

doi: 10.7690/bgzdh.2020.08.004

## 防空反导预警装备覆盖能力推演分析

赵会朋, 冯占林, 李博骁, 郭继光

(中国电子科学研究院战略预警所, 北京 100041)

**摘要:** 针对新时期面临的空天威胁, 对防空反导预警装备覆盖能力进行推演分析。分析空天威胁目标的特点及其对预警探测系统带来的挑战, 以防空反导装备覆盖能力推演需求为背景, 定义区域覆盖率和多重覆盖率 2 项主要评估指标, 建立计算方法, 并以美国现役防空反导体系为典型案例, 分析其装备覆盖能力, 总结装备部署特点。结果表明: 该研究有效可行, 可为导弹防御系统提供及时可靠的预警信息保障。

**关键词:** 防空预警; 导弹预警; 区域覆盖; 多重覆盖; 雷达视距

**中图分类号:** TJ761.1<sup>+</sup>3 **文献标志码:** A

## Coverage Ability Deduction Analysis of Air Defense and Anti-missile Early Warning Equipment

Zhao Huipeng, Feng Zhanlin, Li Boxiao, Guo Jiguang

(Strategic Early Warning Institute, China Electronics Science Research Institute, Beijing 100041, China)

**Abstract:** In response to the air and space threats in the new era, the coverage of the air defense and anti-missile early warning equipment is deduced. Firstly, analyzes the characteristics of the aerospace threat target and its challenges to the early warning detection system. Then in a setting of deductive needs of air defense and anti-missile early warning equipment coverage ability, define 2 main evaluation indicators, regional coverage and multiple coverage ratios, establish their calculation methods. Then take the US air defense and anti-missile system as a typical case, analyze its equipment coverage capability and the equipment deployment features are summarized. The results show that the study is effective and feasible, and can provide timely and reliable information for missile defense system.

**Keywords:** air defense warning; missile warning; regional coverage; multiple coverage; radar visual range

### 0 引言

针对新时期面临的空天威胁, 为提升预警探测和一体化防空反导作战能力, 各国对防空反导预警装备建设的重视程度不断提升。以美国为例, 其正在致力于继续扩大导弹防御系统部署规模, 发展应对未来新型威胁的先进防御技术。天基预警系统方面, 美国在原有国防支援计划 (defense support program, DSP) 星座的基础上, 正在建设天基红外系统 (space based infrared system, SBIRS) 和空间跟踪与监视系统 (space tracking and surveillance system, STSS)。其中, SBIRS 星座第 4 颗地球同步轨道卫星已于 2018 年 1 月 20 日成功发射, 目前已成功完成运行测试, 正式纳入导弹预警体系<sup>[1]</sup>。美国空军还启动了下一代过顶持续红外 (overhead persistent infrared, OPIR) 项目研发<sup>[2]</sup>, 以接替天基红外系统, 提高导弹预警能力、可生存性和应对新兴威胁的能力。此外, 美国导弹防御局正在探索开发天基杀伤评估 (spacebased kill assessment, SKA)

系统<sup>[3]</sup>, 用于对本土防御拦截效果进行评估, 并参与导弹防御拦截试验。可以看出, 美国已初步构建起高低轨相结合、预警探测跟踪与杀伤评估一体的天基预警系统<sup>[4]</sup>。地基预警系统方面, 除了现有的改进型预警系统、多功能雷达系统外, 美国计划在太平洋地区部署 2 部目标识别雷达, 现已开展选址评估, 为“地基中段防御”系统提供持续中段识别、精确跟踪和杀伤评估能力<sup>[5]</sup>。

反导预警装备的工作流程按照功能的不同可分为早期预警、探测跟踪、轨道预测、分类识别、威胁评估和杀伤评估 6 个阶段<sup>[6]</sup>。防空预警装备的工作流程主要分为早期预警、探测识别和拦截交战 3 个阶段。笔者着重对防空反导预警装备早期预警阶段的覆盖能力进行研究。在早期预警阶段发挥作用的预警装备主要包括天基红外预警卫星和地基预警雷达 2 大类。空军预警学院的胡磊等<sup>[7-8]</sup>基于 STK 软件先后分析了地球静止轨道 (geosynchronous earth orbit, GEO) 和大椭圆轨道 (highly elliptical

