

改进的低轨凝视传感器覆盖性能网格分析方法

简平, 邹鹏, 熊伟, 陈治科

(装备学院, 北京, 101416)

摘要 针对天基低轨预警系统主要任务是对导弹目标的中段进行探测和跟踪,研究了低轨凝视型传感器空间覆盖问题。首先根据凝视传感器作用距离和光轴转向建立了不同高度下凝视传感器覆盖模型;然后针对网格分析方法的不足,改进了网格划分规则,推导了在不同纬度下网格划分的经度间隔、纬度间隔、网格划分精度之间的函数关系,基于典型覆盖性能指标提出了空间覆盖分析和计算流程;最后通过仿真得出星座对特定空间的覆盖特性,结果证明了空间覆盖模型和改进的网格点仿真方法的有效性。

关键词 低轨预警系统;凝视传感器;覆盖性能;网格点仿真

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.03.008

中图分类号 V19 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)03-0035-05

天基预警系统通常采用高、低轨卫星组网和红外双探测器体制工作模式^[1]。低轨卫星的凝视传感器工作在可见光、中长波红外等波段,使得在探测中段导弹目标时,必须避开地球及其大气层的红外辐射干扰,光学镜头只能朝向宇宙冷背景的目标^[2-3]。

凝视型传感器网的覆盖性能直接决定低轨预警系统对导弹目标的探测和跟踪能力。对于单颗卫星凝视传感器来说,采用解析法可以计算其覆盖情况,但由于星座不同轨道面之间的相互关系较复杂,通常利用数值仿真的方法来求解。网格点仿真方法最初由 Morrison^[4]在1973年研究圆轨道和椭圆轨道星座的多重覆盖时提出,该方法的核心是网格点的采样,常用的方法是依据等纬度等经度间隔将地表分为许多网格点^[5]。由于网格点以等纬度和等经度间隔,空间圆球上单位面积上的网格点数随纬度的升高而增加,获得的采样点在空间分布不均匀,不能完全反映覆盖情况,对空间覆盖特性的统计分析产生重要影响。

本文在前人对卫星覆盖大量研究工作的基础上,开展天基低轨预警系统凝视传感器覆盖模型、网格点仿真方法的改进和覆盖性能仿真分析研究。

1 天基凝视传感器覆盖模型

凝视传感器^[6]的瞬时视场小,但是其光轴可在俯仰向和方位向一定范围内灵活转向,提供一个较大的总探测视场。凝视传感器探测视场对关注空域的覆盖性能反映了低轨星座对深空背景目标的探测能力。

根据所需分析圆球面 A_n 的半径 R_n 与卫星轨道半径 R_s 和最小指向角时的工作切线半径 R_m 的位置关系不同,对应的空间覆盖范围也不同^[5]。凝视型传感器^[3,6-7]采用临边工作模式和圆形视锥,在俯仰方向的最大指向角为 δ_{\max} ,最小指向角为 δ_{\min} ,最大探测距离为 R_{\max} ,最小探测距离为 R_{\min} ,假设球面 A_n 的高度为 h_n ,球面距离地心的半径为 $R_n:R_n = h_n + R_e$,其中 R_e 为地球半径。则空间覆盖范围 $\psi = \cup_n A_n$,传感器最小指向角时的工作视线的切线半径 $R_m = R_e + h_m$, h_m 为最小指向角对应的切线高度,卫星在传感器最大指向角时的工作视线半径 $R'_m = R_e + h'_m$, h'_m 为最大指向角对应的切线高度。同时,假设卫星高度 h_s ,则卫星轨道半径 $R_s =$

* 收稿日期:2011-11-07

作者简介:简平(1985-),男,江西新余人,博士生,主要从事信息系统设计理论和方法、任务规划研究。
E-mail: jianping85730@sina.com

$h_s + R_e$ 。根据图 1 分析目标的覆盖情况:

