

美导弹预警系统运行机理分析

罗 涛, 赵佳慧, 刘尊洋, 叶 庆

国防科技大学电子对抗学院, 安徽 合肥
Email: yeqing18@nudt.edu.cn

收稿日期: 2021年6月4日; 录用日期: 2021年8月31日; 发布日期: 2021年9月8日

摘 要

美导弹预警系统是当今世界上发展最为成熟的导弹预警系统。为研究其对抗策略, 本文首先梳理了美导弹预警系统的基本组成, 介绍了天基红外预警系统、远程预警雷达的发展现状, 并根据美导弹预警系统天基红外预警系统、远程预警雷达、X波段预警雷达和多功能雷达等各阶段预警主要装备的任务分工, 分析了其在初始段、中段和再入段的基本探测机理, 最后预测了美导弹预警系统的发展趋势。

关键词

导弹预警系统, 天基红外系统, 雷达预警系统, 工作机理

Analysis on the Operation Mechanism of the US Missile Early Warning System

Tao Luo, Jiahui Zhao, Zunyang Liu, Qing Ye

College of Electronic Engineering, National University of Defense Technology, Hefei Anhui
Email: yeqing18@nudt.edu.cn

Received: Jun. 4th, 2021; accepted: Aug. 31st, 2021; published: Sep. 8th, 2021

Abstract

The US missile early warning system is the most mature missile early warning system in the world. In order to study its countermeasure strategy, this paper has done the following work: Firstly, the basic components of the US missile early warning system are summarized, secondly, the basic components of the US missile early warning system are introduced, then, combined with the ballistic and radiation characteristics of ballistic missiles in each flight stage, according to the US missile early warning system space-based infrared early warning system, long-range early warning radar, long-range early warning radar, long-range early-warning radar, etc., the basic detection

mechanism of X-band early warning radar and multi-function radar in initial phase, middle phase, and reentry phase are analyzed. Finally, the development trend of American missile early warning system is predicted.

Keywords

Missile Early Warning System, Space-Based Infrared System, Radar Warning System, Working Mechanism

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

到目前为止,美导弹预警系统已经建成了包括天基红外预警系统和预警雷达系统在内全球预警体系,实现了全球弹道导弹的检测覆盖和全弹道跟踪识别。到目前为止,美导弹预警系统已经建成了包括天基红外预警系统和预警雷达系统在内全球预警体系,实现了全球检测覆盖和弹道导弹的全弹道跟踪识别。近年来,为了应对日益复杂的作战环节,美国大力发展新一代高轨红外预警卫星、低轨道预警卫星和新一代远程识别雷达。本文将在简要介绍美导弹预警系统组成的基础上,重点结合导弹特点分析预警系统的基本工作机理,最后预测了该系统的发展趋势。

2. 系统组成

在上世纪 80 年代,美国就已建成了覆盖全境的远程预警雷达系统。随着 X 波段雷达、跟踪引导多功能雷达和远程识别雷达等高性能导弹预警雷达的发展和广泛部署,美雷达预警探测系统已经具备弹道导弹的精确跟踪、弹道预测以及引导拦截能力。但是由于预警雷达部署位置、探测机理等限制,雷达探测系统对弹道导弹助推段的早期预警能力较弱。因此,自上世纪 60 年代开始,美国持续投入大量经费发展部署了三代国防支援计划(Defense Support Program, DSP)卫星系统初步实现了除两极外地表弹道导弹的粗略早期预警[1]。而于 1995 年启动天基红外预警系统(Space Based Infrared System, SBIRS)建设,目前已逐步替代 DSP 成为美弹道导弹早期预警的主要装备,利用其地球同步轨道(Geostationary Orbit, GEO)和大椭圆轨道(Highly Elliptical Orbit, HEO)的红外探测系统,实现了全球范围内不间断的高精度天基红外探测。此外,下一代过顶持续红外(Overhead Persistent Infrared, OPIR)和“黑杰克”项目的建设将进一步提升其天基红外预警能力。随着指挥控制、作战管理与通信(Command, Control, Battle Management and Communication, C2BMC)系统将分布于全球的预警探测资源高度集成于单一系统之中,实现了对所有子系统的统一协同和控制,美国逐步建成了世界上最成熟的全球一体化弹道导弹防御系统。图 1 为美导弹预警系统的基本组成。

2.1. 天基红外预警系统

早期的 DSP 预警卫星和现役的 SBIRS 预警卫星是美先后发展的两套导弹预警系统,主要用于助推段导弹的预警探测。DSP 预警卫星自上世纪 70 年代以来,逐步暴露出很多问题,SBIRS 作为 DSP 预警卫星的接替系统,其扫描速度、分辨率和跟踪能力都远高于 DSP 预警卫星,且可以实现包括地球两极范围的全球监视[2]。