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-05-23

作者简介: 赵会朋 (1988—), 女, 河北人, 博士, 工程师, 从事弹道导弹预警系统装备论证、空间目标监视、逆合成孔径雷达成像研究。  
E-mail: 974071205@qq.com。

orbit, HEO) 预警卫星的覆盖性能, 但未给出通用的预警卫星覆盖效能计算模型。预警雷达的覆盖能力计算需要考虑雷达视距的影响, 文献[9]推导了遮蔽角计算公式, 并分析了遮蔽角对雷达视距的影响, 可为计算雷达传感器低空覆盖效能提供支撑。笔者分析空天威胁目标的特点, 构建典型装备覆盖能力评估指标以及指标计算模型, 通过公开收集的美国防空反导预警装备资料, 验证分析方法的可行性。

## 1 装备覆盖能力推演分析方法

### 1.1 威胁目标及其特点

新时期面临的空天威胁主要包括弹道导弹、巡航导弹、以隐身飞机为代表的作战飞机、临近空间武器以及各类新型空天武器等, 对防空反导体系带来了一系列严峻挑战。笔者简要介绍几种典型威胁目标的目标特性及其对预警探测系统带来的挑战。

#### 1) 弹道导弹。

弹道导弹具有射程远、速度快和突防样式多样化等特点, 最大射程可达 14 000 km, 最高速度可达 7.4 km/s (22 倍音速), 弹道高度可达 1 400 km。在突防措施方面, 战略弹道导弹正在由单弹头携带简单诱饵, 向隐身分导式多弹头携带复杂诱饵、有无源干扰转变; 弹道特性也在由惯性弹道向机动变轨、低压弹道、在临近空间滑翔飞行的方向发展。弹道导弹的主要特性和突防措施给预警探测体系带来的挑战包括远程预警探测能力、快速扫描能力及复杂突防场景下的弹道高精度预报和高分辨率识别能力等。

#### 2) 巡航导弹。

巡航导弹主要包括超音速巡航导弹、远程亚音速巡航导弹和中程亚音速巡航导弹。巡航导弹具有超低突防、打击射程远、飞行速度快、目标散射截面积小、命中精度高和毁伤能力强等特点。巡航导弹通常以亚音速飞行, 典型射程可达 2 000~3 000 km, 典型飞行高度低于 150 m, 典型 RCS 小于 0.1 m<sup>2</sup>。典型型号有 BGM-109“战斧”系列和 AGM-158 系列等。巡航导弹的主要特性给预警探测体系带来的挑战包括低空/超低空预警探测能力、高精度大批量目标跟踪能力、慢速小目标检测能力及复杂背景下目标的识别能力等。

#### 3) 隐身飞机。

隐身飞机包括隐身战斗机和隐身战略轰炸机。典型的隐身战斗机包括美国的 F-22 和 F-35、俄罗斯的 T-50, 典型的隐身战略轰炸机如美国的 B-2

等。隐身飞机具有隐身能力强、飞行高度高、巡航速度快和机动性高等特点。采用外形设计、吸波材料、有源/无源对消等隐身技术后, 可以使飞行器的 RCS 减缩水平降低约 20 dB 或更多。隐身飞机的巡航速度可达  $Ma$  1.8, 典型第四代战斗机飞行高度可达 18 km。隐身飞机的主要特性对预警探测体系的挑战包括远距离高空预警能力、米波反隐身探测能力及新体制反隐身探测能力等。

### 1.2 装备覆盖能力的主要评估指标

针对防空反导预警装备覆盖能力推演需求, 选取了区域覆盖率和多重覆盖率 2 个核心指标, 给出具体定义和计算方法。

#### 1) 区域覆盖率。

指标定义: 预警体系内各预警装备对某一高度层探测面积总和与该高度层指定观测区域面积的比值, 其中, 当指定观测区域为全球时, 对应全球覆盖率。

计算方法: 记预警体系内各预警装备对某一高度层探测面积总和为  $S_0$ , 该高度层指定观测区域面积为  $S$ , 则区域覆盖率为  $P=S_0/S$ 。

#### 2) 多重覆盖率。

指标定义: 预警装备在某一高度层对威胁目标形成两重及以上覆盖的探测区域面积总和与该高度层指定观测区域面积的比值。

计算方法: 记预警装备在某一高度层对威胁目标形成两重及以上覆盖探测区域面积总和为  $S_n$ , 该高度层指定观测区域面积为  $S$ , 则多重覆盖率为  $P_n=S_n/S(n \geq 2)$ 。

