

文章编号:1001-893X(2012)06-1054-05

国外天基预警雷达系统发展现状及关键技术^{*}

朱庆明,金术玲,孟祥玲

(中国电子科技集团公司第三十八研究所,合肥 230088)

摘 要:天基预警雷达作为重要的信息获取手段,其采用多种工作模式,可探测空间、空中和地面目标。鉴于天基预警雷达系统的战略地位,美国、俄罗斯和加拿大等国竞相开发该系统。总结了天基预警雷达系统的国外发展现状及关键技术,简要介绍了天基预警雷达的未来发展趋势,指出美国虽怀疑其“天基雷达计划”的可行性,但仍非常重视天基雷达各项关键技术的研究。

关键词:天基雷达;预警雷达;合成孔径雷达;地面动目标显示;空中动目标显示

中图分类号:TN959.74 **文献标志码:**A doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2012.06.047

Current Developments and Key Technologies of Foreign Space-based Warning Radars

ZHU Qing - ming , JIN Shu - ling , MENG Xiang - ling

(The 38th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Hefei 230088, China)

Abstract:As an important information acquisition method, space - based warning radars with multiple work modes can detect various space, air and ground targets. In view of the important strategic position of space - based warning radars, many western countries such as USA, Russia and Canada are now racing to develop the radars. This paper summarizes current developments and key technologies of space - based radars, discusses their developing trends, and finally points out that USA still pays attention to the key technologies study of space - based radar although the feasibility of its Space - based Radar Plan is doubted.

Key words:space-based radar; early warning radar; synthetic aperture radar; ground moving target indication; air moving target indication

1 引 言

空间是未来战争的最后一个战场,未来战争优势的标志是制天权的争夺。天基预警雷达是战略预警的重要组成部分,具有合成孔径雷达(SAR)成像、地面动目标显示(GMTI)和空中动目标显示(AMTI)多个工作模式。天基预警雷达系统是主动探测模式,由于其平台高度的特殊性,可以不受国界、天气和时间的限制,且预警时间长,可以探测在轨的其他卫星、轨道武器、太空碎片、弹道导弹、巡航导弹、战略轰炸机等空间、空中或地面目标。因此,天基预警

雷达是全面获取空间、空中以及地面有关目标信息资源的重要手段,是夺取制信息权的重要保障。因此,目前世界各国加紧推进天基预警雷达系统的研究进程^[1-4]。

2 国外天基雷达发展概况

2.1 美国

美国是最早开始天基预警雷达研究的国家,从 20 世纪 80 年代起就陆续有人提出各种各样的天基雷达(SBR)方案^[5]。美国国防部原计划从 2005 - 2009 财年为天基雷达投入 40 亿美元,从而达到在 2012

^{*} 收稿日期:2012-05-23;修回日期:2012-06-06

年发射首颗卫星的目的。据报道,美国五角大楼已取消“天基雷达”计划,但美国空军仍对天基雷达需求迫切,特别是在天基雷达的动目标检测特性和全天候成像-监视能力,因此,目前美国仍在进行天基雷达的概念研究和关键技术的突破。

下面简要介绍一下美国曾提出的几种概念^[1]。

(1)单基地天基雷达

单基地天基雷达(Monostatic SBR)就是把现有的机载预警与控制系统(AWACS)和联合监视目标跟踪雷达系统(JSTARS)的全部设备和功能搬到太空。这种设想的优点是技术成熟,因有效载荷大而且重,将造成卫星很大、很重且成本高,实现起来很困难。

(2)空间电子捷变雷达^[6]

空间电子捷变雷达(SPEAR)和 SPEAR U/X 这两个计划同时进行,前一种工作在 X 频段,具有 SAR/GMTI 功能;后一种增加了 UHF 频段的雷达,除具有 SAR/GMTI 功能外,还增加了 AMTI 功能。

