

## 面向区域的 GEO 红外预警卫星部署研究

钟宇, 吴晓燕, 黄树彩, 李成景, 康红霞

(空军工程大学防空反导学院, 西安 710051)

**摘要:** 面向区域的地球同步轨道(GEO)红外预警卫星能为特定区域反导作战提供及时可靠的预警信息, 确定了预警区域的经纬度范围, 提出以空域覆盖性能和定位精度为性能准则部署 GEO 预警卫星。首先基于 GEO 卫星对地覆盖模型建立了卫星空域覆盖性能模型; 然后分析 GEO 卫星与特定预警区域的空间几何关系, 以几何精度衰减因子(GDOP)为定位精度衡量指标, 建立了 GEO 星座对预警区域的定位精度模型; 最后通过仿真综合分析了不同卫星部署方式对空域覆盖性能和定位精度的影响, 给出了面向区域的 GEO 红外预警卫星部署的指导性结论。

**关键词:** 卫星部署; GEO 红外预警卫星; 空域覆盖; 定位精度; 几何精度衰减因子

**中图分类号:** TP732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)07-0079-05

## Area-Oriented GEO IR Early-Warning Satellites Deployment

ZHONG Yu, WU Xiao-yan, HUANG Shu-cai, LI Cheng-jing, KANG Hong-xia

(Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Area-oriented geosynchronous orbit (GEO) IR early-warning satellite can provide reliable early-warning information in time for anti-missile operation in specified area. With the scenario of longitude and latitude ranges of early-warning area, it was proposed to deploy GEO early-warning satellite by using airspace coverage performance and positioning accuracy as the performance criterion. Firstly, a satellite airspace coverage performance model was established based on GEO satellite-to-ground coverage model, space geometry relation of GEO satellite with the specified early-warning area was then analyzed. By using geometric dilution of precision (GDOP) as the positioning accuracy measurement index, a positioning accuracy model of GEO satellite to the early-warning area was established. Finally, a comprehensive analysis is made by simulation of how different ways of satellite deployment affect the airspace coverage performance and positioning accuracy, drawing a guidance conclusion for area-oriented GEO IR early-warning satellite deployment.

**Key words:** satellite deployment; GEO IR early-warning satellite; airspace coverage; positioning accuracy; Geometric Dilution of Precision (GDOP)

### 0 引言

天基红外预警卫星部署<sup>[1-2]</sup>是构建弹道导弹防御系统的重要环节, 依据国情和太空军事战略, 研究面向特定预警区域的卫星部署以提供及时可靠的预警信息, 具有十分重要的战略意义。

地球同步轨道 (Geosynchronous Orbit, GEO) 红外

预警卫星是预警卫星系统的重要组成部分, 它以无源定位的方式探测并跟踪主动段导弹。GEO 卫星上有扫描和凝视两种红外相机, 工作时, 扫描相机以一定周期和扫描方式对地进行大范围的监视覆盖, 在探测到目标后交予凝视相机进行跟踪<sup>[3-5]</sup>。GEO 卫星在估计目标战术参数以及引导后续反导拦截作战等方面发挥着重要作用<sup>[6-7]</sup>。

基于上述考虑, 本文研究面向区域的 GEO 卫星部署, 与中低轨卫星相比, GEO 卫星部署时需考虑的性能指标<sup>[8-9]</sup>较少, 依据 GEO 卫星的功能和工作原理, 本文从卫星部署对预警区域空域覆盖性能和定位精度

收稿日期: 2014-07-09

修回日期: 2014-09-11

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2012JM8020)

作者简介: 钟宇 (1987—), 男, 湖南桃江人, 博士生, 研究方向为系统建模与仿真、红外预警卫星目标探测与跟踪。

两方面的影响进行分析,以期得到一些有指导意义的结论。

## 1 GEO 卫星空域覆盖性能建模

衡量 GEO 卫星的性能主要有主动段导弹的探测覆盖能力和定位跟踪能力,本文的目标是获得这两方面能力整体最优的卫星部署方案,本节先进行 GEO 卫星的空域覆盖分析再建立覆盖模型。

