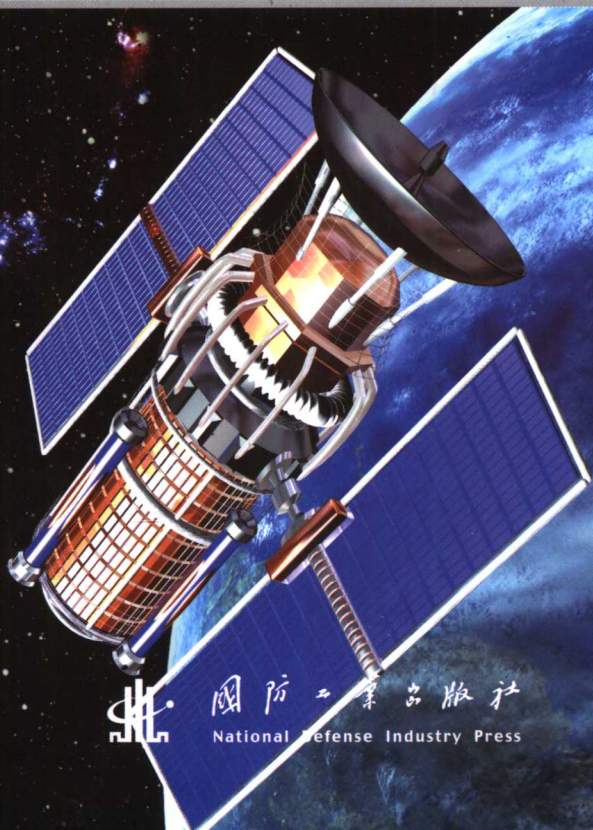




SHIJIE TIANJI LEIDA JISHU FAZHAN GAIKUANG

世界天基雷达技术 发展概况

主 编 丛力田
主 审 沈 齐



國防工業出版社
National Defense Industry Press

世界天基雷达技术 发展概况

主 编 丛力田
副主编 谭怀英 刘 波
主 审 沈 齐

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书从分析世界天基雷达技术发展情况入手,重点研究发展天基雷达的关键和难点技术。第2章天基雷达发展现状,主要介绍美国、俄罗斯、法国、日本等国家发展天基雷达情况;第3章天基雷达关键技术,简要阐明发展天基雷达面临的技术难点;第4章天基雷达探测技术体制分析,是本书的重点内容,根据空间目标、空中目标、海面目标、地面运动目标和地面静止目标等不同探测对象的目标特性,分析研究了相应的天基雷达探测技术体制和工作机理。

图书在版编目(CIP)数据

世界天基雷达技术发展概况 / 丛力田主编. —北京:
国防工业出版社, 2007. 2

ISBN 978 - 7 - 118 - 04923 - 7

I. 世... II. 丛... III. 雷达—技术发展—概况—
世界 IV. TN95

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 153955 号

※

国防工业出版社出版

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 4 3/4 字数 120 千字

2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 15.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

天基雷达是一种全新体制的雷达,天基雷达技术研究是当今世界最前沿科学领域之一。随着高分辨率微波成像技术的发展,天基预警雷达正在成为红外和可见光探测之外的重要观测手段,同时星载空中监视雷达也有着地面和机载雷达无可比拟的优势,世界各科技强国都在这一领域积极攻关,开展天基雷达应用、雷达体制及关键技术研究。天基雷达在国外一直是一个重要的研究方向,尤其是在空中目标监视这一领域的波段选择、技术体制、天线形式、信号处理方式、供电方式和系统的最优化设计等各方面都有着较为深入的探讨,并形成了一些具体的总体技术方案,预计在 21 世纪初将会有工程化的产品问世。因此,广泛收集、认真整理、科学分析、深入研究世界天基雷达技术发展和实际应用信息,是一项十分重要的工作,不但可以紧紧跟踪天基雷达最新发展动态,而且能为我国天基雷达技术研究和实用装备发展提供有益借鉴和参考。