1) 当目标所处的圆球面 A_n 的半径 R_n 在传感器的最小指向角时的切线高度和最大指向角时的切线高度之间时, 即 $|OH| \leq R_n \leq |OH'|$, $|OH| = R_m = R_s \sin \delta_{\min}$, $|OH'| = R'_m = R_s \sin \delta_{\max}$ 。以 φ 表示卫星与目标的地心角, 其覆盖判据是: φ 位于弧 $\widehat{P_1 P_2}$ 的 2 个端点对应的地心角之间, 即:

$$\phi_{\min} \leq \varphi \leq \phi_{\max} \quad (1)$$

式中: $\phi_{\min} = \angle HOS - \angle HOP_1$, $\angle HOS = \arccos R_m / R_s$, $\angle HOP_1 = \arccos R_m / R_n$; $\phi_{\max} = \angle HOS + \angle HOP_2$, $\angle HOP_2 = \arccos R_m / R_n$, $R_m = R_s \sin \delta_{\min}$ 。

2) 当目标所处的圆球面 A_n 的半径 R_n 在传感器的最大指向角的切线高度和卫星轨道高度之间时, 即 $|OH'| \leq R_n \leq R_s$, 同理其覆盖判据是: φ 位于弧 $\widehat{P'_1 P'_3}$ 或 $\widehat{P'_2 P'_4}$ 的端点对应的地心角之间。

3) 当目标所处的圆球面 A_n 的半径 R_n 大于卫星轨道高度之间时, 即 $R_n \geq R_s$, 同理其覆盖判据是: φ 位于弧 $\widehat{P'_1 P'_3}$ 的 2 端点对应的地心角之间。

4) 当目标所处的圆球面 A_n 的半径 R_n 在传感器的最小指向角的切线高度以内时, 即 $|OH| \leq R_n \leq R_e$ 。由于球面 A_n 不在卫星 S 传感器的视线范围内, 因此目标不能被卫星 S 覆盖和探测。



图 1 覆盖分析示意图

Fig. 1 The picture of coverage analysis

2 基于改进的网格点仿真的覆盖分析方法

2.1 网格划分原理

在地球球体模型假定下, 依据采样的网格点的面积相等的准则, 采用不同纬度的网格点采样经度间隔不等的采样方法能有效解决等纬度等精度间隔采样对星座全球和空间区域覆盖统计特性的影响。根据这一准则, 下面主要推导在采用网格点仿真方法对天基低轨凝视型传感器及星座进行空间覆盖分析中, 网格划分的经度间隔和纬度、经度间隔、网格划分精度之间的函数关系。

假定某一高度 H 的空间曲面进行网格划分的单位面积为 S , 根据空间曲面表面积分可以得出 S 关于网格点坐标的表达式。根据空间曲面 Σ 一般参数方程:

$$\begin{cases} x = x(u, v) \\ y = y(u, v) \\ z = z(u, v) \end{cases}, \quad (u, v) \in D \quad (2)$$

式中 D 是一平面有界闭区域, 那么曲面 Σ 的面积可用下式计算:

$$S = \iint_D \sqrt{\left[\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} \right]^2 + \left[\frac{\partial(y, z)}{\partial(u, v)} \right]^2 + \left[\frac{\partial(z, x)}{\partial(u, v)} \right]^2} du dv \quad (3)$$

对于半径为 R 的目标球面的单位网格曲面 Σ , 用纬度 B 、经度 L 参数表示球面坐标:

$$\begin{cases} x = R \cos B \sin L \\ y = R \cos B \cos L \\ z = R \sin B \end{cases}, \quad (B, L) \in D_{BL} \quad (4) \quad \sqrt{\left[\frac{\partial(x, y)}{\partial(B, L)} \right]^2 + \left[\frac{\partial(y, z)}{\partial(B, L)} \right]^2 + \left[\frac{\partial(z, x)}{\partial(B, L)} \right]^2} = R^2 \cos B \quad (5)$$

于是网格面积为:

$$S = \iint_{D_{BL}} R^2 \cos B dB dL = \int_{L_1}^{L_2} dL \int_{B_1}^{B_2} R^2 \cos B dB = (L_2 - L_1) R^2 (\sin B_2 - \sin B_1) = \Delta L R^2 (\sin(B_1 + \Delta B) - \sin B_1) \quad (6)$$