### 1.1 GEO 卫星空域覆盖分析

星载扫描相机利用线状阵列以圆锥-旋转扫描或推扫的方式周期性工作,在空间形成视锥,视锥与地表相交而成覆盖空域。GEO 卫星的作战对象是主动段导弹,其形成的覆盖空域应包含导弹主动段飞行高度空域,图 1 为 GEO 卫星空域覆盖示意图。

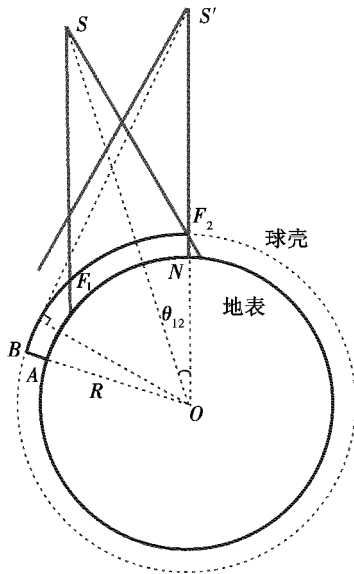


图 1 GEO 卫星空域覆盖示意图

Fig. 1 Sketch map of airspace coverage of GEO satellite

如图 1 所示,可用包围地球的球壳表示导弹主动段飞行高度范围,任取地表某一经度范围的纬线圈弧  $\widehat{AN}$ ,其形成的空域为部分圆环  $ABF_2N$ ,GEO 卫星处于 S 点时对该空域的视场角为  $\angle F_1SF_2$ ,受卫星位置、视场大小和地球曲率的影响,单颗卫星的覆盖空域是有限的,不能将上述部分圆环  $ABF_2N$  完全覆盖;另外,即使将卫星部署至  $S'$ ,使得卫星视场边界经过  $F_2N$  而实现最大覆盖,此时卫星视线对球壳的切点仍可能在弧  $\widehat{BF_2}$  上,即对指定预警空域不能实现全覆盖,因而需要部署多颗卫星形成星座以实现协同覆盖。

GEO 星座完全覆盖预警区域的条件为:对于预警范围每一条纬线圈弧对应的空域,GEO 星座都能实现全部覆盖。具体地讲,在图 1 中,弧  $\widehat{AN}$  和  $\widehat{BF_2}$  都在星座形成的总视场内;若不能满足上述条件,星座将存在覆

盖盲区。

想定涵盖国境及周边国家在内的特定预警区域为  $(60^\circ \sim 145^\circ E, 0^\circ \sim 60^\circ N)$ ,为实现对该区域的预警,在同步轨道上部署两颗 GEO 卫星,两卫星分别做周期性的推扫以实现协同覆盖。下面建立 GEO 卫星推扫形成的空域覆盖模型。

### 1.2 GEO 卫星空域覆盖模型

由以上分析可知,GEO 卫星对预警空域的覆盖可等价描述为对指定地表预警区域以及该区域上空相应球壳区域的覆盖,之后可利用空域完全覆盖的条件判断 GEO 卫星的空域覆盖情况。依据推扫覆盖的原理,GEO 卫星对地表和球壳区域的覆盖模型是相同的,因此可在建立卫星对地覆盖模型的基础上确定空域覆盖。

为简化问题,假设地球在预警区域为均匀正球体,不考虑各种误差引起的相机指向偏差,假定探测器的作用距离足以形成覆盖。先建立大地直角坐标系  $O-XYZ$ <sup>[10]</sup>、星载平台坐标系  $UEN$  和焦平面坐标系  $s-uv$ <sup>[6]</sup>,设相机焦距为  $f$ ,焦点为  $F$ ,如图 2 所示。

