密度在不断增加，这对人类探索和利用外层空间活动产生多方面的影响。就目前而言，空间碎片作为一种太空垃圾，已经成为一种新的环境污染。空间碎片如同悬在人类上空的“达摩克利斯之剑”，不仅对进入外层空间的空间飞行器的运行和航天员的安全造成威胁，也对地球上的人类活动产生多方面的影响。

目前，数以万计的空间碎片滞留在外层空间并呈现出不断增加的趋势，由于时至今日人类对空间碎片问题尚无破解之道，这一问题变得越来越突出。特别是国际法律规制层面，外空条约对空间碎片的治理显得力不从心，其他国际环境立法和习惯也不能对这一问题进行强有力的法律规制。

所以，本书立足于现有的国际法律基础，对空间碎片的预防、减缓、损害及责任等方面进行深入分析，以期从理论及实证等方面对空间碎片的国际法治理提出符合时代要求的创新性建议，同时为我国积极应对空间碎片问题提供有益的参考。

在本书的编写过程中，参考、借鉴了国内外许多专家学者的专著、论文和研究报告，在此对这些学者表示衷心的感谢。同时，对于本书中未列出的引用文献和论著，我们深表歉意，并同样表示感谢。由于时间及编者水平所限，本书难免存在不足之处，在本书出版之际，我们真诚地欢迎各位专家、读者对本书提出宝贵的意见和建议。



第一章 空间碎片问题概述	001
第一节 空间碎片的产生与分类	001
一、空间碎片的概念	001
二、空间碎片的特征	003
三、空间碎片的产生	004
四、空间碎片的分类	006
第二节 空间碎片的研究范畴与探测	007
一、空间碎片的研究范畴	007
二、空间碎片的探测	008
第三节 空间碎片的环境现状及危害	012
一、空间碎片的环境现状	012
二、空间碎片的危害	014
第二章 国际法律制度对空间碎片问题的规制	017
第一节 空间碎片的国内外研究现状分析	017
一、国外研究现状	017
二、国内研究现状	019
第二节 规制空间碎片问题的基本原则	021
一、外层空间环境保护的基础理论	021
二、规制空间碎片问题的基本原则	022
第三节 空间碎片减控的国际法律规范	027
一、外层空间法规范	027
二、联合国及其他国际组织相关国际文件	034
第四节 规制空间碎片所致环境问题的法律规范	037

第一章 空间碎片问题概述

探索和利用外层空间活动为人类的生存和发展带来了巨大的利益，并日益显示出美好的发展前景。与此同时，各种外层空间环境问题也随之而生。空间碎片（space debris）就是目前外层空间环境的最大问题之一，并对未来人类外层空间活动构成挑战和威胁。伴随空间碎片问题的发展，空间碎片日益引起国际社会重视，并成为影响国际关系的一个重要议题。

第一节 空间碎片的产生与分类

近年来迅速增长的空间活动将困扰人们四十多年的一个问题又摆上了桌面——空间碎片问题。事实上，自从苏联在 1957 年发射第一颗人造卫星后，近地轨道的人造污染日益成为严重问题。在过去短短的几十年中，虽然外空已经成为科学、国防和商业利用的重要资源。但是，人类的外空活动在给人类带来种种益处之时，也产生了越来越多的人造垃圾，即空间碎片，给人类的太空活动带来巨大的风险和危害。

一、空间碎片的概念

关于空间碎片的定义，理论界存在着各种各样的说法。我国著名空间法学者贺其治教授认为，空间碎片一般是指报废的空间物体、火箭遗弃物的各级装置、分离装置、护罩以及空间物体解体后的大小零件和颗粒等。荷兰空间法专家迪德里克斯·弗斯霍尔教授认为，现在国际组织一般认为当所有的燃料已经燃烧耗尽，并且无法再发挥其功能的空间物体被称为空间碎片。现行联合国框架下的国际空间条约以及其他国际条约都未给予空间碎片一个明确的定义。

联合国大会从 20 世纪 90 年代初就开始在其报告中提及空间碎片的问题，如 1990 年联合国大会通过的第 45/72 号决议、1991 年联合国大会通过第 46/45 号决议、1993 年联合国大会通过的第 48/39 号决议等多次呼吁各成员方要给予空间碎片问题