### 1.3 覆盖区域的计算方法

笔者重点介绍区域覆盖率和多重覆盖率指标中涉及到的覆盖区域的计算方法。

#### 1.3.1 单传感器覆盖区域计算方法

传感器覆盖区域是 3 维空间内对传感器可见的点的集合, 因此, 计算传感器的覆盖区域可转换为判断某 3 维空间区域内的点是否对传感器可见的问题。判断 3 维空间中某点  $(x_0, y_0, z_0)$  对传感器是否可见的基本思路是在传感器本体坐标系中表征目标相对于坐标原点的矢量, 然后通过直角坐标系与极坐标系之间的转换公式将目标相对于传感器的相对矢量转换成距离 ( $R$ )、方位 ( $A$ ) 和俯仰 ( $E$ ) 信息, 最后判定  $R$ 、 $A$ 、 $E$  的数值是否落在传感器的观测范围  $R_{\max}$ 、 $A_{\max}$  和  $E_{\max}$  中, 落入即判定为可见, 反之为

不可见。所有可见点的集合构成了传感器的覆盖区域。

防空反导预警装备中涉及到的传感器主要分为天基预警卫星传感器和地基预警雷达传感器 2 大类。如图 1 所示, 相应的本体坐标系均用东北天 (ENU) 坐标系表示,  $x$  轴正方向为东,  $y$  轴正方向为北,  $z$  轴正方向为天。预警卫星的东北天坐标系用  $x_1y_1z_1$  表示, 预警雷达的东北天坐标系用  $x_2y_2z_2$  表示。实际计算过程中, 首先获得天基红外预警卫星的轨道信息及地基雷达的经纬度信息, 将目标  $(x_0, y_0, z_0)$  相对于传感器的相对矢量在地心惯性坐标系中表示。然后通过坐标系转换将相对矢量转到传感器的东北天坐标系中。其中地心惯性坐标系到预警卫星东北天坐标系  $x_1y_1z_1$  的转换可通过旋转矩阵法和直接投影法 2 种方法实现, 具体实现过程可参考文献 [10], 地心惯性坐标系到预警雷达东北天坐标系  $x_2y_2z_2$  的转换公式可参考文献 [11]。

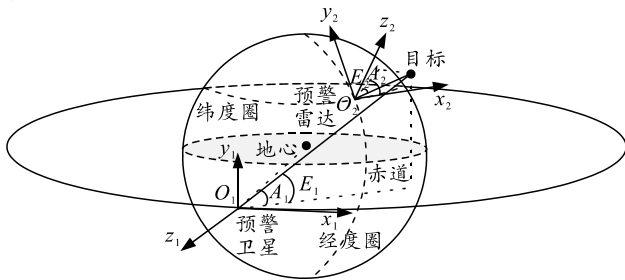


图 1 传感器量测坐标系

由于单颗红外预警卫星无法测距, 因此, 红外传感器的覆盖范围用方位角和俯仰角来约束。在预警卫星的东北天坐标系中, 方位角和俯仰角的解算公式如下:

$$\begin{aligned} A_1 &= \arctan \frac{x_1}{z_1}, \\ E_1 &= \arctan \left( y_1 / \sqrt{x_1^2 + z_1^2} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

假定预警卫星传感器的视场扫描范围为  $A_{1\max}$  (方位)  $\times E_{1\max}$  (俯仰), 则目标是否落在扫描视场的判定条件为:

$$\left. \begin{aligned} |A_1| &\leq \frac{A_{1\max}}{2} \\ |E_1| &\leq \frac{E_{1\max}}{2} \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

预警雷达的覆盖范围用距离、方位角和俯仰角来约束。在预警雷达的东北天坐标系中, 距离、方位、俯仰的解算公式为:

$$R = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}; \quad (3)$$

$$A = \begin{cases} 180 - \arcsin \left( y_2 / \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \right) & x \leq 0 \\ \arcsin \left( y_2 / \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \right) & x \geq 0, y \geq 0; \\ 360 + \arcsin \left( y_2 / \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \right) & x \geq 0, y \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$E = \arctan \left( z_2 / \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \right). \quad (5)$$

假定预警雷达传感器的视场范围为  $R_{\max}$  (距离)  $\times A_{2\max}$  (方位)  $\times E_{2\max}$  (俯仰), 则目标是否落在雷达传感器视场的判定条件为:

$$\left. \begin{aligned} R &\leq R_{\max} \\ |A_2| &\leq A_{2\max} / 2 \\ |E_2| &\leq E_{2\max} / 2 \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

### 1.3.2 多传感器覆盖区域计算方法

多传感器覆盖区域是多个单传感器覆盖区域的几何并集。具体实现过程如下:

1) 将某一高度层的指定观测区域  $S$  按照地理经度间隔  $\Delta L_{on}$  和地理纬度间隔  $\Delta L_{at}$  进行 2 维离散网格化;

