

光学侦察卫星的目标探测概率分析*

吴炜琦¹ 张育林²

(1. 国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073; 2. 中国酒泉卫星发射中心,甘肃 酒泉 732750)

摘要 :结合光学侦察卫星的特点建立了光学成像卫星目标探测概率与卫星轨道倾角、探测幅宽、访问间隔、目标特性等因素的关系模型。该模型明确了卫星技术性能指标和作战性能指标的相互关系,可作为对光学侦察卫星进行需求分析、顶层设计以及效能评估的依据。以大型舰船为探测目标,用仿真结果说明了模型的适用性。

关键词 :光学侦察卫星 ;目标探测 ;概率分析

中图分类号 :V412 文献标识码 :A

The Probability Analysis of Target Detection for the Photo-reconnaissance Satellite

WU Wei-qi¹ ,ZHANG Yu-lin²

(1. College of Aerospace and Material Engineering , National Univ. of Defense Technology ,Changsha 410073 ,China ;

2. Jiu Quan Satellite Launch Center of China , Jiuquan 732750 ,China)

Abstract :On the basis of the analysis of the characteristic of the Photo-reconnaissance Satellite , a model was built which describes the interactions among the probability of target detection versus the satellite 's inclination , the detection width , the max access gap and the target characteristics . The model formulates the relationships between the technical index and the tactical index , and can be used in the requirement analysis , system design and effectiveness evaluation of Photo-reconnaissance Satellite . The simulation results which takes the large-scale ships as detection target are given to illustrate the applicability of this model .

Key words :photo-reconnaissance satellite ; target detection ; probability analysis

当前,利用航母等大型水面作战平台实施远程精确打击已成为现代战争一种重要的作战样式。为有效应对这种威胁,提高对敌方大型水面舰船目标的远程监测能力至关重要。由于卫星遥感观测具有范围广、无地域限制、重访周期短、数据时效性强、空间分辨率高等特点,已成为海域、地面乃至空间目标和态势监视的重要手段。以航母战斗群为典型代表的海洋目标不仅舰体庞大、甲板空旷,而且平面形状特殊,通常呈斜多边形或矩形,其光学形态特征十分明显。分析光学侦察卫星系统发现目标的概率,可以确定卫星技术性能与作战效能之间的关系,是光学侦察卫星体系和战技指标优化的主要依据。

光学侦察卫星效能的重要指标是对特定目标探测的时效性,即一定时间内探测到目标的概率。本文首先研究卫星对运动目标进行探测的特点,分别研究了侦察卫星的目标探测概率与卫星探测幅宽、轨道倾角、访问间隔以及目标相关特性等因素的关系模型。最后,计算分析了侦察卫星对大型舰船的探测概率与卫星覆盖宽度以及最大重访时间之间的关系。

1 光学侦察卫星的目标探测概率模型

影响光学侦察卫星探测目标的主要因素包括:卫星的轨道高度、倾角、探测方式、幅宽(对应空间分辨率)、重访间隔(对应时间分辨率)、太阳高度角、气象(云层等)、目标区域(范围、形状)等。

* 收稿日期:2006-03-24
基金项目:国家部委基金资助项目
作者简介:吴炜琦(1962—),男,博士生。

1.1 卫星目标探测概率与搜索方式的关系

卫星对指定区域内目标的搜索,包括穷举搜索、随机搜索等多种搜索方式^[1]。由于目标在探测区域内的运动情况是未知的,且卫星每次扫视指定区域的路径也存在一定的随机性,所以,可以将卫星对区域内运动目标的搜索视为一种随机搜索方式,其探测概率为^[1]

$$g = 1 - e^{-z} \quad (1)$$

其中:

$$z = \frac{VWt}{A} \quad (2)$$

式中: V 为探测系统的运动速度,即侦察卫星的星下点在地面的运动速度; W 为探测宽度,即侦察卫星的探测带宽; A 为指定探测区域的面积; t 为探测时间。

近圆轨道侦察卫星星下点在地面的运动速度 V 和卫星的运动周期 T_{sat} 分别近似为^[2]

$$V = R_e \sqrt{\frac{\mu}{(h + R_e)^3}} \quad (3)$$

$$T_{sat} = 2\pi \sqrt{\frac{(h + R_e)^3}{\mu}} \quad (4)$$

式中: R_e 为地球平均半径; μ 为地球引力常数; h 为卫星轨道高度。

侦察卫星每次过境的连续探测时间 t 可以近似为^[3]

$$t = \begin{cases} \frac{\Delta\varphi}{\sin i} \times \frac{T_{sat}}{2\pi}, & i \geq \arctan\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}\right) \\ \frac{\Delta\lambda}{\cos i} \times \frac{T_{sat}}{2\pi}, & i < \arctan\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: i 为卫星轨道倾角; $\Delta\lambda$ 为指定探测区域的经度间隔; $\Delta\varphi$ 为指定探测区域的纬度间隔。