更多的重视。遗憾的是，上述所有文件都没有给空间碎片下一个明确的定义。根据1993年举行的联合国和平利用外层空间委员会第36届会议的决定，该委员会决定将空间碎片问题纳入其下辖的科学技术小组委员会会议议题的范围。在1994年举行的联合国和平利用外层空间委员会科学技术小组委员会第31届会议将空间碎片问题作为单独的议题列入了科技小组委员会议程中，第一次以官方文件的形式对空间碎片的概念给予初步的界定，定义强调了空间碎片的“人造性”和“非功能性”。

直到1999年，联合国和平利用外层空间委员会科学技术小组通过的《关于空间碎片的技术报告》对空间碎片的定义才逐渐趋同化。该报告在其序言第6段中指出：“空间碎片系指位于地球轨道或再入大气层不能发挥功能而且没有理由指望其能够发挥或继续发挥其原有功能或经核准或可能核准的任何其他功能的所有人造物体，包括其碎片和部件，且不论是否能够查明其拥有者。”虽然该报告对空间碎片的定义涵盖了空间碎片的大多数特征，但是仍然不够完善，而该报告也承认了这一点。在这之后，通过国际社会的不断努力，对空间碎片的界定逐渐形成了较为统一的认识。

基于空间碎片问题的复杂性和重要性，自20世纪80年代后期主要空间大国的空间管理部门开始加强对空间碎片问题的研究。在联合国和平利用外层空间委员会的多方支持下，美国、俄罗斯、欧洲空间局、日本于1993年发起创建机构间空间碎片协调委员会。

2003年的《机构间空间碎片协调委员会空间碎片减缓指南》以及2007年的《和平利用外层空间委员会空间碎片减缓指南》对空间碎片给出了几乎一致的定义，即“空间碎片是位于地球轨道上或再入大气层的非功能性人造物体，包括其碎片和零件。”这两个文件虽然没有法律拘束力，但其在空间碎片减控领域的权威性深深影响了各个空间国家，许多国家在制定本国空间碎片减缓标准的时候都纷纷沿用该定义。这也使得理论界和国际社会对空间碎片的认识更趋于一致。

尽管在目前国际法律框架下，难以界定何为空间碎片和在什么条件下一个物体被称为空间碎片，但人们普遍讨论的空间碎片问题主要针对的是人为产生的空间碎片而不包括自然界的天然物体。综合以上结论，我们可以把空间碎片定义界定为：散布在近地轨道和同步轨道上的非功能性的人造物体。这一定义的界定突出了以下两个特征：第一，空间碎片的非功能性，即空间碎片是不再具有任何功能的物体；第二，空间碎片的人造性，空间碎片不是外层空间中自然存在的，而是由人类发射空间物体之后留在外层空间中的物体。

二、空间碎片的特征

根据以上对空间碎片概念界定的分析,空间碎片作为非功能性的人造空间物体具有以下特殊的性质特征。

(一) 空间碎片的人为性

空间碎片主要来源于人类所制造的空间物体(运载工具、空间飞行器以及航天员所用各类物品)在发射和运行过程中的碰撞、解体、爆炸后或完成任务后遗留在轨道上的各类喷射物、组件、碎块和抛弃物等。作为人类探索外层空间活动的副产品,空间碎片的人为性是其源于人类外层空间活动。

(二) 空间碎片所有者的相对模糊性

由于空间碎片产生的不可抗拒性和其活动的不稳定性,造成确认其身份的难度增加。空间碎片种类各异,大小不一,特别是直径小于10厘米的空间碎片由于成本效益等众多原因难以确定其所有者。

(三) 空间碎片的非功能性

非功能性是区分空间碎片和正在执行其任务的空间物体的根本区别所在。非功能性也意味着不可控性,如果某一空间飞行器由于某种原因而导致人类对其失去控制,那么纵然其部分仪器仍在运转,此时的该空间飞行器也应该被视为非功能性的空间物体,从而归入空间碎片的范畴。

(四) 空间碎片具有极大的危害性

空间碎片之所以引起国际社会的重视,是因为空间碎片的大量存在会对人类外层空间活动包括外层空间环境产生极大的危害。这种危害主要表现为两方面:一是对空间飞行器的撞击损害。轻度撞击可能造成空间飞行器故障,严重的撞击可能导致空间飞行器报废,宇航员的生命也会受到威胁。一个只有0.04毫米的空间碎片就可以使航天飞机的舷窗更换,0.1毫米的碎片能够穿透宇航员的航天服,1.0毫米的空间碎片就可以穿透加固的航天飞机翼翅前段的碳板,3~5厘米的碎片就可以在航天飞机保温装置镶板上戳出洞,而1~10厘米的碎片就可以对航天飞机的有效载荷产生严重的损害。二是对外层空间环境的污染。由于许多空间飞行器以核能为动力,在其陨落时会产生放射性物质的扩散。这种扩散不但会对外层空间环境产生污染,还可能对地球上的人类及其环境产生影响和损害。