2) 假设共有  $N$  个传感器, 根据第  $i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ) 个传感器的覆盖区域, 将被传感器覆盖的网格赋值为 1, 未被覆盖到的网格赋值为 0;

3) 将  $N$  次赋值结果进行累加, 所有取值大于等于 1 的网格总和即为多传感器覆盖区域, 面积用  $S_0$  表示, 用于计算多传感器的区域覆盖率; 所有取值大于等于  $n$  ( $n \geq 2$ ) 的网格总和即为多传感器的多重覆盖区域, 面积用  $S_n$  表示, 用于计算多重覆盖率  $P_n$ 。

### 1.3.3 雷达视距计算方法

如式(6)所示, 计算单个雷达传感器覆盖区域时会用到雷达最大可探测距离  $R_{\max}$  这一约束条件。根据威胁目标特性可知, 弹道导弹、空间目标等目标飞行高度较高, 雷达最大可探测距离取决于雷达作用威力, 隐身飞机、巡航导弹等目标可进行低空/超低空飞行, 由于地球曲率的影响, 即使雷达的威力足够大, 受雷达视距影响也不能保证可以看到目标; 因此, 需要构建地球曲率影响下的雷达视距计算几何模型如图 2 所示。

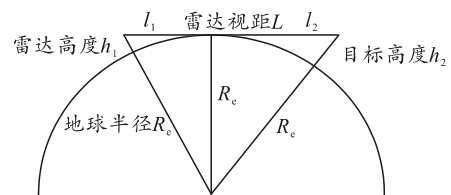


图 2 地球曲率影响下雷达视距几何模型

图 2 中, 地球半径为  $R_e$ , 雷达高度为  $h_1$ , 目标高度为  $h_2$ , 则雷达对目标的视距  $L$ 、雷达高度  $h_1$  和目标高度  $h_2$  三者之间的几何关系为:

$$\left. \begin{aligned} L &= l_1 + l_2 \\ (R_e + h_1)^2 &= R_e^2 + l_1^2 \\ (R_e + h_2)^2 &= R_e^2 + l_2^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

整理式(7)可得

$$L = \sqrt{h_1^2 + 2h_1R_e} + \sqrt{h_2^2 + 2h_2R_e} \approx \sqrt{2R_e}(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (8)$$

由于巡航导弹、隐身飞机等空中目标位于地球大气层中, 在计算某个特定高度层的雷达视距时, 自由空间传播模型不够准确, 需要考虑其他传播机制。在标准或正常大气条件下, 无线电射线以低于地球表面曲率向下弯曲。有效地球半径概念<sup>[12]</sup>用一个更大的半径取代真实地球半径, 并保持射线和地球表面间的相对曲率, 于是射线变成一条直线。有效地球半径  $a_e$  和真实地球半径  $a$  之间的关系可以通过有效地球半径因子  $k$  表示:

$$a_e = ka \quad (9)$$

$k$  可用下式计算:

$$k = 1/[1 + a(dn/dh)] \quad (10)$$

式中  $dn/dh$  是垂直折射指数梯度。用地球平均半径 6 371 km 和折射率梯度  $-39$  km 可求出  $k$  值为 1.33 或大约 4/3, 这就是通常所说的“四分之三地球模型”。

由式(9)和式(10)可知, 考虑大气折射效应时, 表征雷达视距的式(8)变为:

$$L \approx \sqrt{2 \times (4/3) \times R_e} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (11)$$

当地球半径  $R_e$  取平均值 6 371 km 时, 式(8)可简化为

$$L \approx 4.12(\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (12)$$

式中: 雷达高度  $h_1$  和目标高度  $h_2$  的单位为 m; 计算出的雷达视距  $L$  的单位为 km。

## 2 典型案例分析

以美国为例, 在分析其防空预警系统、弹道导弹防御系统装备部署的基础上, 推演其防空反导预警装备的覆盖能力。

### 2.1 防空预警装备覆盖能力分析

通过公开资料可见, 美国防空预警系统包括预警机、地基防空雷达和球载雷达, 总数约 144

部<sup>[13-14]</sup>。笔者针对美国防空预警装备设定仿真场景, 包括装备部署位置、数量和基本工作参数, 在此基础上基于覆盖区域计算模型分析防空预警装备的覆盖效能, 效果如图 3 所示。根据典型空中威胁目标的特点可知: 巡航导弹的典型飞行高度低于 150 m, 隐身飞机的典型飞行高度约为 18 km; 因此, 在分析防空预警装备覆盖性能时选取 1 和 20 km 2 个典型高度进行分析, 参数如表 1 所示。根据雷达视距计算公式可知, 当雷达部署高度为 0 时, 对 1 km 高度目标的探测视距为 130 km, 对 20 km 高度目标的探测视距为 580 km, 雷达实际作用距离由雷达视距和探测威力共同决定。