因此, 要使覆盖统计更加科学, 按经纬度划分的网格为等面积 S , 经度划分间隔 $\Delta L = S / R^2 (\sin(B_1 + \Delta B) - \sin B_1)$, 统计的网格数 $N = 4\pi R^2 / S$, 即纬度按照 ΔB 等间隔划分, 经度划分与所要统计的网格面积、当前的纬度和纬度划分间隔有关。

球面网格数与网格顶点数不相同,存在一定的比例关系,在进行网格点仿真时,经度划分间隔可表示为 $\Delta L = kS/R^2(\sin(B_1 + \Delta B) - \sin B_1)$, k 根据实际统计网格点数和精度确定。图2是球面所有矩形网格的点数 4.5×10^7 纬度划分间隔 0.1° 时,经度划分间隔随纬度变化的曲线图,随纬度的增加,经度划分间隔增大,保证划分网格面积相等。

2.2 覆盖性能指标

覆盖分析中^[8-9], T 表示时间周期推进时间点数, S_{sum} 为被分析空间区域的面积, P 为其点区域总数。以 S_j 表示某一点区域 j 的面积,点区域特征点被覆盖即认为该点区域被覆盖, k_{ij} 表示某一时刻 i 对点区域的覆盖重数。

1) 瞬时 N 重几何覆盖面积百分比,用于从面积上描述某一时刻的空间圆球面(或局部) N 重几何覆盖率:

$$\text{cov}N_{gi} = \sum_{j=1}^P S_{i,j}/S_{\text{sum}}, S_{ij} = \begin{cases} S_j, & \text{if } k_{ij} \geq N \\ 0, & \text{if } k_{ij} < N \end{cases} \quad (7)$$

2) 平均 N 重几何覆盖面积百分比,用于描述一段时间空间圆球面(或局部) N 重几何覆盖面积平均特性:

$$\text{cov}N_g = \sum_{i=1}^T \text{cov}N_{gi}/T \quad (8)$$

3) 纬(经)度带 N 重几何覆盖时间百分比,用于描述空间圆球面(或局部)在纬度带上的 N 重几何覆盖时间平均特性(局部时间特性)。纬(经)度带是指具有相同纬(经)度的特征点代表的点区域形成的一个带状区域, P_z 为纬(经)度带:

$$\text{cov}N_{zT} = \sum_{j=1}^{P_z} \sum_{i=1}^T R_{j,i}/(TP_z), R_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } k_{ij} \geq N \\ 0, & \text{if } k_{ij} < N \end{cases} \quad (9)$$

2.3 覆盖分析步骤

以天基凝视传感器覆盖模型为基础,按照空间网格划分原理,基于改进的网格点仿真的空间覆盖性能分析方法流程:

- 1) 设定圆球面高度 H 、仿真周期 T 、初始时刻 t 和仿真步长 Δt ;
- 2) 按照等面积 S 网格划分原则,以等纬度间隔、经度间隔 $\Delta L = kS/R^2(\sin(B_1 + \Delta B) - \sin B_1)$ 进行网格划分,并初始化第一个网格点的经纬度;
- 3) 根据轨道外推原理计算 t 时刻所有传感器所在卫星的位置;
- 4) 将网格点的经纬度转化为地固坐标系位置坐标;
- 5) 依据凝视传感器覆盖模型,逐一计算 t 时刻卫星星座的传感器网络对所有网格的覆盖重数,具体实现方法为:①计算网格点 P 和卫星的距离 R_p ;②计算覆盖模型中卫星与网格点形成的地心角 φ 和判定角 ϕ_{\min} 、 ϕ_{\max} ;③根据高度 H 的范围,判断地心距 φ 与 ϕ_{\min} 、 ϕ_{\max} 、 θ_{\min} 、 θ_{\max} 的关系,确定是否被卫星传感器覆盖;④根据各卫星与网格点的空间关系,统计在 t 时刻星座对网格点的覆盖重数;⑤根据网格的划分,按照以上步骤计算其他所有网格的覆盖重数;
- 6) 令 $t = t + \Delta t$,返回步骤2);
- 7) 统计在仿真周期 T 内,达到 $N(N=1,2,3,4,5)$ 重覆盖网格点数,根据式(8) - (9) 计算平均 N 重几何覆盖率。针对网格划分的不同区间按照以上步骤可以统计纬(经)度带 N 重几何覆盖率。