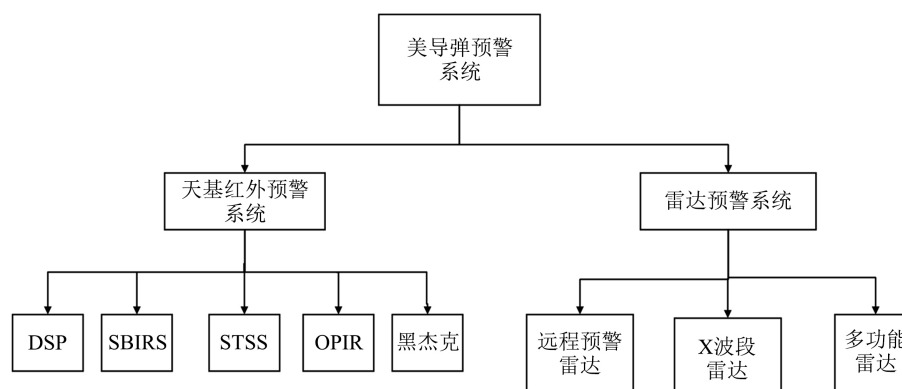


Figure 1. Composition of US missile early warning system

图 1. 美导弹预警系统组成

SBIRS 系统分为高轨卫星与低轨卫星两大部分, 分别担负主动段的弹道导弹的侦察与监视和弹道导弹中段飞行时的发热弹体和冷再入弹头的搜索和跟踪。SBIRS 系统高轨道卫星最初预算仅包括 2 颗大椭圆轨道卫星(SBIRS-HEO)和 4 颗静止轨道卫星(SBIRS-GEO), 后期根据需要改为 4 颗大椭圆轨道卫星(SBIRS-HEO)和 6 颗静止轨道卫星(SBIRS-GEO) [3]。从 2011 年 5 月开始至今, 美国已经完成了 5 颗静止轨道卫星和 4 颗大椭圆轨道卫星的发射部署, 并计划于 2022 年发射最后一颗静止轨道卫星[4]。低轨卫星 2002 年移交至导弹防御局并更名为 STSS, 只发射了两颗实验验证卫星, 目前低轨部分仍处于搁置状态[5]。

2.2. 雷达预警系统

预警雷达是导弹预警的重要手段, 目前美导弹预警雷达无论体制还是技术都处于世界领先水平。经过数十年的发展, 预警雷达频率已经从 P 波段拓展 X 波段, 部署范围也已实现遍布全球, 对于热点地区还实现了多重覆盖, 在美导弹预警系统中发挥着举足轻重的作用。美导弹预警雷达包括远程预警雷达、X 波段雷达和多功能预警雷达[6], 典型的远程预警雷达包括铺路爪雷达和丹麦眼睛蛇雷达等, X 波段雷达包括我们所熟知的 AN/TPY-2 雷达、SBX 雷达和 GBR-P 雷达, 多功能雷达主要包括宙斯盾系统的 AN/SYP-1 和爱国者系统的 AN/MPQ-53(65)雷达。2020 年, 雷神公司完成对 AN/TPY-6(V)雷达阵列的关键测试, 并于同年 7 月向美海军交付了首套 AN/TPY-6(V)雷达, 安装于阿利伯克级导弹驱逐舰, 将进一步提升了美海军舰艇的反导作战能力; 为了进一步提升探测能力和应对高超声速威胁, 美军大力发展了新型的远程识别雷达(Long Range Discrimination Radar, LRDR), 该雷达于 2014 年启动研发, 工作在 S 波段, 计划 2022 年完成作战验收, 目前已经开展多次试验, 据称 LRDR 具备识别跟踪高超声速武器的能力, 将成为美军反导作战的关键单元[6]。

3. 运行机理

3.1. 初始段探测机理

初始段是导弹点火发射到飞出大气层发动机熄火的阶段, 在此阶段, 导弹发动机通过燃料燃烧, 产生高温高压气体, 以此获得动力。导弹点火以后在低空飞行时, 尾焰处的气压高于大气压, 此时会产生扩散效应, 除去尾焰燃烧的核心区, 尾焰外部压力较低的部分将会和大气混合产生一个粘连区。随着飞行高度的上升, 外部气压持续减小, 尾焰的扩散效应持续增强, 当导弹超过一定高度以后, 将会出现一个正激波, 被称为马赫盘, 马赫盘以下的尾焰温度接近燃烧室的温度[7]。对导弹弹道的预测和估计, 主要有基于模板的建模方法和基于模型的匹配方法。基于模板的匹配方式其主要思想是预先将各种不同类