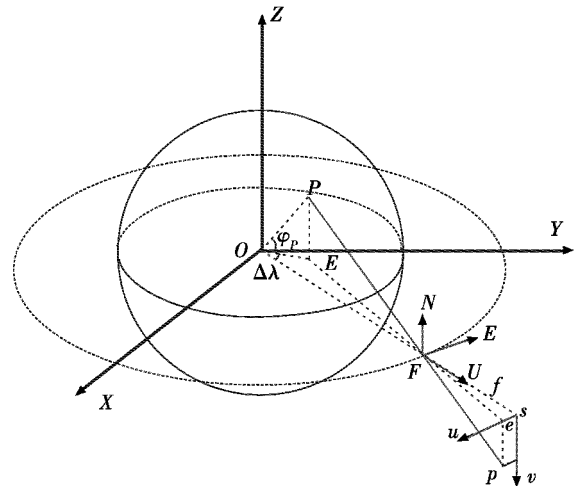


图 2 坐标系示意图

Fig. 2 Coordinate system

结合图 2,推扫覆盖的原理可解释为,线阵列在  $s-uv$  上与  $u$  轴平行排列,且沿  $v$  轴周期往复运动形成一面阵列,该面阵列沿卫星自旋轴  $sO$  方向通过  $F$  点在空间形成视锥,视锥与地表相交后即成对地覆盖区域,因此可通过求解  $s-uv$  上某点  $p$  的坐标与其在地表上投影点  $P$  的经纬度关系确定推扫形成的覆盖区域。

先考虑相机指向轴与卫星自旋轴重合时的情况。设在图 2 中 GEO 卫星星下点经纬度分别为  $\lambda_1$  和  $O$ ,地球平均半径为  $R$ ,卫星距地心距离  $|FO| = H$ ,线阵列在  $s-uv$  上推扫形成的坐标范围为

$$S_{FP} = \{p(u_p, v_p) | 0 \leq u_p \leq l_1, \chi_1 \leq v_p \leq \chi_2\} \quad (1)$$

式中:  $l_1$  为线阵列长度;  $\chi_1 \sim \chi_2$  为推扫的纵向范围。

设  $p$  点在  $u$  轴上投影点为  $e$ ,而点  $P$  满足  $|OP| =$

$R, P$ 点在赤道面上的投影为  $E$ , 设  $P$ 点经纬度分别为  $\lambda_p$  和  $\varphi_p$ , 设地表所有投影点的集合为  $S_c$ , 在图2所示的几何关系下, 可按图3所示流程求解  $S_c$ 。

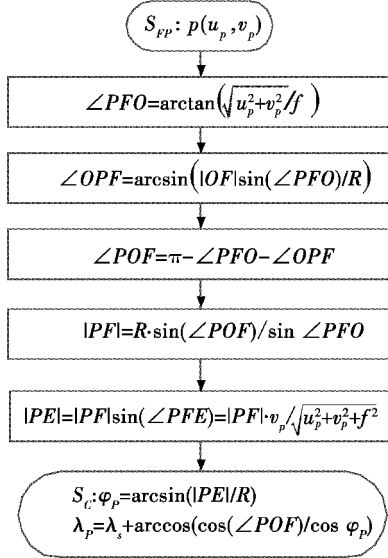


图3 投影点  $P$  经纬度计算流程图

Fig. 3 Flow chart for calculating longitude and latitude at subpoint  $P$

按图3计算流程得到  $\lambda_p$ , 若  $\lambda_p > 180^\circ$ , 则  $\lambda_p = 180^\circ - \lambda_p$ , 若  $\lambda_p < -180^\circ$ , 则  $\lambda_p = -180^\circ - \lambda_p$ , 其他情况时  $\lambda_p$  值不变; 另需指出的是, 若  $\varphi_p > 0$ , 表示北纬, 若  $\varphi_p < 0$ , 表示南纬, 若  $\lambda_p > 0$ , 表示东经, 若  $\lambda_p < 0$ , 表示西经。

在实际应用中, 卫星为了对特定区域实行监视覆盖, 相机指向轴可能与卫星自旋轴不重合, 此时指向轴偏转示意图如图4。

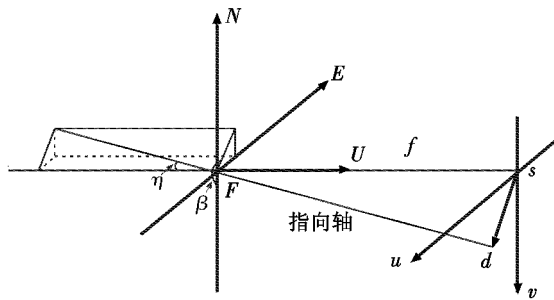


图4 相机指向轴偏转示意图

Fig. 4 Pointing axis deflexion of detector

相机指向轴偏转的方向可用  $UEN$  中的方位角  $\beta$  和高低角  $\eta$  表示, 指向轴偏离自旋轴后在  $s-uw$  上形成偏移矢量  $sd$ , 此时式(1)描述的  $S_{FP}$  可表示为

$$S'_{FP} = \left\{ p(u_p, v_p) \left| \begin{array}{l} -ftan \eta \sin \beta \leq u_p \leq l_1 - ftan \eta \sin \beta \\ \chi_1 - ftan \eta \cos \beta \leq v_p \leq \chi_2 - ftan \eta \cos \beta \end{array} \right. \right\}. \quad (2)$$