图2 经度划分间隔与纬度的关系
Fig.2 Relationship between longitude alteration of grid partition and latitude

3 数值仿真

3.1 仿真参数

采用 STSS 可能的星座方案^[3,10]开展空间覆盖性能仿真,构型为 24/3/1 的 Walker 圆轨道星座,其中地球半径为 6 378.14 km,卫星轨道高度 1 600 km,轨道倾角 102.49°,升交点赤经 0°,卫星的切线高度为 30 km。只考虑观测卫星以下的空间区域,仿真参数设置见表 1。

3.2 覆盖性能分析

针对不同导弹目标空间飞行高度不同,采用改进的网格点分析方法对 $\text{cov}N_g$ 和 $\text{cov}N_{zT}$ 2 项指标进行仿真分析。图 3 体现了平均 N 重几何覆盖面积百分比随空间覆盖高度的变化趋势,可见星座分别在 150 km、350 km、550 km、650 km、850 km 达到平均 90% 以上的 1 重、2 重、3 重、4 重、5 重覆盖率,基本上能满足对目标在特定空域内的立体观测。

图 4 是星座对高度为 30 km 的空间圆球的纬度带 N 重几何覆盖时间百分比关系图,30 km 空间球的 1 重覆盖达到 100%,随着纬度的增加,平均 N 重覆盖率越高。图 5 是星座对高度为 30 km 的空间圆球的平均 N 覆盖率随经度的变化关系图,具有波浪形的趋势,星座在经度为 25、80、150、200、275、325 达到相对较高的平均 N 覆盖率,而在 0、50、125、175、230、300、360 的覆盖率较低。

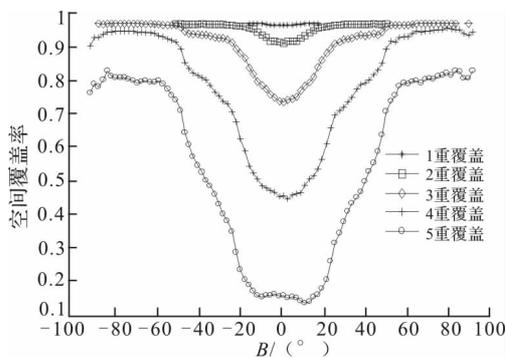


图 4 平均 N 重覆盖与纬度的关系

Fig. 4 Relationship between N -cover and latitude

表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation configuration parameters

仿真参数	设置值
传感器探测距离范围/km	[50,6 000]
光轴指向(俯仰)/(°)	[-180,180]
光轴指向(方位)/(°)	[-90,90]
划分网格点数/个	4.5×10^7
网格精度/(°)	0.000 1
仿真周期/s	120
仿真步长/s	5

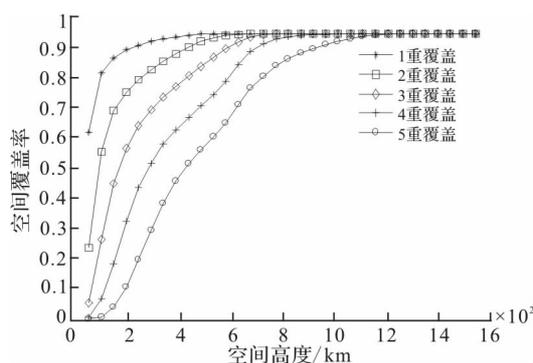


图 3 平均 N 多重覆盖与高度的关系

Fig. 3 Relationship between N -cover and altitude

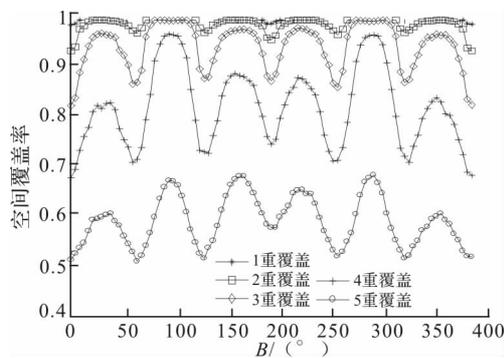


图 5 平均 N 重覆盖与经度的关系

Fig. 5 Relationship between N -cover and longitude

4 结束语

本文对天基低轨凝视传感器网的覆盖性能分析方法进行研究,建立了不同空域高度下传感器覆盖模型,对网格点分析方法进行了改进,通过仿真对典型天基低轨预警系统的空间覆盖性能指标进行了分析,分析了系统的平均 N 重覆盖与高度、纬度和经度的关系,验证了方法的有效性,为进一步开展天基低轨预警系统优化设计、面向导弹跟踪的天基预警系统任务规划和传感器资源调度研究奠定基础。