除以上特征外,空间碎片还具有数量繁多、增长迅速以及分布不均匀性。就目前外层空间碎片分布而言,在距离地球表面1000千米以下的近地轨道上的空间碎片最多。此外,空间碎片也是可以消除的,如因地球重力和大气阻力导致空间碎片进

入大气层而销毁外，也是可以协助清理空间碎片的，只是由于成本过高而成为一个难题。同时，有些国家出于军事以及信息安全的考量，对于空间碎片追踪和减缓的技术和信息不愿与其他国家共享。国际合作所面临的不同的利益诉求也成为空间碎片追踪和清理的一大障碍。

三、空间碎片的产生

空间碎片是人类空间活动的产物。自人类向外层空间发射第一颗人造卫星以来，人类进行的空间发射数以千计，送入空间并曾经被跟踪观察的物体数以万计。目前，可被地面观察设备观测并测定其轨道的空间物体有 9 000 多个，其中只有 6% 是仍在工作的空间飞行器，其余均为空间碎片。据联合国《空间碎片减缓指南修订草案》对空间碎片来源的界定，空间碎片包括空间飞行器意外解体 and 有意自毁产生的长期存在的碎片和运载火箭和空间飞行器运行过程中有意释放的碎片。预计碰撞产生的残块将成为空间碎片的一个重要来源。

在空间碎片中，火箭箭体主要指星箭分离后的火箭上面级；失效航天器即过了服役寿命的航天器，目前在地球轨道运行的有上千个失效航天器；任务相关碎片是指在正常的航天活动中有意释放的物体，通常数量比较少；碎裂碎片是空间碎片的最主要来源，碎裂类型可以分为卫星解体和卫星异常事件等。卫星解体泛指轨道载荷或者火箭箭体发生破坏性的分裂，解体喷射物通常具有很高的速度，解体原因可分为撞击和爆炸两种，解体行为可能是偶然的也可能是人为的，前者如推进系统故障引发的爆炸，后者如空间武器试验。卫星异常事件是指卫星保护层、太阳电池阵、热防护等卫星部件材料由于退化或遭受小粒子撞击而发生的意外剥落，剥落物体通常速度较低，同时卫星基本上仍保持完整。从一定角度看，卫星解体可视为人类活动对环境的一种影响，而卫星异常则可视作空间环境对人造物体的一种作用。

也就是说，空间碎片分别由四种不同类型的物质构成——非活动性有效荷载、运营碎片、碎裂碎片、微粒物质。这四类对空间环境的危害程度依次减弱，其中碎裂碎片构成空间碎片数量的绝大多数，它由碰撞和爆炸后产生的碎片构成。

概括而言，空间碎片的产生主要是空间物体的爆炸和碰撞。两者都可以是意外的或有意的行为所造成。此外，空间碎片之间的碰撞也产生新空间碎片。空间大国为了防止其军事卫星中的技术泄漏而在卫星使用结束后进行有意地爆炸，从而产生大量空间碎片。1998 年 2 月，美国政府证实了其一直在进行反卫星激光技术的试验。这就表示有意的空间物体爆炸还在继续发生。1998 年 3 月，美国宣布将开发弹道导弹防御系统，该系统可以“发现导弹发射，对之进行跟踪，并发射导弹摧毁进入空

气空间的外来武器”。使用此种系统会导致外来进入的导弹和系统发射的摧毁导弹高速碰撞,产生大量碎片。所以,此种系统的试验和投入使用都会导致大量碰撞碎片的产生。这种空间碎片产生的方式属于有意地碰撞之列。

意外的碰撞一般是指失去控制的空间物体撞击其他失去控制的物体或者是与其他正常运转但无法操纵脱离该失控卫星危险轨道路径的物体相撞。此外,虽然经过事先的认真计划可以使载人航天器和受控卫星避开危险轨道,但是许多物体由于直径小于10厘米而没有被地面系统跟踪观察,使得雷达中显示的物体数量要远远小于近地轨道中实际存在的物体数量。所以,许多碰撞都是无法得到事先的警告或说明就发生的。