型、不同射程的弹道导弹的特征参数存储在数据库中，当 SBIRS 系统探测到来袭目标时，将目标与数据库中的数据匹配，从而得到弹道导弹助推段的粗略运动状态。基于模型的匹配方法对导弹飞行设置各种约束，从而不通过模板匹配来实现弹道的估算[8]。

3.2. 中段探测机理

导弹在飞出大气层助推燃料耗尽以后，依靠惯性在太空中自由飞行的阶段，忽略稀薄大气对弹体的影响，可以认为处于中段飞行的导弹只受到地球重力的影响。在天基红外预警系统监视到导弹发射并将信息传回地面指挥控制系统以后，根据目标的威胁评估，指挥控制系统将调动天基低轨道预警系统和远程雷达预警系统持续对目标进行追踪。导弹中段飞行的时间是最长的，占整个导弹飞行过程的 85% 以上。综合反导的难度和反导兵力需要，中段拦截是最为理想的。但是由于导弹技术的发展，导弹中段飞行过程趋于复杂。且目前弹道导弹一般都具备突防能力，在导弹飞行过程中释放弹体碎片、红外诱饵以及其他假目标，使得中段预警识别成为中段反导的最大难点。低轨道卫星可以利用这种红外辐射特性，从目标群中识别出真假弹头，而后完成跟踪预警，不过由于目前 STSS 系统尚不具备实战能力，中段预警主要依靠雷达预警系统，“黑杰克”项目完成后或能为美军提供天基中段探测能力[9]。

目前，能实现对中段导弹预警的雷达主要包括 UEWR、丹麦眼镜蛇雷达和大功率 X 波段雷达。其中 UEWR 和丹麦眼镜蛇雷达因为工作波段的原因，其分辨率有限，只能完成对中段弹道导弹的探测和粗跟踪任务，不能目标的识别和精确跟踪。但是对于导弹防御系统而言，仍然具有重要作用，其获取的信息可以通过 C2BMC 与整个系统共享，进而引导“萨德”系统或者“宙斯盾”导弹防御系统对目标进行高精度识别、跟踪。高分辨率的 X 波段雷达能够获取导弹的细微特征，一是直接利用雷达 RCS 的细微差别来识别不同物体，或者对 RCS 数据进行再处理，经过特征变化后再对目标的 RCS 进行匹配；二是利用导弹的微动特性进行特征识别，在导弹飞行过程中，为保持弹体的稳定性，一般导弹都会采用自旋处理。而对于质量较重的导弹，其自旋的频率在 2 Hz 左右，对于质量较轻的弹体碎片，为保持其自身的稳定飞行，自旋频率应在 10 Hz 以上。同时，在弹头自旋的过程中，往往伴随着章动，如果雷达的分辨率小于目标尺寸，则可以观测到这样的运动，不同质量形状的物体的微动特性不同，根据微动特性，完成雷达对目标的识别跟踪[10]。

3.3. 再入段预警机理

目前，美军典型的末段导弹防御系统主要有陆基末段高空防御系统、陆基爱国者导弹防御系统和海基宙斯盾末段防御系统。再入段飞行是导弹实施突防的重要阶段，可以通过导弹尾翼和改变质心的装置来机动变轨，进而使拦截弹脱离目标。此外，在导弹实施突防的过程中，一般也会实施电子干扰通过辐射电磁脉冲实施欺骗性干扰或是压制式干扰。在红外方面，弹头属于钝锥体模型，再入时弹头和大气摩擦产生激波，由于与稀薄大气的粘性摩擦阻碍气体流动，故此形成高温，同时加热弹头，产生大量的红外辐射。一般而言，再入段是导弹拦截的最后阶段，预警跟踪都要求达到火控级别。

一般而言，末段预警时天基红外预警系统和中段跟踪雷达系统可以提供情报支援[11]。末段预警探测系统都是使用窄带的多功能相控阵雷达，需要满足发现识别跟踪指引以及火控功能，如“宙斯盾”反导系统装备的 AN/SPY-1 雷达工作的工作带宽大概是 300 MHz，其雷达分辨率的理论值应该小于 1 m。而且，作为跟踪指引雷达，其本身的波束非常窄。在工作时，通常 C2BMC 会与其共享天基系统和 UEWR 雷达的预警情报，大大提前末段防御的时间，提高目标跟踪的精度。天基预警系统或者 UEWR 雷达向 C2BMC 指控中心发送目标导弹的预警信息，C2BMC 通过高效的数据处理器完成数据处理，包括目标的速度空间坐标等，UEWR 的分辨率大概在几百米左右，末端多功能预警雷达接收到信息以后，就免去了