本书全面、详细地介绍了世界天基雷达技术发展情况;归纳总结了发展天基雷达的关键和难点技术;根据空间目标、空中目标、海面目标、地面运动目标和地面静止

目标等不同探测对象的特点,分析并研究了相应的天基雷达探测技术体制和工作机理。主编丛力田负责全书纲目编撰、参考文献搜录、内容整合及第1章~第3章和第5章编写;副主编谭怀英负责编写第4章的4.1节和第4.2节,副主编刘波负责编写第4章的4.3节~4.5节。在编写过程中,我们得到中国航天科技集团航天工程咨询中心杨锐和航天四十七所科技信息中心王照斌研究员的大力协助,空军装备研究院雷达与电子对抗研究所总工程师沈齐、副总工程师吴铁平对全书进行了审阅,高英高级工程师和李建勋工程师参加了全书文字、图表编辑修改工作,郭建明高级工程师、李一梅高级工程师在该书出版过程中给予了大力指导和帮助,在此表示衷心的感谢。本书可作为研究天基雷达技术、制定天基雷达发展规划的重要参考,也可作为相关专业技术人员和高等院校师生的专业参考书。

由于作者水平有限,收集的资料也不够全面,书中难免会存在不妥之处,请专家和读者给予指正。

作 者

2006年11月

目 录

第 1 章	概述	1
第 2 章	天基雷达发展现状	3
2.1	国外天基雷达发展情况	3
2.1.1	天基合成孔径雷达(SBSAR)发展情况	3
2.1.2	天基高度计发展情况	29
2.1.3	天基激光雷达发展情况	33
2.1.4	其他类型天基雷达发展情况	41
2.2	中国天基雷达发展情况	44
第 3 章	发展天基雷达的关键技术分析	46
第 4 章	天基雷达探测技术体制	48
4.1	探测空间目标的技术体制	48
4.1.1	空间目标的特性	48
4.1.2	空间目标探测雷达类型	50
4.1.3	空间碎片探测雷达的基本原理	51
4.1.4	空间碎片探测雷达的特点	52
4.1.5	天基雷达观测空间碎片的研究现状	54
4.1.6	探测空间碎片的的天基雷达关键技术分析	57
4.1.7	天基空间碎片雷达的技术体制	61
4.1.8	天基空间碎片雷达探测方案的初步考虑	62
4.2	天基雷达探测空中目标的技术体制研究	64
4.2.1	空中目标的 RCS 特性	64

4.2.2	天基雷达探测空中目标的基本要求	67
4.2.3	天基雷达探测空中目标的关键技术分析	68
4.2.4	探测空中目标的天基雷达战技指标分析	73
4.2.5	探测空中目标天基雷达的几种技术体制	80
4.3	天基雷达探测海面目标技术体制	98
4.3.1	目标反射特性	98
4.3.2	目标检测方法	99
4.3.3	SAR 系统检测船只及尾迹的技术和算法	100
4.4	天基雷达探测地面运动目标技术体制	101
4.4.1	天基雷达实现地面动目标指示(GMTI)的基本方法	102
4.4.2	杂波抑制技术	103
4.4.3	几种天基 SAR/GMTI 应用实例	108
4.5	天基雷达探测地面静止目标技术体制	111
4.5.1	合成孔径雷达的基本原理及成像算法	111
4.5.2	合成孔径雷达的其他几种工作模式	120
第 5 章	结束语	129
	参考文献	130

第 1 章 概 述

航天飞行器不受国家主权限制,可在全球外层空间自由运行,为实施天基侦察探测提供了有利条件,因此世界各国竞相研究和
发展航天侦察探测手段,特别是进入 21 世纪以来,太空竞争愈演愈烈,预计到 2030 年前后,太空战将成为新的战争模式,谁控制了太空谁就控制了世界。美国已把夺取太空使用控制权作为巩固其世界霸主地位的新目标,仅空军平均每年就要投入 200 多亿美元经费,研究、开发各种太空侦察探测设备、太空战新概念武器装备以及相关重点、难点技术。2005 年 3 月美国国防部制定的“国家防御战略”明确提出的战略目标是:利用太空“确保我们能够抵达和利用太空,同时阻止敌人对太空的恶意开发行为”;航天大国俄罗斯,在国内经济形势不断好转的情况下,为抗衡美国的威胁,从 2000 年开始恢复航天发射,并每年投入几十亿美元,在保证太空基本安全的前提下,重点跟踪最新航天技术,发展具有威慑作用的太空探测手段和天战武器;欧盟、日本、印度、韩国、以色列以及中国台湾地区出于地区战略需要,努力发展拥有自主技术的航天运载手段和应用装备;加拿大、澳大利亚、南非、巴西、泰国等也在积极筹划建立本国的军用航天系统,力图在新世纪太空竞争中占有一席之地。我国作为发展中的政治、经济和军事大国,在发展太空技术方面,面临着地区性和全球性双重竞争压力,要想在 21 世纪太空战中立于不败之地,必须在航天领域中紧紧追踪前沿技术,切实把准发展方向,努力掌握主动权。