SPEAR 可搭载在轻型低地轨道卫星上,成本相对较低,采用相控阵雷达发射/接收天线模块(TRAM),二维波束扫描,每秒可覆盖几千平方公里的空域。星座卫星数量及其需要的最大空隙时间、平均重访时间如下:最小星座 14 颗星,最大空隙时间 59 min,平均重访时间 17 min;较好用 36 颗星,最大空隙时间 10 min,平均重访时间 2.3 min;最好用 75 颗星,无空隙,平均重访时间 1 min。

(3)发现者-II

发现者-II(Discover II)是由美国空军、DARPA 和美国国家侦察局(NRO)联合研制的天基雷达计划。Discover II 具备高分辨力地面动目标显示(HRR-GMTI)、合成孔径雷达(SAR)成像和数字地形图数据获取(DTED)功能。Discover II 系统雷达工作在 X 频段,天线大约 40 m²,二维扫描,卫星轨道高度 770 km,不对全球进行连续覆盖监视,只对选定重点区域连续监视。

由于美国国会不愿为天基雷达项目注入资金,已经在 2000 年取消了 Discover II 中的两颗卫星的演示验证,并在 2004 年指示空军取消天基雷达计划的探测跟踪任务,而要求致力于研究和开发工作。虽然该计划已被取消,但还具有很高的参考价值。

(4)有源双基地天基雷达

有源双基地天基雷达(Active Bistatic SBR)星座由 3~4 颗地球同步轨道(GEO)(轨道高度 35 880 km,搭载雷达发射机)和 24~26 颗低地球轨道(LEO)(搭载雷达接收机)组成。当要求实现

AMTI 功能时要求发射天线直径超过 100 m,而实现 SAR/GMTI 功能的雷达发射天线更大。有源双基地天基雷达的另一种设计思想是使发射机放在 LEO 上,接收机放在无人机上。

(5)无源双基地天基雷达

无源双基地天基雷达(Passive Bistatic SBR)概念设计只能用于实现 AMTI 功能。Passive Bistatic SBR 的设想类似于 Active Bistatic SBR,只是雷达发射机不是搭载在卫星上,而是一些地面电视、广播的发射机无源双基地和卫星上搭载的接收机组网来发现两者之间存在的运动目标。

(6)小卫星天基雷达

小卫星由于具有低成本、可以一箭多星发射等优点,是当前航天领域的一个研究热点。小卫星天基雷达(Smallsat SBR)可以用来实现 GMTI/SAR 或者实现 AMTI 功能。如果选择 100 颗以上的小卫星星座,采用 UHF 频段可实现全球范围内连续动目标监视,可实现类似 GPS 工作模式,多颗卫星同时观测同一个目标,通过多星数据综合进行目标探测。

(7)Techsat 21

应用分布式卫星技术,通过多颗协调卫星上雷达天线形成分布式多基口径(Distributed Multistatic Aperture)能够实现 GMTI/SAR/AMTI 功能。由于采用了多个视角和大的等效口径,可以探测很小雷达散射面积的目标。美国空军在 1998 年提出 Techsat 21 计划,将 8 颗 X 频段小 SAR(77 kg)卫星分布在半径 250 km 的圆形轨道上,可实现单发、多收、1 m 地面分辨率、1.5 m/s 慢速动目标显示,20 km 观测带。采用 X 频段,各卫星频率略有差异,所有雷达接收自己的反射信号和其他卫星的反射信号,通过干扰形成大的等效口径。

对美国各天基雷达概念设计的发展成熟程度评价如表 1 所示,表 2 给出了几种天基雷达的具体参数。

表 1 天基雷达概念设计的发展成熟程度评价表		
Table 1 Development maturity evaluation form of space-based radar concept design		
概念设计	功能	发展水平
SPEAR	GMTI/SAR	成熟
SPEAR V/X	AMTI/GMTI/SAR	成熟
Discover II	GMTI/SAR	适中/成熟
Active Bistatic	GMTI/SAR/AMTI	初步/适中
Passive Bistatic	AMTI	初步/适中
Smallsat	GMTI/SAR/AMTI	初步
Techsat 21	AMTI/GMTI/SAR	初步