则卫星每次过境的探测概率为

$$g = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{R_e \Delta\varphi W}{A \sin i}}, & i \geq \arctan\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}\right) \\ 1 - e^{-\frac{R_e \Delta\lambda W}{A \cos i}}, & i < \arctan\left(\frac{\Delta\varphi}{\Delta\lambda}\right) \end{cases} \quad (6)$$

1.2 卫星星座对目标探测概率的基本表征

目标探测分为间歇搜索和连续搜索两种探测类型^[1],且连续搜索可视为间歇搜索的一种特殊形式。由于卫星围绕地球作周期运动,所以间断覆盖星座对指定区域的探测属于多次、间歇式探测,如果假设卫星每次扫视的条件基本相同,则目标探测概率 $P(n)$ 是描述侦察卫星星座工作效率的主要性能参数:

$$P(n) = 1 - (1 - g)^n \quad (7)$$

1.3 目标探测概率与最大访问间隔的关系

对间断覆盖的卫星星座而言,最大访问时间间隔(或最大重访时间)表示要求覆盖的区域不可视星座中任意一颗卫星的最大时间间隔。由 G_{max} 可以确定在某一时间段内侦察星座对某一区域的总探测次数^[4]。设 T_{target} 为目标在区域 A 内运动的时间, N 为在 T_{target} 时间内星座对区域 A 的总探测次数,则

$$N = \frac{T_{target}}{G_{max}} \quad (8)$$

将上式代入(7)中,可得侦察卫星在 T_{target} 内在某一区域发现目标的概率:

$$P = P(N) = 1 - (1 - g)^N \quad (9)$$

1.4 目标探测概率与太阳高度角的关系

对可见光成像侦察而言,制约成像效果最直接的因素是太阳高度角,也就是卫星在目标区上空拍照的地方时时刻刻。利用球面三角形可以计算卫星的太阳高度角^[5]。设太阳的赤经和赤纬为 α_s 、 δ_s ,卫星的赤经和赤纬为 α 、 δ ,可得太阳高度角为

$$\theta = \arcsin[\sin\delta\sin\delta_s + \cos\delta\cos\delta_s\cos(\alpha_s - \alpha)] \quad (10)$$

其中: $\alpha = \Omega + \arcsin(\tan\delta\cot i)$ (升轨), $\alpha = \Omega + 180^\circ - \arcsin(\tan\delta\cot i)$ (降轨)。

一般认为,在目前的技术水平下,当侦察区域内的太阳高度角 $\theta \geq 30^\circ$ 时可进行详查照相,当太阳高度角 $\theta \geq 15^\circ$ 时可进行普查照相。对于电视侦察(如果需要的话),太阳高度角 $\theta \geq 5^\circ$ 时就可进行。因此太阳高度角对光学侦察手段的影响可以简单地用分段线性函数来描述^[6]:

$$\rho_\theta = \begin{cases} \alpha_1, & \theta > 30^\circ \\ \alpha_2, & 15^\circ < \theta \leq 30^\circ \\ \alpha_3, & 5^\circ < \theta \leq 15^\circ \\ 0, & \theta \leq 5^\circ \end{cases} \quad (11)$$

其中: $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ 为与光学有效载荷特性有关的常数,且满足 $1 > \alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > 0$,其具体取值可以参见文献[6]。

1.5 气象因素对目标探测概率的影响

对于可见光成像侦察,云层的厚度、覆盖范围是直接影响侦察任务是否能够顺利完成的主要因素,本文仅研究侦察区域云量对成像的影响程度。可以用大气透过率来表示云对成像的影响,云层厚度与光学大气透过率的对应关系可参见[6]。云层厚度对光学侦察手段的影响因子可以用指数归一化函数来近似描述。

$$\rho_C = e^{-\frac{x+32.4}{93.4}} \quad (12)$$

式中: x 为云层的厚度,单位为 m。

1.6 光学侦察卫星的目标探测概率模型

综合考虑上述多种因素的作用,光学侦察卫星探测到目标的概率可以描述为

$$P = \rho_E \rho_\theta \rho_C [1 - (1 - g)^{\frac{T_{target}}{G_{max}}}] \quad (13)$$

如上述讨论可知, ρ_θ 为太阳高度角的影响因子,主要反映可见光侦察相机工作的限制条件; ρ_C 为云层厚度的影响因子,主要反映气象因素的影响; ρ_E 为其它因素的影响因子,主要反映地面辐射等多种因素的综合影响,一些典型的取值可以参见文献[6]; T_{target} 表示目标在区域 A 内运动的时间,主要反映目标活动特性的影响; G_{max} 表示侦察星座对区域的最大重访时间; g 为卫星一个探测周期的探测概率,由探测区域面积、形状、卫星的幅宽和轨道倾角决定。根据该式可分析各种因素对侦察卫星效能的影响。