天基探测技术是航天技术尤其是天基综合信息网的重要组成部分,是太空制胜的基础和前提,也是当今发展最快、竞争最激烈的技术领域之一。天基探测可分为红外探测、可见光探测和雷达

探测三种基本手段。其中,天基雷达探测手段具有不受昼夜限制和气候影响的独特优势,并可借助电磁波的穿透能力探测伪装覆盖下、甚至地下数米深的目标,其军事用途越来越受到各国的重视。天基雷达是以天基平台为依托,利用电磁波(包括激光)探测目标的电子装置。根据探测目标类型不同,天基雷达的技术体制、功能设计以及主要技术指标均有较大差别。如:观测地形地貌、海况变化、气象云雨及地面动目标对天基雷达的要求就有较大不同,而天基雷达的体制和技术性能也有所不同。天基雷达(SBR)的概念最早于 20 世纪 60 年代出现在美国。1972 年美国的“阿波罗 - 17”登月宇宙飞船在世界上第一次将天基合成孔径雷达(SBSAR)应用于外层空间物体探测,从那以后天基雷达技术获得了迅速发展。从目前和未来 20 年发展看,天基雷达主要用于对地球表面测绘、对地面和海面目标侦察监视、对空中目标探测观察、对空间目标探测跟踪以及用于高度测量和空间物体间交会定位等,其最终目标是把目前的空中雷达监视系统,如机载预警和监视系统(AWACS)和对地联合监视与瞄准雷达系统(JSTARS)的任务转移到空间,利用天基雷达轨道自由、视野宽阔、不受气候限制的优势,实现对海、地、空、天一体化不间断的监视侦察。天基雷达使用的频段主要是 L 频段、C 频段和 X 频段,对高精度探测则扩展到毫米波段,而激光雷达的波长则在 300nm ~ 1100nm 之间。

本书重点研究天基雷达探测太空目标、空中目标、海面目标和地面目标的不同技术体制,并就各种体制的关键技术进行讨论,力求从总体上对天基雷达探测技术体制、应用情况和发展趋势进行科学的分析、归纳、研究,对我国天基雷达发展提出建议。

第 2 章 天基雷达发展现状

目前,从世界范围看,已投入使用或准备投入使用的天基雷达主要有星载合成孔径雷达(SAR)、星载高度计(Altimeter)和星载激光雷达。其中,星载合成孔径雷达和星载高度计在技术上更成熟,应用上更广泛。同时,星系、星座和星群雷达组网探测技术研究已进入了体制试验阶段,地一天、空一天、天一天双/多基地雷达探测技术也已进入体制研究阶段。天基雷达技术研究已成为当今世界竞争十分激烈的科技领域。

2.1 国外天基雷达发展情况

目前,世界上有北美、欧洲和东亚地区近 10 个国家掌握了天基雷达技术。美国是天基雷达技术研究水平最高、实际应用最多的国家,至今整体技术水平仍比其他国家超前 10 年以上。例如:在天基雷达体制研究、关键设备和器件、大型天线、探测精度、航天器隐身和防护等方面均处于无可争议的领先地位,这也成为美国建立称霸太空战略的重要支柱。

2.1.1 天基合成孔径雷达(SBSAR)发展情况

2.1.1.1 美国天基合成孔径雷达

美国的天基合成孔径雷达是 20 世纪 70 年代以后才得以发展的,第一个天基载体是宇宙飞船,1972 年美国的“阿波罗”-17 宇宙飞船首次在外层空间使用合成孔径雷达,开创了天基合成孔径雷达发展的新篇章。1978 年美国“海洋”(Seasat)卫星的成功发

射标志着星载 SAR 已经走向实用阶段;进入 20 世纪 80 年代,美国宇航局又对星载合成孔径雷达进行了多次试验性研究,先后在航天飞机上安装使用了合成孔径雷达;到了 20 世纪 90 年代,面对世界各科技强国纷纷发展自己的天基探测系统的局面,为阻止其他国家对关键技术的研究,保持自己的技术领先地位,美国开始以提供关键技术为诱饵,参与欧洲盟国的天基雷达研究项目,先后与德、意两国合作,成功地将联合研制的多频段、多极化星载合成孔径雷达发射入轨,并制定了新的联合研究发展计划。