由  $S'_{FP}$  按照图3所示的计算流程可求出指向轴偏

离自旋轴时卫星对地覆盖情况。

GEO 卫星扫描形成的视锥在临边探测范围以内时, 即视锥张成的总视场全部都在地球背景以内时, 可按图3所示的流程由  $S_{FP}$  或  $S'_{FP}$  求解 GEO 卫星对地覆盖区域, 考虑到卫星扫描有可能超出临边范围, 下面给出临边覆盖的判断条件以完善上述模型, 图5为临边覆盖的示意图。

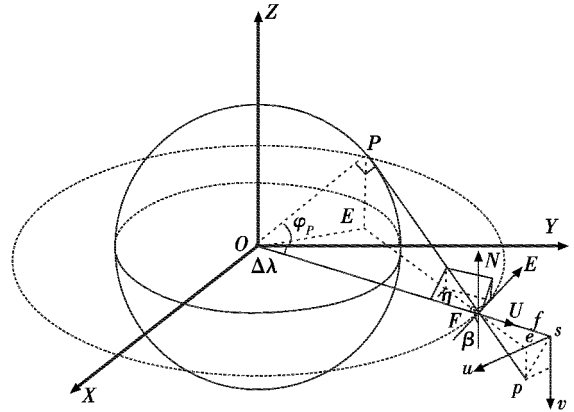


图5 临边覆盖示意图

Fig. 5 Sketch map of limb coverage

临边探测时投影线与地表相切,  $OP \perp FP$ , 由  $\Delta PFO$  和  $\Delta sFp$  的关系式  $\angle PFO = \angle sFp$  易推知临边覆盖判定

条件: 若  $S_{FP}$  或  $S'_{FP}$  中的坐标满足  $\frac{\sqrt{u_p^2 + v_p^2}}{f} \leq \frac{R}{\sqrt{H^2 - R^2}}$ , 则

点  $p$  在地表有相应的投影点  $P$ , 也即投影点在临边覆盖范围内, 可按图3流程求解投影点  $P$  的经纬度; 否则, 在临边覆盖范围外, 点  $p$  在地表无投影点。

综合本文所述, 结合临边覆盖判定条件, 对于空间上成一定几何关系的 GEO 星座, 按照计算流程求解卫星以一定指向对特定预警区域和相应球壳区域的覆盖情况后, 再依据空域完全覆盖的条件可分析 GEO 星座的空域覆盖性能。

## 2 GEO 卫星定位精度建模

上节建立了 GEO 卫星的空域覆盖模型, 本节分析 GEO 卫星的区域定位精度。图6为由两颗 GEO 卫星构成的星座对特定区域上方某高程点  $P$  的定位示意图。

设两颗卫星  $S_1$  和  $S_2$  星下点经度分别为  $\lambda_{s1}$  和  $\lambda_{s2}$ , 则它们在  $O-XYZ$  下的坐标分别为  $(H \cos \lambda_{s1}, H \sin \lambda_{s1}, 0)$  和  $(H \cos \lambda_{s2}, H \sin \lambda_{s2}, 0)$ 。

对于特定预警区域上空相应球壳上的点  $P$ , 设其高程为  $h$ , 星下点经纬度分别为  $\varphi_p$  和  $\lambda_p$ ,  $P$  在赤道面上投影为  $E$ , 则  $P$  在  $O-XYZ$  下的坐标为  $P((R+h) \cos \varphi_p \cdot \cos \lambda_p, (R+h) \cos \varphi_p \cdot \sin \lambda_p, (R+h) \sin \lambda_p)$ 。