表 2 天基雷达概念的具体参数对照表
Table 2 Parameters comparison of space - based radar concept

天基雷达	承包商	轨道高度 /km	天线 /m	频率 (频段)	星座 (卫星数量)/颗	备用功率 /kW	雷达功率 /kW	雷达 占空比	平均功率 /kW	时间 安排	S/C 质量 /kg	S/C 价格/ 亿美元
Discoverer II	DARPA	770	5×8	X	24	0.4	4.8	10%	0.8	2003	1 500	1
SPEAR	AF - PL	850	6×22	X	36	1.2	26.2	30%	8.7	2015	4 400	1.5
SPEAR U/X	AF - PL	850	6×44	X + UHF	80	1.3	29.9	30%	9.9	2025	6 500	1.8
Techsat 21	AF - PL	700 - 800	2×2	X	35×16	0.1	1.0	22%	0.3	>2005	100	0.1
MEO	AF - Rome	10371	50(直径)	L	16	4.9	119.0	36%	46.0	>2010	不详	不详
Mitre Bistatic	AF	GEO 照明	80(直径)	S	3	—	—	100%	60	不详	18 000	不详
	AF	LEO 接收	6×44 m	S	75	不详	不详	26%	5	不详	不详	不详

2.2 俄罗斯

俄罗斯预警卫星寿命短,总体水平远不及美国,但在雷达卫星方面,1991 年发射了 Almaz - 1 SAR 卫星,S 频段分辨率 10 ~ 15 m。1996 年发射了 Almaz - 1B 载有 S、P 和 X 3 个频段的 SAR,寿命 2 年。新世纪将发射 Almaz - 2,有效载荷质量将达 6.5 t,寿命提高到 5 年。并且根据战区导弹防卫计划的需要,在 1999 - 2001 年期间先后发射了宇宙 2366、宇宙 2369、宇宙 2378 3 颗预警卫星,可见俄罗斯在 SBR 研制方面是不甘落后于美国的。

2.3 加拿大

除了美国和俄罗斯外,加拿大也积极发展天基预警雷达。加拿大从 20 世纪 80 年代末开始与美国国防部联合研制 RADARSAT - 1,90 年代中期部署,主要用于防御飞机和空中/海上发射的巡航导弹。加拿大的 RADARSAT - 2 卫星已于 2007 年 12 月 14 日发射升空,计划任务寿命 7 年^[7]。RADARSAT - 2 搭载的主要图像传感器是具有多种成像模式能力的 C 频段 SAR 雷达,保留了 RADARSAT - 1 卫星目前所有的成像模式,并进行了重要的创新和改进。RADARSAT - 2 采用多极化工作模式,大大增加可识别地物或目标的类别,可为用户提供 3 ~ 100 m 分辨率、幅宽从 10 ~ 500 km 范围的雷达数据。此外,加拿大还制定了天基预警雷达的研究规划,主要目的是为广阔的北美区域提供空中预警,并开始天线、展开结构及信号处理方面的研究。

总之,目前世界上已有很多国家把发展天基预警雷达技术作为空间、空中以及地面目标探测技术的重点,以便尽早形成陆、海、空、天一体化的预警探

测系统,从而在未来战争中赢得主动权。

3 天基预警雷达系统关键技术

由于天基预警雷达系统是一个组成非常复杂、任务要求极高、技术难度极大的系统,因而关键技术极多,其中有些关键技术相互矛盾,相互制约。天基预警雷达系统与目前已投入使用的用于战场监视的星载高分辨率合成孔径成像雷达相比技术难度更大,国外目前也只在进行关键技术攻关。下面简要论述天基预警雷达卫星平台设计技术和载荷系统技术的关键技术。

3.1 天基预警雷达卫星平台设计技术

天基预警雷达系统是一个全新的系统,载荷的重量、体积、功耗均远远大于在轨运行的雷达载荷。在卫星平台设计中需重点突破大热耗卫星系统热控方法、大型相控阵天线展开机构技术和大功耗供配电技术等。

(1)大热耗卫星系统热控方法

卫星的天线为大型的外露设备,结构复杂,如何实现大面积阵面的等温化是热控设计的一个难点;天线工作功耗很大,并且不同模式下功耗变化范围大。如何降低天线阵面温度,减小温度波动是热控设计的又一个难点;热控设计方案还需要满足卫星和天线多姿态工作的指标要求。