1. “海洋”一号(Seasat - A)合成孔径雷达

1978 年 5 月美国航宇局(NASA)发射了“海洋”一号卫星(Seasat - A),如图 2-1 所示。虽然星载雷达只工作了 99d,便因故障失效,但却开创了首次在卫星上装载实用性合成孔径雷达的记录。星载合成孔径雷达对地球表面 1 亿 m^2 的面积进行测绘,获得了大量过去未曾得到的图像信息。

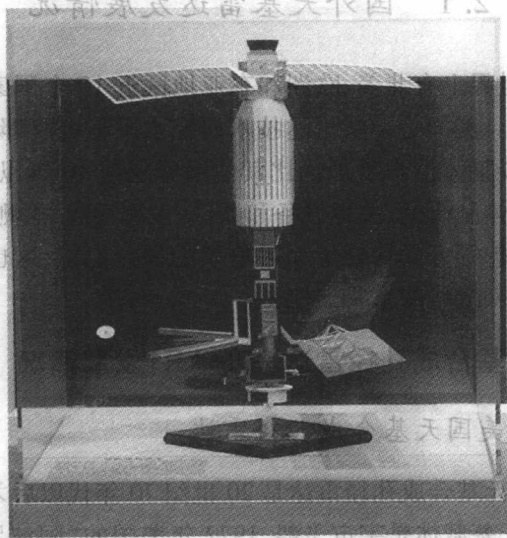


图 2-1 “海洋”一号(Seasat - A)合成孔径雷达卫星

表 2-1 Seasat - A 主要性能

波段(波长/cm)	L(23.5)	扫描带宽/m	100
频率/GHz	1.275	处理(O光学,D数字)	O,D
天线	共形	噪声当量 σ°/dB	-24
尺寸/m	10.7 × 2.16 (长 × 高)	高度/km	800
极化方式	HH	倾角/($^{\circ}$)	108
入射角度/($^{\circ}$)	23	下引线数据率/ $\text{Mb} \cdot \text{s}^{-1}$	110
距离分辨能力/m	25	重访周期/d	17,3
方位角分辨/m	25	在轨道运行时间/min	10
视数	4		

2. SIR - A 和 SIR - B 成像雷达

SIR - A 和 SIR - B 均为航天飞机成像雷达。1981 年 11 月 12 日,美国在“哥伦比亚”号航天飞机上安装了 L 波段单频、单极化工作的 SIR - A 合成孔径雷达,目的是开展天基成像侦察合成孔径雷达技术体制试验;根据 SIR - A 雷达的试验结果,1984 年美国又将改进后的、性能更先进的 SIR - B 合成孔径雷达安装在“挑战者”号航天飞机上。SIR - A 和 SIR - B 的试验成果对美国后来的星载合成孔径成像侦察雷达的发展和應用起到了重大促进作用。见表 2-2。

表 2-2 SIR - A 和 SIR - B 合成孔径雷达主要性能

名称	发射日期	高度/km	入射角/($^{\circ}$)	空间分辨率/m	扫描带宽/km	频率/GHz	极化方式 (发射-接收)	视角/($^{\circ}$)	带宽/MHz
SIR - A	1981 - 11 - 12	260	38	40	50	1.278	HH	47	6
SIR - B	1984 - 10 - 5	225	57	25	30	1.282	HH	15 ~ 60	12

3. SIR - C/X - SAR 雷达

1994 年 4 月和 8 月,美国与德、意两国合作,将 SIR - C 和德国 X - SAR 合成孔径雷达成功地进行了航天发射,并制定了 SIR - D 计

划。如图 2-2 所示。SIR-C/X-SAR 首次试验了多频率、多极化天基合成孔径雷达系统。SIR-C/X-SAR 的主要用途是环球地面探测,主要性能见表 2-3。