GEO 预警卫星以无源定位的方式对目标进行定位

跟踪,而无源定位的精度衡量指标主要有克拉美-罗下界(Cramer-Rao Lower Bound, CRLB)和几何精度衰减因子(Geometric Dilution of Precision, GDOP)<sup>[11-13]</sup>等,为直观显示 GEO 星座对上述特定区域的定位精度,本文用  $G_{\text{GDOP}}$  作为衡量指标,推导本问题的  $G_{\text{GDOP}}$  表达式。

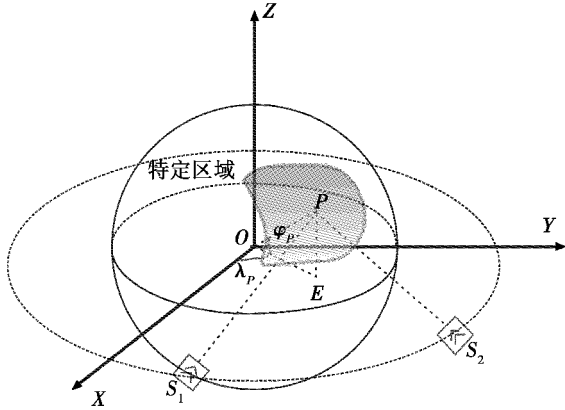


图6 GEO星座特定区域定位示意图

Fig. 6 Locating special region by GEO satellites

在三维空间中,由于 GEO 星座和  $P$  可确定一个平面,因而三维空间中的 GDOP 可以转换到二维平面上求解。以点  $S_1$  为坐标原点,点  $S_1$  与点  $S_2$  连线为  $x$  轴向,建立如图 7 所示坐标系。

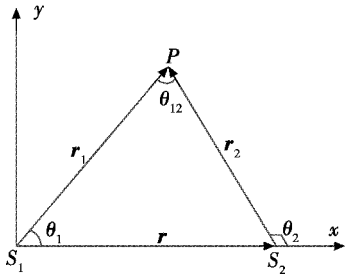


图7 GEO星座目标定位示意图

Fig. 7 Target location by GEO satellites

定义

$$\mathbf{r}_1 = \overrightarrow{S_1P}, \mathbf{r}_2 = \overrightarrow{S_2P}, \mathbf{r} = \overrightarrow{S_1S_2}, \quad (3)$$

$$r_1 = \|\mathbf{r}_1\|, r_2 = \|\mathbf{r}_2\|, r = \|\mathbf{r}\|。 \quad (4)$$

结合图 5 需指出的是,计算时若  $r_i$  满足  $r_i > |FP|$ ,  $i=1,2$ ,则在该  $P$  点不能实现 GEO 双星定位,存在定位盲区。

转换到二维平面后,各点坐标为  $S_1(0,0), S_2(r,0), P(r_1 \cos \theta_1, r_1 \sin \theta_1)$ , 其中  $\cos \theta_i = \frac{\mathbf{r}_i \cdot \mathbf{r}}{r_i r}$ , 由坐标点的几何关系有

$$\tan \theta_i = \frac{y_p - y_{si}}{x_p - x_{si}} \quad (5)$$

求导可得

$$d\theta_i = -\frac{\sin \theta_i}{r_i} dx_p + \frac{\cos \theta_i}{r_i} dy_p \quad (6)$$

记

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} -\frac{\sin \theta_1}{r_1} & \frac{\cos \theta_1}{r_1} \\ -\frac{\sin \theta_2}{r_2} & \frac{\cos \theta_2}{r_2} \end{pmatrix}。$$

设 GEO 卫星量测误差之方差为  $\sigma_i^2$ , 则协方差阵为

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 \end{pmatrix}。$$

$G_{\text{GDOP}}$  表达式为

$$G_{\text{GDOP}} = \sqrt{\text{trace}((\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1})} \quad (7)$$

化简得

$$G_{\text{GDOP}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 r_1^2 + \sigma_2^2 r_2^2}{\sin^2 \theta_{12}}}。 \quad (8)$$

综合本节分析,部署好 GEO 卫星后,先由式(3)~式(5)得卫星和空域上方某点的大地直角坐标,再将三维空间的定位精度问题转换到二维平面上求解,由式(6)、式(7)获得二维平面上观测几何的矢量关系,最后由式(11)求得 GEO 星座对特定区域的定位精度。