意外的爆炸是由推进系统的故障产生的。有时是因为物体中分开置放的不同种类的挥发性燃料泄漏而互相接触混合而发生的。美国的德尔塔、大力神和阿金纳等火箭的爆炸都是由于上述故障引起的大规模爆炸事故。1986年的欧洲航天局阿里安火箭爆炸事件也可能是推进系统的故障引起的。有些爆炸是在航天器发射后若干年由于火箭剩余的燃料自爆引起的。到20世纪80年代,美国设计的火箭都在其完成使命后把燃料烧尽,以防止此类事故的发生。

此外,碰撞和爆炸是有联系的。据估计,一次剧烈的碰撞和爆炸可能产生10000颗直径大于1厘米的微粒和100万颗直径大于1毫米的微粒以及成千上万颗粒子。迄今空间碎片主要是由于苏联的反卫星武器试验和美国的火箭爆炸事故造成的。因此,专家们认为,“苏联和美国对制造现有的地球轨道上的碎片负有大致相等的责任。”

空间碎片之间的碰撞也是产生空间碎片的一个原因。Kessler效应,也被称为“级联效应”或“瀑布效应”(cascade effect)^①。当空间碎片的数量到达一定临界点之时,一个碰撞就会引发瀑布般的自动进行且无法停止的连锁碰撞反应。这些连续不停地碰撞会产生包围地球周围的、无法穿越的碎片云。严重情形下将使外空飞行无法进行,阻碍人类对外空的开发和探索。如果不采取国际协作减少空间碎片,那么这种情况的发生只是时间迟早的问题。在现在已经异常拥挤的近地轨道区域,空间碎片的数量将可能会最先达到发生级联效应的临界点。虽然计算机模型无法做出精确的预言,但是近地轨道的空间碎片临界数量可能在今后的100年之内发生。一旦这种碰撞发生,连续的碰撞链条人为无法停止,而且一旦发生这种碰撞,人类将在以后的数百年内无法使用外层空间,直至这种碰撞产生的空间碎片最终落入大气层燃烧消失。

^① 斯蒂芬·全球变化与地球系统:一颗重负之下的行星[M].北京:气象出版社,2010:312-313.

四、空间碎片的分类

一般将空间碎片分为四种类型，包括：非活动性有效荷载（inactive payloads）、运营型碎片（operational debris）、碎裂型碎片（fragmentation debris）和微粒物质（micro particulate matter）。非活动性有效荷载包括丧失功能的或不再受控制的卫星。运营型碎片主要是在发射空间物体过程中释放的物体，包括废弃的火箭级、爆炸的螺栓、卫星进入轨道之前安放在发射装置上的物体和护罩等。碎裂型碎片占空间碎片数量中的绝大多数，由碰撞和爆炸后产生的碎片构成。微粒物质的产生则包括固体火箭燃料燃烧产生的颗粒物质以及物体表面剥落的漆皮。

空间碎片也可以根据大小分为三类：其一，直径超过 10 厘米的大型物体；其二，直径介于 10 厘米和 1 毫米之间的中型物体；其三，直径小于 1 毫米的小型物体。美国国家航天局只跟踪观测直径超过 10 厘米的空间碎片，对于小于此的空间物体并非没有能力进行跟踪观测，而是需耗费更大的财力并且难以识别这些物体的来源国。

还有一种分类方式就是将空间碎片分为可以识别来源国的空间碎片和不能够识别来源国的空间碎片，或称可识别身份的空间碎片和不能识别身份的空间碎片。如果国际社会知道某一空间碎片由何国负责发射进入太空，则该空间碎片为可以识别来源国的空间碎片。可识别性要求对物体的发射进行准确的登记并且对该发射进入轨道的物体进行持续的跟踪。几个大型的地面跟踪站在 2000 年即跟踪到大约 10 000 个空间物体。可想而知，现在跟踪观测到的空间物体应该更多。

美国航天司令部 1957 年以后，曾运用跟踪技术对空间物体进行编目。然而，这些部门对直径小于 10 厘米的空间碎片没有进行跟踪。所以，大部分的空间碎片——直径小于 10 厘米的碎片就无法识别其来源国。对小型空间碎片不进行跟踪并非因为技术条件的限制。美国的 Haystack、Haystack Auxiliary（HAX）和 Goldstone 雷达装置能够跟踪到距离地球表面上 1 000 千米处直径为 5 毫米的轨道碎片。各个国家的相关部门一般都是在“直径 10 厘米的碎片”处划出一道分界线，对该分界线以下的小型碎片不进行相关的跟踪和编目。