(2)大型相控阵天线展开机构技术

天基预警雷达为保证探测威力,采用超大相控阵天线,尺寸达数百平方米,而同时卫星发射时又要保持比较小的体积,如何有效在空中展开天线并保证相应精度是天基雷达研究的一个重点^[8]。天线展

开机构技术主要包括天线展开机构系统设计、低冲击压紧释放装置研究、大输出力矩联动驱动展开技术研究和大型高精度天线的试验验证技术。

3.2 天基预警雷达载荷系统技术

天基预警雷达作为天基预警雷达系统的核心载荷,其性能的优劣对天基预警雷达系统整体性能起着决定性的作用。总体上说,天基预警雷达载荷系统技术与机载雷达并没有本质区别,但由于卫星平台和作战任务的不同需要特殊考虑和精心设计。

(1) 天基预警雷达载荷总体技术

主要包括目标特性分析,深冷空间电磁传播特性分析,工作频率选择和波形设计以及雷达资源管理等。

(2) 片式有源相控阵技术

天基预警雷达要求的天线面积非常大,如不采用特殊结构的轻型天线,将使整个卫星平台和运载火箭无法承受。片式有源阵列模块(TAAM)是一种可与不同载体平台自适应共形的有源相控阵天线。通过将复杂的射频子系统与天线高效集成,形成与载体共形的灵巧蒙皮,从而构成一个多功能天线孔径。这样既能增加天线的有效口径,减小天线的体积、重量,又能保持载体平台原有的空气动力学特性。

(3) 宽禁带高效 T/R 组件技术

天基预警雷达系统研究中,卫星平台对载荷的一个重要的限制就是电源功率限制,如何在有限的电源功率下尽可能提升载荷威力是天基预警雷达研究中首先需要解决的问题。T/R 组件的效率是制约雷达效率的一个重要部分,其中特别是发射功率管的效率问题。常规功率管的效率仅有 20% ~ 30%,在导致能量大量浪费的同时也增加了系统散射设备的复杂度和重量。宽禁带高效 T/R 组件技术的突破将对天基预警雷达的研制起到巨大推动作用。

(4) 先进的信号处理与目标跟踪技术

卫星平台的快速运动不但使得场景的杂波谱分布在空间和时间上具有特定的耦合关系,而且会导致目标回波在积累期间存在距离走动、跨多普勒走动等问题,给信号处理带来困难。这就需要天基预警雷达系统采用先进的信号处理技术抑制杂波、检测目标。

(5) 天基预警雷达高可靠性技术

天基预警雷达研制费用高、运行维护难,通常要

求一次试验成功,并且要求系统能够在空间长时间运行,这就对空间预警雷达的可靠性提出严峻的挑战。因此,必须采用各种措施加强天基预警雷达的可靠性。

4 未来发展展望

美国曾针对天基雷达的发展作了总体规划,预计在 2025 年之前实现一个功能完整的天基雷达系统(可以实现 SAR、GMTI 和 AMTI,覆盖全球)。在战略上分成了 3 个阶段:近期,利用天基雷达实现 GMTI 功能;中期,实现全球 GMTI 和区域性 AMTI 的功能;远期,利用 60 ~ 80 或更多颗卫星实现覆盖全球的连续 GMTI 和 AMTI 功能。

由于发现者 - II 的需求不清,经费预算增长过快,而且缺乏如何从演示验证阶段过渡到实际应用的方案或设想等原因,2000 年美国国会取消了该项目采购计划,但仍向国家侦察局拨款 3 000 万美元,继续用于研究和开发“天基雷达”所需的关键技术。美国空军在美国国会放弃发现者 - II 试验验证工作之后仍支持天基雷达计划,并坚持希望进行太空试验。同时,美国国会对“天基雷达”计划可行性和经济承受力产生了怀疑,甚至认为该项目不应该作为国防部的采购计划,而更适合作为一项技术预研项目,并对“天基雷达”计划 2004、2005 财年的预算申请资金进行了大幅度的削减。