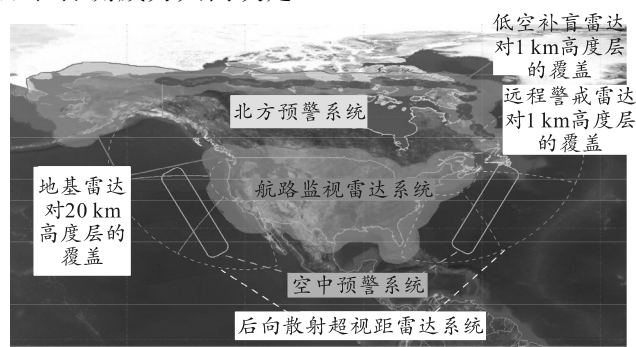


图 3 美国防空预警装备覆盖效果

表 1 美国典型防空预警雷达参数 km

装备名称	部署位置/数量	工作频段	1 km 高度作用距离	20 km 高度作用距离
AN/FPS-118	东海岸/1 部 西海岸/1 部	HF	900~3 300	900~3 300
AN/FPS-117	加拿大/11 部 阿拉斯加/10 部 美国大陆/5 部	L	130	370
AN/FPS-124	加拿大/37 部 阿拉斯加/3 部	L	110	110
AN/FPS-130 (ARSR-4)	美国本土国境线/44 部	L	130	470
TARS 球载雷达	美国南部与墨西哥狭长地带/12 部	L	320	320
E-3 预警机 (AN/APY-2)	美国本土东、西海岸/20 架	S	270	650

从图 3 可以看出: 美国防空预警装备体系中的后向散射超视距雷达、预警机、气球载预警雷达, 以及多型地基防空预警雷达由远及近地形成了对威胁目标的覆盖能力。后向散射超视距雷达可对国境线外 900~3 300 km 范围内的威胁目标进行覆盖<sup>[14]</sup>。预警机和气球载雷达利用平台升空的方式, 对平台高度以下的目标均几何可见, 覆盖区域主要取决于雷达威力。其中, 改进型 L 波段气球载监视雷达具有优良精确的波束下视能力, 部署在 4 600 m 高度时, 对 3 000 m 以上目标探测距离超过 270

km<sup>[14]</sup>。E-3 型预警机对中空目标的探测距离可达 500~600 km, 对低空目标的探测距离可达 300~400 km, 对巡航导弹探测距离达到 270 km<sup>[15]</sup>。

对阿拉斯加和北纬 70°线一带区域的经度和纬度均按 0.2°的间隔进行划分, 对应的网格数为 14 445 个, 随后根据装备参数及覆盖区域计算模型进行覆盖效能计算分析。对于 20 km 高度层, 约束探测范围的主要因素是雷达威力, 而非雷达视距, 经计算得出, AN/FPS-117 远程防空警戒雷达对该区域的覆盖率为 94.63%。对于 1 km 高度层, 雷达视距约为 130 km, 由于 AN/FPS-117 雷达站与站间的距离较远, 对 1 km 高度层的覆盖存在较多盲区, 对北纬 70°线一带区域的覆盖率约为 31.7%。在 AN/FPS-117 覆盖盲区内密集部署的 AN/FPS-124 雷达能够很好地实现低空补盲效果, 对北纬 70°线一代区域的覆盖率约为 68.57%, 两型雷达搭配使用, 可实现对指定区域不同高度层的有效覆盖。

对美国本土区域的经度和纬度均按 0.1°的间隔进行划分, 对应的网格数为 112 015 个, 美国的航路监视雷达系统在 20 km 高度层对美国本土的覆盖率为 98.66%。

### 2.2 导弹预警装备覆盖能力分析

通过公开收集资料可知, 美国导弹预警系统从功能上分为 3 类: 天基红外预警系统、陆基弹道导弹预警系统、多功能预警系统。这些系统密切配合, 互为补充, 完成对弹道导弹的有效捕获发现、跟踪识别、预报导弹来袭和提供弹道导弹数据等任务。美国典型导弹预警雷达参数如表 2 所示。