其实，即使美国政府使用其 HAX 雷达系统对更小的物体进行跟踪，也并不意味着就能够识别出这些碎片的身份或来源国。之所以难以识别，是因为这些小型碎片通常都是由轨道上大型碎片之间的碰撞和爆炸所产生的。轨道上的碎片越积越多而产生碰撞时，就会产生新的更小的碎片，发散到各个方向。所以，跟踪这些微小碎片、辨明其所属国将是一个异常复杂和繁重的任务。

第二节 空间碎片的研究范畴与探测

伴随人类和平开发利用外空资源步伐的加快和航天发射活动的日益频繁,空间碎片环境正日趋恶化,时至今日,空间碎片问题已成为全球共同面临的空间环境污染问题。如再不采取有效措施遏止空间碎片数量的增长和空间碎片环境的进一步恶化,空间碎片环境问题终将成为人类航天活动和可持续和平开发利用外空资源的根本制约因素。

一、空间碎片的研究范畴

按机构间空间碎片协调委员会(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, 简称 IADC)技术工作组的划分,空间碎片问题研究分为探测(measurements)、环境及数据库(environment and data bases)、防护(protection)和减缓(mitigation)四个技术领域。

目前,M/OD 探测是指通过各种地基和天基探测手段获取 M/OD 环境信息的方法和技术,包括厘米级以上大空间碎片探测和厘米级以下微小 M/OD 探测两个方面。目前,大碎片探测主要依托地基雷达和望远镜等探测手段实现,而且已基本可对 LEO (Low Earth Orbit) 区尺寸 10 厘米以上和 GEO (Geosynchronous Orbit) 区尺寸 0.5 m 以上的碎片进行跟踪、定轨和编目。地基探测研究涉及的主要内容包括:地基雷达探测技术研究;地基望远镜探测技术研究;空间碎片精密定轨技术研究。

天基探测是目前获取毫米级以下微小尺寸 M/OD 信息最主要的手段,包括天基碰撞感知探测、暴轨碰撞表面样品回收分析和天基遥感探测等。基于天基探测数据,并结合地面超高速碰撞模拟实验标定分析,基本可获得 M/OD 尺寸、速度、密度或通量等分布信息。天基探测研究涉及的主要内容包括:天基直接碰撞感知探测器技术研究;暴轨碰撞表面样品回收分析及标定技术研究;天基遥感探测技术研究。

M/OD 环境及数据库研究,包括 M/OD 环境建模和编目空间物体动态数据库建立两个方面。M/OD 环境建模是指采用适当的数学方法,建立空间碎片环境短期工程模型、长期演化模型及微流星体环境模型。短期工程模型是一种半经验模型,主要基于各类探测统计数据而建立,而不考虑碎片来源、演化和消亡等因素。长期演化模型则属半确定性模型,除探测数据外,还考虑了未来发射事件、泄漏事件及在轨解体事件等碎片“源”,以及大气阻力、日月摄动、太阳辐射压力和减缓措施等碎片

“沉”两方面因素的影响。针对动态数据库建立问题,主要是基于地基和天基探测数据,采用适当的编目方法,建立可跟踪和定轨的空间物体尺寸、速度、轨道等信息的动态编目数据库。M/OD 环境及数据库研究涉及的主要内容包括:空间物体编目方法及动态数据库技术研究;M/OD 环境建模方法研究;M/OD 环境模型代码编制技术研究。

M/OD 防护研究主要包括被动结构防护、主动规避防护和风险评估等几个方面。被动结构防护主要是针对 1 厘米以下微小 M/OD 超高速碰撞而采取的防护措施。这类空间粒子不仅数量庞大,而且无法逐一跟踪、定轨和规避,只能通过航天器上设置防护结构的方法进行防护。M/OD 结构防护设计,首先是基于 M/OD 环境模型,对特定运行姿态和轨道下的航天器遭遇 M/OD 碰撞的概率分布进行评估分析,然后结合基于 M/OD 超高速碰撞数值模拟和地面超高速碰撞模拟实验所建立的各种防护构型的弹道极限方程和失效准则,选择和确定 M/OD 防护结构方案。M/OD 结构防护设计涉及的主要内容包括:M/OD 超高速碰撞力学行为数值模拟研究;M/OD 地面超高速碰撞模拟实验发射技术研究;M/OD 防护构型碰撞特性及防护性能模拟实验研究;M/OD 风险评估及防护设计分析系统代码编制技术研究。