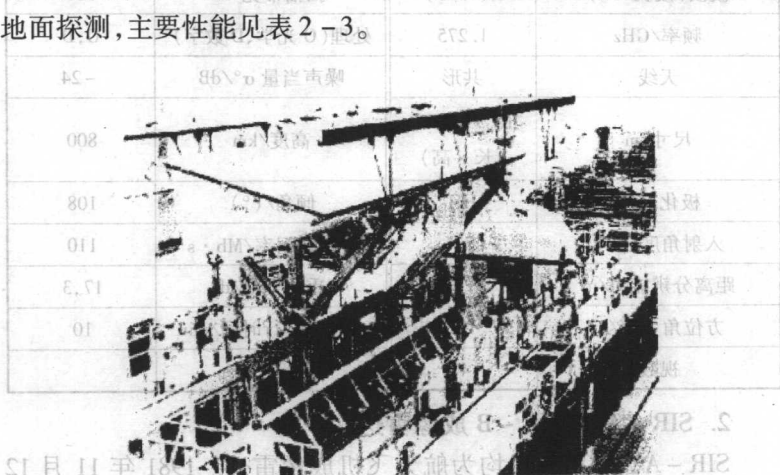


图 2-2 SIR-C/X-SAR

表 2-3 SIR-C/X-SAR 系统主要性能参数表

参数名称		L 波段 (1.3GHz)	C 波段 (5.3GHz)	X 波段 (9.6GHz)	说明
斜距分辨率/m	10MHz	14.9	14.9	13.3	SSD
	20MHz	8.3	7.9	6.6	
方位分辨率/m		27	27	23.6	MGD
综合副瓣电平/dB	垂直	-13	-16	-14.8	SSD
	方位	-12.2	13.7	-19	SSD
系统灵敏度/dB		< -47	< -35	< -35	50°
入射角/(°)		20 ~ 55	20 ~ 55	20 ~ 55	
最大观测角/(°)		> 60	> 60	> 60	
观测宽度/km		15 ~ 160	15 ~ 160	15 ~ 104	
模糊度/dB		< -20	< -20	< -20	
极化隔离度/dB		> 30	> 30	> 39	
分布式目标动态范围/dB		> 31	> 28	> 24	
点状目标动态范围/dB		> 60	> 60	> 60	
数据率/Mb · s ⁻¹ (7个通道)		45	45	45	
绝对测量精度/dB		2.8	2.8	2	

(续)

参数名称		L 波段 (1.3GHz)	C 波段 (5.3GHz)	X 波段 (9.6GHz)	说明
天 馈 系 统 参 数	天线长度/m	12	12	12	
	天线宽度/m	2.9	0.7	0.4	
	天线结构类型	有源相控阵	有源相控阵	裂缝波导	
	相位控制/bits	4	4	4	
	极化方式	水平、垂直	水平、垂直	垂直	
	极化隔离度/dB	25	25	39	
	天线增益/dB	36.4	42.7	39	
	机械扫描范围/(°)	无	无	±23	
	电扫范围/(°)	±20	±20	无	
	垂直波束宽度/(°)	5~16	5~16	5.5	
	水平波束宽度/(°)	1	0.25	0.14	
	峰值发射功率/kW	4.4	1.2	1.4	
天线质量/kg	3300	3300	49		

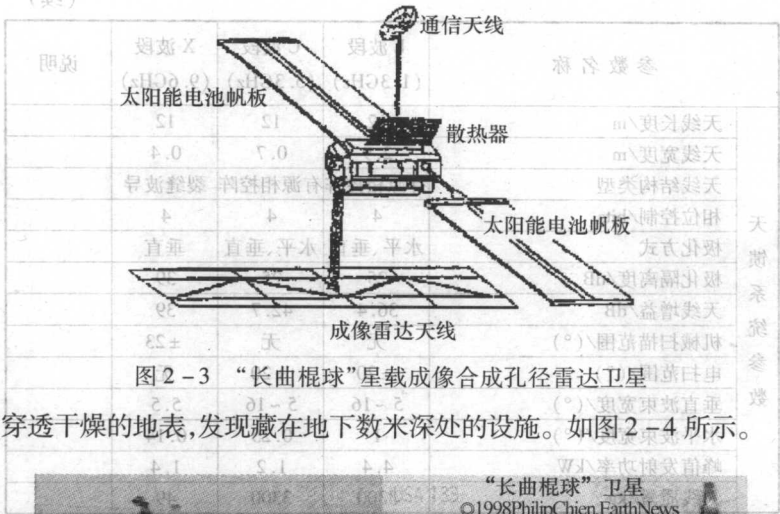
4. “长曲棍球”(Lacrosse)星载成像侦察雷达

“长曲棍球”星载成像雷达采用合成孔径技术体制,是目前世界上最高水平的军用成像侦察雷达,曾在海湾战争中发挥了重要作用,它是美国 21 世纪初空间雷达成像侦察的主要工具。它不仅特别适于跟踪舰船的活动,监视机动式弹道导弹的动向,而且还能发现经过伪装的武器装备。

“长曲棍球”卫星的主体呈八棱体,长 8m,直径约 4m,一对太阳能电池帆板在轨道上展开后跨度为 45.1m,可提供 10kW 以上的电力。卫星设计寿命 8 年,运行倾角为 57°~68°,轨道高度为 670km~703km。如图 2-3 所示。