表 2 美国典型导弹预警雷达参数 km

装备名称	部署位置/数量	工作频段	作用距离
改进型预警雷达 UEWR	英国菲林戴尔斯、丹麦格陵兰图勒、美国加利福尼亚比尔、美国阿拉斯加州克里尔、马萨诸塞州科德角各 1 部共 5 部	P	5 800(RCS=10 m <sup>2</sup> ) 3 260(RCS=1 m <sup>2</sup> )
改进“丹麦眼镜蛇”AN/FPS-108	美国阿留申群岛西端的谢米亚岛/1 部	L	4 800
海基 X 波段雷达 SBX	阿拉斯加阿留申群岛/1 部	X	2 000
AN/TPY-2 雷达	阿拉斯加朱诺/1 部 德克萨斯州布里斯堡/2 部	X	前置模式: 1 600 制导模式: 660

天基红外预警系统主要包括 DSP 预警卫星<sup>[7]</sup>、SBIRS-GEO 卫星、SBIRS-HEO 以及 STSS 卫星<sup>[16]</sup>, 陆基导弹预警系统主要包括改进型预警雷达, 多功

能预警系统主要包括海基 X 波段雷达和 AN/TPY-2 雷达<sup>[14]</sup>。根据公开资料设定仿真场景, 包括部署位置、数量和基本工作参数, 笔者基于覆盖区域计算模型进行导弹预警装备覆盖效能计算。

由雷达方程可知, 雷达作用距离与目标 RCS 之间的换算关系为:

$$R \propto \sigma^{1/4} \quad (13)$$

式中  $\sigma$  表示目标的 RCS 值。公开资料中对美国改进型预警雷达威力是基于 RCS 为 10 m<sup>2</sup> 描述的, 导弹飞行过程中, 当弹头与箭体分离后, RCS 远远小于 10 m<sup>2</sup>; 因此, 需要进行作用距离的换算。当对 RCS 为 10 m<sup>2</sup> 目标的作用距离为 5 800 km 时, 利用式(13)换算可知, 对 RCS 为 1 m<sup>2</sup> 目标的作用距离约为 3 260 km。

美国现役新一代 SBIRS 高轨预警卫星的对地覆盖结果如图 4 所示。通过仿真计算得出, 当对全球区域的经度和纬度均按 1°间隔进行划分时, 得到的网格总数为 43 424 个。如图 4 所示, 天基高轨红外预警卫星的全球覆盖率为 83.74%, 在南美洲和南极地区存在覆盖盲区。对中国、俄罗斯、朝鲜、日本等重点区域实现了两重以上覆盖。其中, 中国区域的网格数为 810 个, 天基高轨红外预警卫星对中国的一重覆盖率为 100%, 两重覆盖率达 99.38%, 三重覆盖率达 71.19%。

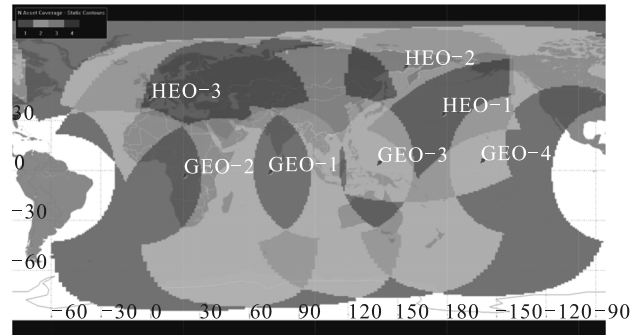


图 4 天基高轨红外预警卫星对地覆盖

从图 5 可知, 5 部改进型预警雷达组成的地基弹道导弹预警系统可以对攻击美国本土的洲际弹道导弹实现全方位覆盖。虚线圆圈代表预警雷达对 RCS 为 10 m<sup>2</sup> 目标的威力范围, 实线圆圈表示雷达对 RCS 为 1 m<sup>2</sup> 目标的威力范围。其中, 科德角、比尔和克里尔的 UEWR 可分别提供对美国东海岸、西海岸和阿拉斯加地区导弹目标的覆盖, 菲林戴尔斯和图勒的 UEWR 可提供对伊朗方向来袭导弹的覆盖。地基弹道导弹预警系统与天基红外预警卫星和地基多功能雷达配合使用对袭击美国本土的弹道