主动规避防护主要是针对尺寸 10 厘米以上的编目空间物体碰撞而采取的轨道机动措施。基于地基空间监视网的精密跟踪和定轨,判定和预警航天器尤其是国际空间站(ISS)、载人飞船、航天飞机等载人航天器,是否存在遭遇危险空间碎片碰撞的风险和是否需要实施轨道机动避免灾难性碰撞事件的发生。空间碎片主动规避防护研究涉及的主要内容包括:危险空间物体筛选方法及规避判定准则研究;轨道规避策略及技术措施研究;碰撞预警及规避分析系统代码编制技术研究。

空间碎片减缓研究主要是通过减缓标准的制订和减缓技术措施的实施,最大限度地减少和限制航天发射活动空间碎片的产生,治理业已在轨的空间碎片,有效抑制空间碎片的生长,从而达到保护空间环境和外空轨道资源的最终目的。空间碎片减缓研究涉及的主要内容包括:空间碎片减缓技术标准研究;空间碎片减缓管理标准研究;空间碎片减缓技术措施研究。

二、空间碎片的探测

(一) 地基雷达探测

地基雷达属有源探测设备,利用雷达回波反射信号实现对空间碎片的探测,具有搜索、发现空间碎片能力强,跟踪、定轨精度高以及全天候全天时探测等技术优势。但由于雷达回波反射信号强度与距离的四次方成反比,同时雷达信号受地杂波、

大气损耗以及发射功率、工作波长等因素的影响和制约,一般难以对远距离(如中高地轨道)空间物体进行有效探测,从而也决定了地基雷达探测手段的某些应用局限。目前,地基雷达是获取 LEO 区域内尺寸 10 厘米以上空间碎片最主要的手段。

地基空间碎片探测雷达主要有精密跟踪成像雷达和相控阵雷达两种。精密跟踪成像雷达是一种机械扫描雷达,利用抛物面反射天线机械控制方式实现脉冲波束定向,因而只有当空间碎片(物体)出现在天线指向视场内时才能被探测到,搜索和发现新空间碎片的能力较弱,主要用于空间碎片跟踪、成像和定轨。不同于依靠改变天线瞄准方向实现波束指向的机械扫描雷达,相控阵雷达通过数字电子方式改变辐射器的相位使雷达波束指向预定的搜索范围,可以同时探测不同方向上的多个空间碎片,是目前用于搜索、发现和跟踪新空间碎片的主要地面设施和手段。

地基雷达按天线配置方式的不同,分单基(收发合置)雷达和双基(收发分置)雷达两种类型,工作模式分跟踪、凝视(波束驻留)和混合(凝视-跟踪)三种。在跟踪模式下,雷达对空间碎片跟踪一段时间后,即可获得其雷达回波角方向、距离、速度、振幅和相位等信息,通过对角速度、临近速度及方向的估算,可准确获得其轨道要素(或轨道根数)信息。在凝视模式下,雷达天线被固定在某一方向,从接收到的穿越波束视场的碎片回波信号获取碎片数目和体积等信息,但所获轨道要素信息不是很精确。在混合模式下,雷达先以凝视模式工作,当有碎片穿越波束视场时便立即转入跟踪模式,以获得更精确的轨道要素信息。一旦获得轨道要素信息后,随即又返回凝视模式。地基雷达探测可获得的空间碎片特征信息包括:轨道要素,描述碎片质心绕地球运行特征信息;姿态,描述碎片绕质心运行特征信息;体积、形状、质量和材质;弹道系数,描述碎片轨道半长轴衰减速率特征信息。

一般说来,探测能力为 4 000 千米轨道高度 1 平方米的雷达,可同时完成对近地点轨道高度低于 500 千米、尺寸 10 厘米以上空间碎片和近地点轨道高度低于 1 000 千米、尺寸 30 厘米以上空间碎片的有效探测,而要实现尺寸 10 厘米以上空间碎片的完备探测,则需要探测能力为 10 000 千米轨道高度 1 平方米的雷达。目前,国外某些地基雷达已具备探测 1 000 千米以下轨道高度区域内尺寸 1 厘米以上空间碎片的能力,但这并不意味着能对这一尺寸的碎片进行精密跟踪和定轨。事实上, NASA 目前可以实现例行日常监测和定期发布编目的也仅限于尺寸 10 厘米以上的空间碎片,至于更小尺寸的空间碎片虽有可能探测到,但并不能保证例行日常跟踪和定轨。

(二) 地基望远镜探测

地基光电望远镜属无源探测手段,是透镜望远镜与光电探测器的集成设备,主要用于对远距离空间碎片的高分辨率成像和观测。与所有望远镜一样,光电望远镜