2 仿真分析

以我国边境领海中大型舰船的探测为例,仿真分析利用光学侦察卫星进行目标探测时,要达到指定的目标探测概率所需要的最大重访时间(最大访问时间间隔)。假设大型舰船目标的活动区域为东经 $125^\circ \sim 129^\circ$ 、北纬 $23^\circ \sim 28^\circ$,以 25 节/小时(或 0.012km/s)的速度在该区域内运动。设侦察卫星的轨道倾角为 $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$,要求侦察卫星星座对区域内探测到目标的概率大于 95%,则侦察卫星的探测宽度与最大重访时间之间的关系如图 1 所示。

由图 1 可见,轨道倾角固定时,卫星的探测宽度越宽,允许的最大重访时间越长,如果卫星轨道高度不变,则侦察星座需要的卫星数量越少。轨道倾角不同时,卫星探测宽度与最大访问间隔之间的关系曲线趋势相似。利用宽覆盖详查卫星对大型舰船进行探测,轨道倾角为 30° ,侦察卫星的探测宽度为 50km 时,则只要侦察卫星星座每隔 26 分钟对该区域侦察一次,对大型舰船的探测概率就可以达到 95% 以上。由图 2 可见,对于成像侦察卫星而言,在载荷能力确定的条件下,其幅宽与分辨能力呈反比,幅宽越大,成像的分辨率越低,发现并识别目标的概率越低。在同样的探测概率要求下,幅宽越小,最大重访时间越短。

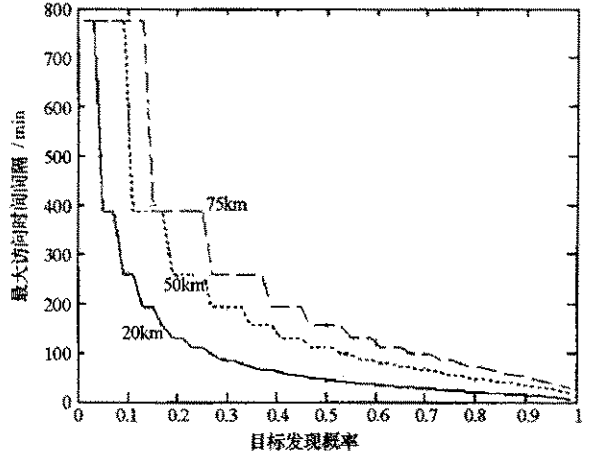
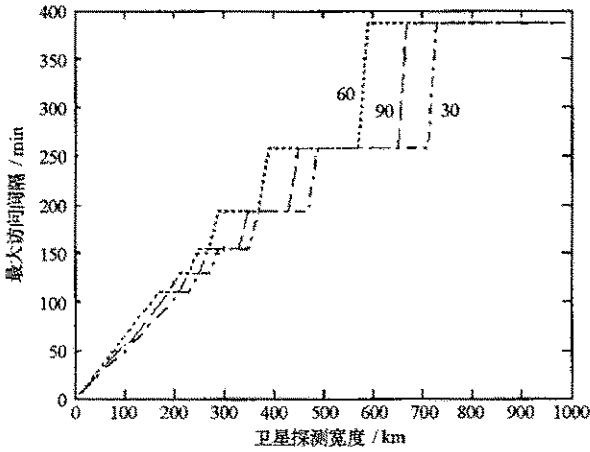


图1 不同轨道倾角下探测宽度与最大重访时间的关系 Fig.1 The relationship between detection width and max access gap under different orbit inclination
 图2 不同幅宽下探测概率与最大访问时间间隔的关系 Fig.2 The relationship between detection probability and max access gap under different detection width

3 结论

本文在对利用光学侦察卫星进行海洋目标探测的特点进行分析的基础上,综合了概率论方法和卫星星座地面覆盖性能分析方法,建立了光学侦察卫星系统的目标探测概率模型,并用仿真结果说明了模型的适用性。该模型探讨了卫星技术性能指标和作战性能指标的相互关系,为设计、确定和分析光学侦察卫星的效能提供了一种有效的途径。

参考文献:

- [1] Przemieniecki J. Mathematical Methods in Defense Analyses[M]. AIAA, Alexander Bell Drive, Reston, 2000.
- [2] 任萱. 人造地球卫星轨道力学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1988.
- [3] Der J, Bonavito L. Orbital and Celestial Mechanics[M]. AIAA, Alexander Bell Drive, Reston, 1998.
- [4] 杨嘉墀,范剑峰,等. 航天器轨道动力学与控制[M]. 北京:宇航出版社,1995.
- [5] 肖峰. 球面天文学与天体力学基础[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1989.
- [6] 沈如松. 航天装备体系需求分析与评价方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.