“长曲棍球”星载成像合成孔径雷达的天线呈矩形,长 14.4m,宽 3.6m,由 3 个平面天线阵组成,每个天线阵含 4 个长度相等的子阵。雷达的几何分辨力为 0.3m~3m,所获图像数据经“跟踪与数据中继卫星”传至美国白沙地面站,再经过国内通信卫星传到贝尔沃堡。依靠高精度成像合成孔径雷达和地面动目标显示(GMTI)系统,它不仅适于跟踪舰船和装甲车辆的活动,监视机动式弹道导弹的动向,还能发现伪装的武器和识别假目标,甚至能

(续)



穿透干燥的地表,发现藏在地下数米深处的设施。如图 2-4 所示。



图 2-4 “长曲棍球”星载成像合成孔径雷达卫星图片

合成孔径雷达主要性能参数如下:

工作频段:L 波段、X 波段;

发射功率:5kW;

卫星高度:680km;

天线尺寸:14.4m×3.6m;

天线增益:41dB(L 波段),58dB(X 波段);

波束宽度:0.8°×3.2°(L 波段),0.1°×0.42°(X 波段);

天线极化:水平,垂直;

旁瓣电平:15dB~20dB;

重复频率:1kHz~2kHz;

脉冲宽度:20 μ s~30 μ s。

图 2-5 LightSAR 合成孔径雷达

合成孔径雷达卫星系统于 2002 年 9 月发射,卫星高度 700km,星载合成孔径雷达波长 24.0cm(L 波段),分辨力 25m,扫描带宽 100km,重访周期 8d~10d。该雷达具有聚束式、条带式、全极化、双极化、干涉 SAR 和 Scan SAR 等多种工作模式,成像分辨力在聚束式时为 3m(幅宽 20km)。如图 2-5 所示。

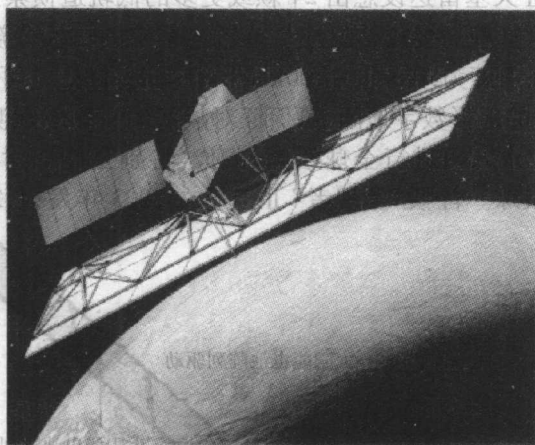


图 2-5 LightSAR 合成孔径雷达卫星外形

6. Toposat-1、Toposat-2

Toposat-1、Toposat-2 性能见表 2-4。

表 2-4 Toposat-1、Toposat-2 性能表

名称	发射时间/年	卫星高度/km	波长/cm	分辨力/m	扫描带宽/km	重访周期/d
Toposat-1	2002	440	2.0(Ku)	30	85	双天线
Toposat-2	2002	565	24.0(L)	30	85	1h

7. “发现者” II

“发现者 II”计划由美国空军、国防高级研究计划署 (DARPA) 和国家侦察处 (NRO) 于 1998 年初联合发起, 宗旨是研制论证一种天基雷达 (SBR), 这种雷达具有很高的距离分辨能力、地面动目标观测、合成孔径雷达成像能力, 并且能够把地形测绘图上的数据数字化, 从而提供侦察、监视和精确地理定位信息, 要求在有电子干扰的条件下能够正常工作。该项目是在研究了海湾战争以来美军发起的历次局部战争经验教训后提出的, 第一阶段合同要求研制并生产两颗具有上述能力的论证试验卫星, 经过 1 年的试验和论证转入第二阶段, 进入最后的系统设计、装配、发射。“发现者” II 天基雷达设想由 24 颗或更多的低轨道侦察卫星和 42 个地面信息管理与接收站组成。该雷达系统的目标分辨力高, 能分辨出地面速度为 $4\text{km/h} \sim 100\text{km/h}$ 的运动目标, 并可以制作精度约为 1m 的地形数字地图, 可保证对战区的高频率观测 ($10\text{min}/\text{次} \sim 15\text{min}/\text{次}$), 可进行全球绘图、成像, 特别是能够对移动目标进行连续跟踪。首颗“发现者” II 卫星在 2003 年发射, 2004 年完