参考文献(References):

- [1] MORGAN B L. Exploratory model analysis of the pace based infrared system(SBIRS) low global scheduler problem [R].

- ADA309027,1999.
- [2] Jane's information group. Raytheon space tracking and surveillance system(STSS) sensor suite[J]. Jane's electro-optic system,2011(8):4-5.
- [3] 余二永,徐学文. STSS 星座空间覆盖性能分析方法研究[J]. 计算机仿真,2010,27(6):103-106.
SHE Eryong,XU Xuewen. Study on the method of STSS space coverage performanc[J]. Computer simulation, 2010,27(6):103-106. (in Chinese)
- [4] Morrison J J. A system of sixteen synchronous satellite for worldwide navigation and surveillance[R]. Report FAA-RD-73-30,1973.
- [5] 王博,安玮,周一宇. 跟踪传感器空域覆盖性能分析[J]. 航天控制,2000,27(6):90-94.
WANG Bo,AN Wei,ZHOU Yiyu. Analysis on airspace coverage performance of tracking sensors[J]. Aerospace control, 2000,27(6):90-94. (in Chinese)
- [6] 邓勇,王春明,张中兆. 红外星座凝视传感器的空间性能分析[J]. 宇航学报,2011,32(1):123-128.
DEND Yong,WANG Chunming,ZHANG Zhongzhao. Analysis on coverage performance of staring sensors infrared LEO constellation[J]. Journal of astronautics, 2011,32(1):123-128. (in Chinese)
- [7] 王博,许丹. 低轨星座红外凝视传感器覆盖性能分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2009,36(10):68-73.
WANG Bo,XU Dan. Analysis of the coverage of LEO constellation based infrared staring sensors[J]. Journal of Hunan university:natural sciences edition, 2009,36(10):68-73. (in Chinese)
- [8] 邓勇,王春明. 基于空间纬度区域优化的红外近地轨道星座设计[J]. 宇航学报,2010,31(5):1368-1372.
DEND Yong,WANG Chunming. A spatial latitudinal region optimization-based infrared LEO constellation design[J]. Journal of astronautics, 2010,31(5):1368-1372. (in Chinese)
- [9] 王春明,陈曦,邓勇. 基于 GDE3 算法的红外低轨星座设计[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(7):857-861.
WANG Chunming,CHEN Xi, DEND Yong. Infrared LEO constellation design by GDE 3 algorithm[J]. Journal of Beijing university of aeronautics and astronautics, 2010,36(7):857-861. (in Chinese)
- [10] Morgan B L. Exploratory model analysis of the space based infrared system (SBIRS) low global scheduler problem [D]. Marland;Master of science in operations research, naval post-graduate school of united states,1999.

(编辑:田新华)

Improved Grid Method for Analysis on Coverage Performance of Staring Sensors Based LEO

JIAN Ping, ZOU Peng, XIONG Wei, CHEN Zhi-ke
(Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: The main mission of early warning system of LEO is to detect and track the midcourse missile, so the problem of the staring sensors coverage of LEO is researched in the article. Firstly, the models of staring sensors in different space altitudes are built based on their operating range and turning of lens. Secondly, according to the limitation of the grid analysis method, the rule of grid partition is improved and the function relation of the latitude and longitude alternation, the grid precision of grid partition in the different latitudes is set up, the computing process of coverage analysis is put forward based on the typical coverage performance index. Finally, some space coverage performance of a typical constellation is educed through simulation, and the result shows that the coverage models and the improved grid method are available and effective.

Key words: early warning system of LEO; staring sensor; coverage performance; grid simulation