为了恢复国会对“天基雷达”计划继续投资的信心,美国空军在 2005 年对“天基雷达”计划进行了修改和重组,将项目更名为“空间雷达”计划,并重新制定了详细的“空间雷达”计划发展框图。另据 2009 年 3 月的有关报道,由于经费问题,美国五角大楼于 2008 年取消了天基雷达计划,但美国空军方面仍对天基雷达需求迫切,特别是在天基雷达的动目标检测特性和全天候成像 - 监视能力方面。自“天基雷达”计划取消以来,美国空军仍做出了探索性选择,希望复苏天基雷达星座计划,考虑借鉴加拿大、德国等国部署商业可用系统(包括加拿大的 RADARSAT - 2、德国的 SAR - lupe、TanDEM - X 卫星)的经验,美国空军预选择美国政府内部及与其他政府进行合作。由此可见,未来美国天基雷达计划的发展仍然坎坷颇多,如突破关键技术,明确需求,降低成本,减少投资,从而实现天基雷达星座。

总之,美国虽然怀疑“天基雷达”计划的可行性,

但对天基雷达的研究方兴未艾,这是由天基雷达在未来信息战中的特殊地位直接决定的。

5 结束语

未来战争是信息化的战争,制天权、制信息权的争夺是未来战争优势的标志,天基预警雷达系统是一种探索空间、空中及地面信息的重要手段。从国外的发展情况来看,各国都非常重视并竞相研制天基预警雷达系统。美国虽取消天基雷达计划,但仍非常重视天基雷达各种关键技术的研究。

参考文献:

- [1] Davis M E. Technology Challenges in Affordable Space Based Radar[C]// Proceedings of 2000 IEEE International Radar Conference. Arlington, Virginia; IEEE, 2000: 18 – 23.
- [2] Huang J, Ferial A, Lopez B, et al. Deployable and Light – weight Array Antenna for space application[C]// Proceedings of 2000 IEEE International Conference on Antennas and Propagation. Salt Lake City, UT; IEEE, 2000: 1244.
- [3] Croci R, Delfino A, Marchetti F. Space Based Radar Technology Evolution[C]// Proceedings of the 6th European Radar Conference. Rome, Italy; IEEE, 2009: 601 – 604.
- [4] Richard J, Enjolras V, Phalippou L, et al. Overview of Future Evolution of Spaceborne Altimetry Missions, Techniques and Technologies[C]// Proceedings of the 6th European Radar Conference. Rome, Italy; IEEE, 2009: 17 – 20.
- [5] Lane S A, Murphey T W. Overview of the Innovative Space – Based Radar Antenna Technology Program[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2011, 48(1): 135 – 145.
- [6] Christoph Heer. TerraSAR – X Next Generation Technology Aspects[C]// Proceedings of the 3rd International Asia – Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Seoul; 2011: 1 – 4.
- [7] Seguin G, Ahmed S. RADARSAT constellation, project objectives and status[C]// Proceedings of 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Cape Town : IEEE, 2009: 894 – 897.
- [8] Huang J. The development of inflatable array antennas[J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2001, 43(4): 44 – 50.

作者简介:

朱庆明(1964—),男,贵州长顺人,高级工程师,主要研究方向为雷达系统情报研究;

ZHU Qing – ming was born in Changshun, Guizhou Province, in 1964. He is now a senior engineer. His research concerns intelligence for radar system.

Email: qmzhu@163.com

金术玲(1978—),女,吉林永吉人,高级工程师,主要研究方向为雷达系统工程及雷达目标检测与跟踪;

JIN Shu – ling was born in Yongji, Jilin Province, in 1978. She is now a senior engineer. Her research concerns radar system engineering and radar target detecting and tracking.

Email: jslnwpu@126.com

孟祥玲(1980—),女,黑龙江青冈人,工程师,主要从事雷达系统情报研究。

MENG Xiang – ling was born in Qinggang, Heilongjiang Province, in 1980. She is now an engineer. Her research concerns intelligence for radar system.

Email: mengling0200@163.com