导弹实现早期发现、连续跟踪与精确识别，为导弹防御提供及时可靠的预警信息保障。

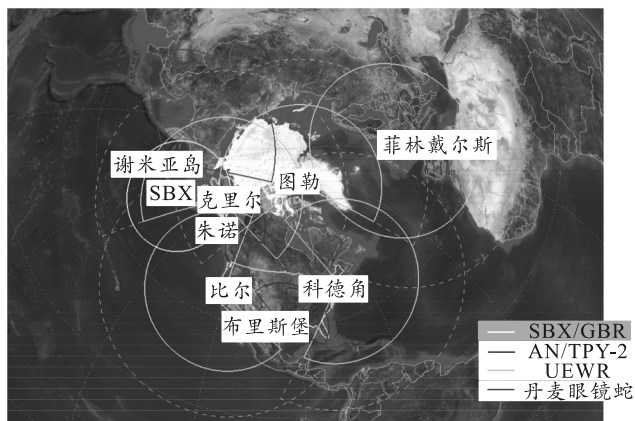


图 5 美国导弹预警雷达覆盖效果

### 3 结束语

#### 3.1 防空预警装备特点

通过分析，防空预警系统应该具备以下特点：

1) 遵循批量部署、主动前伸的原则，增强预警体系对威胁目标的早期预警能力。美国将远程防空警戒雷达和低空补盲雷达前出部署在加拿大境内，能够在国土外 2 500 km 处提早发现目标。批量部署的航路监视雷达与远程防空警戒雷达实现了对美国本土和北纬 70°线附近区域的封边覆盖。

2) 内外组合、高低搭配，以实现威胁目标在不同距离、不同高度层的覆盖。美国防空预警系统通过后向散射超视距雷达、预警机空中平台、浮空气球载平台以及地基装备内外组合，远程警戒雷达与近程补盲雷达的高低搭配，实现对威胁北美领空中目标的预警探测。

3) 军民共用。防空预警雷达由于受视距影响，单部雷达覆盖范围有限，欲实现国土上空无缝覆盖，所需装备数量巨大；因此，除了积极研制专用防空预警装备外，还应积极利用可用的民用装备。美国本土上空的预警监视能力主要依靠国内民用航路监视雷达系统实现。

#### 3.2 导弹预警装备特点

通过分析，导弹预警装备应该具备以下特点：

1) 天基预警装备应具备全球覆盖、重要方向多重覆盖能力，确保对导弹发射事件的尽早发现和尽快告警。美国新一代高轨红外预警卫星系统部署完毕后(完成 6GEO+4HEO 部署后)，可对除南极外区域的陆射和潜射弹道导弹实施 24 h 的不间断监视，对中国、俄罗斯等重点区域具备双重以上覆盖

能力。

2) 陆基预警装备应覆盖多个频段，从而提升多目标跟踪、准确识别和复杂场景抗干扰能力。美国地基弹道导弹预警系统中的雷达工作在 P/L 波段，用于提供多方向早期预警信息，进行弹道跟踪测量。多功能雷达系统中的 X 波段雷达用于提供精密跟踪和目标识别信息。另外，据公开资料显示，美军将于 2020 年在阿拉斯加部署 S 波段的远程识别雷达(LRDR)，用于实现对来袭弹道导弹的精确跟踪、识别及杀伤评估。可以看出：美国的导弹预警装备频谱覆盖 P、L、S、X 多个频段，可有效提升预警体系对导弹目标的截获概率、探测精度、目标容量以及体系抗干扰能力。

3) 应在重点地区前置部署预警装备，提升对导弹目标的早期预警和目标特性收集能力。如美国的导弹测量船可前置部署到海上，大大提升对导弹目标的早期预警能力。在盟国部署的 X 波段 AN/TPY-2 雷达，可对周边国家和区域的导弹试验活动进行监视，积累更多的目标特性数据。

#### 参考文献：

- [1] 唐睿. 美空军天基红外系统 GEO-4 卫星成功完成运行测试正式纳入导弹预警体系[EB]. 国防科技要闻. (2019-06-14)[2019-10-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s/9jv8o0L-IXXWoLZDfbnqQ>. 2019.
- [2] 孔紫琴. 美空军公布导弹预警卫星项目最新进展[EB]. 装备参考. (2019-06-14)[2019-10-25]. [https://mp.weixin.qq.com/s/9gl\\_wUdvPJWVlyV71CwXvw](https://mp.weixin.qq.com/s/9gl_wUdvPJWVlyV71CwXvw). 2019.
- [3] 郭彦江, 吴勤. 神秘的“天基杀伤评估”系统悄然完成在轨部署[EB]. 装备科技(2019-03-12) [2019-10-25]. <https://mp.weixin.qq.com/s/BMADbYglK-hqJMtTrZ1XbQ>. 2019.
- [4] 方勇. 美国天基导弹预警跟踪系统发展动向[J]. 国际太空, 2017, 464(8): 35-41.
- [5] 张梦恬. 2018 年世界防空反导发展综述[EB]. 航天防务(2019-01-29)[2019-10-25]. [https://mp.weixin.qq.com/s/Awlm5FRD0\\_penmVd7o2Bpw](https://mp.weixin.qq.com/s/Awlm5FRD0_penmVd7o2Bpw). 2019.
- [6] 苗泽. 弹道导弹防御系统中的预警装备研究[J]. 中国新通信, 2018(24): 165.
- [7] 胡磊, 闫世强, 刘辉, 等. 美国 GEO 预警卫星覆盖性能分析[J]. 空军雷达学院学报, 2012, 26(6): 404-408.
- [8] 胡磊, 闫世强, 刘辉, 等. 美国 GEO 预警卫星覆盖性能分析[J]. 装备学院学报, 2013, 24(3): 76-80.
- [9] 韩丹, 高浩然. 雷达遮蔽角计算及影响分析[J]. 科技与创新, 2018(21): 9-11.