在大范围内搜索目标，将搜索角控制在小范围内，即提高了搜索效率，还可以提高定位精度。

4. 发展趋势预测

4.1. 推进现有系统全面运行和任务拓展

目前，美国已成功完成 SBIRS 星座组网计划并持续推进其全面运行，在下一代红外预警系统组网完成之前，继续担负防御弹道导弹的作战任务，并拓展其任务范围到战场态势感知、情报侦察以及森林火灾、工厂爆炸探测等民用领域。

4.2. 提高下一代系统探测性能和抗毁性

随着卫星对抗技术及近年来高超声速武器的发展，SBIRS 预警系统面临空间系统威胁增加、脆弱性增强的重要挑战，因此美军开始关注下一代天基预警系统的发展——OPIR 计划和黑杰克项目，期望能够提升天基导弹预警系统面对反卫星武器威胁时的生存能力和目标探测效能。并且美军首次将天基杀伤评估系统(Space-based Kill Assessment, SKA)纳入导弹防御系统，预计于 2022 年具备作战能力[12]。

4.3. 构建开放式地面系统软件架构

当前的美导弹预警系统的地面系统软件采用封闭式架构，无法兼容市场上的商业软件，这不仅增加软件成本，同时也造成美军定期更新软件难度加大。美军正通过“未来作战弹性地面演进”(FORGE)项目升级天基导弹预警系统的地面系统软件，将封闭式软件架构更换为一种开放的系统平台，便于未来升级和新技术运用。同时，美军正探索一种军民融合方式，即将构建通用软件架构，允许商业公司在该架构中运行其软件应用，体现了美军向商业企业和创业公司开放市场的一种鼓励和支持的态度。

5. 结束语

论文以美导弹预警系统作为研究对象，在广泛查阅文献的基础上，系统研究了美导弹预警系统的基本组成和结构，并从弹道导弹飞行的各个阶段入手，结合弹道导弹不同阶段的飞行和辐射特点，分析了美导弹预警系统工作的基本原理，讨论了导弹飞行初始段、中段和末段面临主要预警装备及探测机理，并预判了美导弹预警系统的发展趋势，为今后提出相应对抗措施进行必要准备。

基金项目

安徽省自然科学基金(1908085QF295, 1908085MF199)。

参考文献

- [1] 吴岭, 邱彦文, 王泉. 美军反导预警体系电子目标研究[J]. 航天电子对抗, 2020, 36(1): 28-32.
- [2] 熊瑛, 夏薇, 高云昊, 齐艳丽, 才满瑞. 2020 年国外导弹防御发展综述[J]. 飞航导弹, 2021(1): 6-11.
- [3] 陈雅萍, 高雁翎. 2020 年世界弹道导弹防御系统发展回顾[J]. 飞航导弹, 2021(3): 1-6.
- [4] 胡雅芸. 美太空军发射第 5 颗天基红外系统导弹预警卫星[EB/OL]. 国防科技要闻(ID: CDSTIC). https://www.sohu.com/a/468443188_635792, 2021-05-25.
- [5] 郭凯, 胡旖旎. 航天装备试验鉴定案例分析—天基红外系统[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(2): 79-84.
- [6] 胡玉颖, 刘丙杰. 美军弹道导弹防御系统预警雷达网现状与关键技术分析[J/OL]. 飞航导弹, 1-5. <https://doi.org/10.16338/j.issn.1009-1319.20200108>, 2021-01-15.
- [7] 江涛, 丁明松, 刘庆宗, 董维中, 高铁锁, 龙尧松. 印度烈火-II 导弹助推段和再入段红外辐射特性计算研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(5): 165-170.
- [8] 储雪峰. 天基红外系统探测导弹助推段弹道估计算法研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 战略支援部队信息工程大

学, 2020.

- [9] 李菲菲, 胡敏, 武墩, 王昊淳. “黑杰克”项目动向及应用前景分析[J]. 中国航天, 2020(9): 57-61.
- [10] 赵锋. 弹道导弹防御跟踪制导雷达探测技术研究[D]: [博士学位论文]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [11] 周童, 张雅声, 周海俊, 汉京滨. 利用高轨预警卫星提升远程预警雷达预警能力研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 75-80.
- [12] 王虎. 美国天基红外系统发展研究[J]. 战术导弹技术, 2018(3): 19-23+29.