[3] 廖飞, 陈捷, 肖云峰. 云计算安全架构及防护机制研究[J]. 通信技术, 2019, 52(10): 2472-2482.

[4] 习阳, 李凯, 王潇. 军工行业工业控制系统信息安全风险与对策[J]. 兵工自动化, 2019, 38(9): 13-15.

[5] 李明, 曲洁. 《信息系统安全等级保护定级指南》修订要点解析[J]. 信息网络安全 2016(S1): 19-21.

[6] 马力, 祝国邦, 陆磊. 《网络安全等级保护基本要求》(GB/T 22239-2019) 标准解读[J]. 信息网络安全,

2019(2): 77-84.

[7] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 信息安全技术 网络安全等级保护基本要求: GB/T 22239-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

[8] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 信息安全技术 网络安全等级保护安全设计技术要求: GB/T 25070-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.

\*\*\*\*\*

(上接第 21 页)

[10] ZHAO H P, FU X G, GAO M G, et al. Research on the visibility of low-orbit debris using space-borne radar[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(1): 31-37.

[11] OLIVER M, EBERHARD G. 卫星轨道-模型、方法和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 34-35.

[12] MERRILL I. Skolnik. 雷达手册 [M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2010: 1069.

[13] Wikipedia. North American Aerospace Defense Command

[OL]. (2018-07-09)[2019-10-25]. [https://en.wikipedia.org/wiki/North\\_American\\_Aerospace\\_Defense\\_Command](https://en.wikipedia.org/wiki/North_American_Aerospace_Defense_Command).

[14] 刘兴. 防空防天信息系统及其一体化技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 81-90.

[15] Wikipedia. Boeing E-3 Sentry [OL]. (2018-06-01)[2019-10-25]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Talk:Boeing\\_E-3\\_Sentry](https://en.wikipedia.org/wiki/Talk:Boeing_E-3_Sentry).

[16] 王群. 美国新一代导弹预警卫星系统及其能力分析[J]. 国防科技, 2012(2): 7-12.

\*\*\*\*\*

(上接第 31 页)

参考文献:

[1] 刘佩. 空战机动飞行仿真研究[C]. 中国自动化学会控制理论专业委员会, 第 37 届中国控制会议论文集, 中国自动化学会控制理论专业委员会: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2018: 5.

[2] 陈向, 王维嘉, 魏文领, 等. 基于蒙特卡罗搜索树的自动飞行机动[C]//2016 年航空科学与技术全国博士生学术论坛, 西安: 西北工业大学研究生院, 2016.

[3] 林清, 梁争争, 许少尉. 基于自主可控的机载嵌入式计算机现状与展望[J]. 航空计算技术, 2018(5): 2-4.

[4] 牛文生, 王乐. 机载计算技术的新进展[J]. 航空科学

技术, 2012(4): 1-4.

[5] "Nvidia Workstation Products" [Z]. Nvidia.com.Retrieved October 2, 2007.

[6] 薛杨, 孙永荣, 赵科东, 等. 基准地图测绘下的视觉导航算法[J]. 兵工自动化, 2019, 38(10): 22-27.

[7] LIU Y, JIAO S, WU W, et al. GPU accelerated fast FEM deformation simulation[C]//IEEE Asia Pacific Conference on Circuits & Systems. IEEE, 2008.

[8] PIRJAN A. Improving Software Performance in the Compute Unified Device Architecture[J]. Informatica Economica, 2010, 14(4): 2-3.

[9] CHU A, FU C W, HANSON A, et al. GL4D: A GPU-based Architecture for Interactive 4D Visualization[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2009, 15(6): 1587-1594.