### 3 仿真分析

在建立空域覆盖性能和定位精度模型的基础上,参考 DSP 卫星资料取下列参数值进行仿真:设 GEO 卫星高度为 36000 km,探测器像元尺寸为  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ ,线阵列长度 6000 单元,焦距为 1 m,取地球半径为 6371 km,量测误差为  $\sigma_i = 50 \mu\text{rad}$ ,主动段导弹飞行空域高程设为 300 km,推扫纵向范围为 6000 阵元。仿真时两 GEO 卫星相对特定预警区域 ( $60^\circ \sim 145^\circ\text{E}, 0^\circ \sim 60^\circ\text{N}$ ) 对称分布,下面选取几个典型位置分析卫星部署对星座性能的影响,说明如何获得整体性能最佳的星座。先将 GEO 卫星分别部署于  $60^\circ\text{E}$  和  $145^\circ\text{E}$  的轨道上,空域覆盖和 GDOP 情况见图 8。

分析图 8,卫星指向轴与自旋轴重合,使卫星尽可能地覆盖特定预警区域,此时单星对地表和球壳的覆盖范围几乎重合,然而受卫星位置和地球曲率的影响,单颗卫星对预警区域仍存在较大的覆盖盲区,星座在星下点所在经线附近一定经度范围也存在较大的定位盲区。为克服这些问题,使卫星对球壳进行临边探测以获得最大覆盖并逐步减小两星星下点经度差进行仿真,当 GEO 卫星分别部署于  $66^\circ\text{E}$  和  $139^\circ\text{E}$  的轨道上,能获得较好星座性能,见图 9。

分析图 9,单星对预警区域有很好的空域覆盖性能,双星能对绝大部分区域实现二重覆盖,而且定位精度也有一定程度的提高,定位盲区较小。若继续减小卫星星下点经度差,星座性能并不会会有明显的改善,甚至可能变差,将卫星分别部署于  $70^\circ\text{E}$  和  $135^\circ\text{E}$  的轨道

上,星座性能仿真结果见图10。

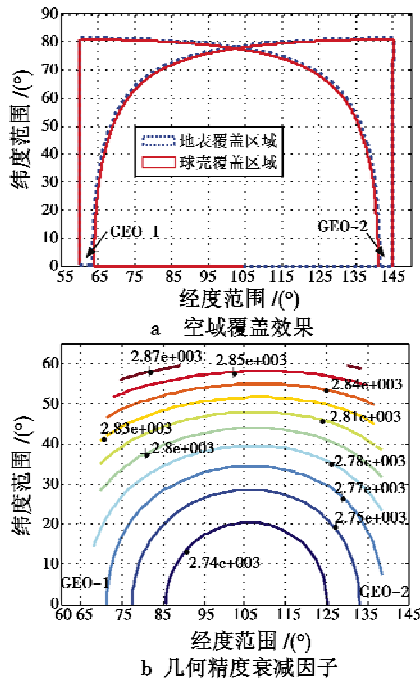


图8  $\lambda_{s1} = 60^\circ, \lambda_{s2} = 145^\circ$ 时 GEO 星座性能  
 Fig. 8 The performance of GEO satellites when  $\lambda_{s1} = 60^\circ, \lambda_{s2} = 145^\circ$

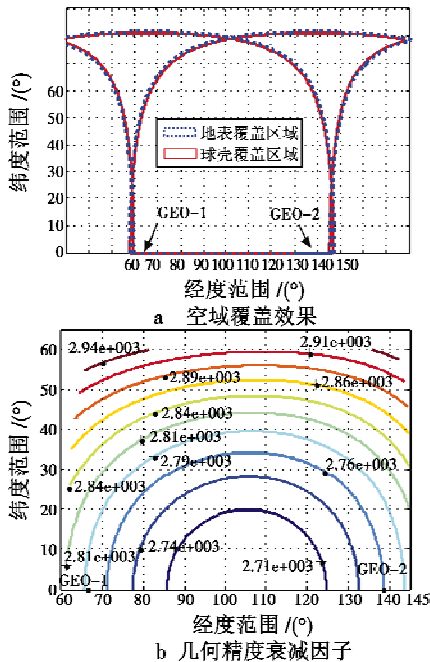


图9  $\lambda_{s1} = 66^\circ, \lambda_{s2} = 139^\circ$ 时 GEO 星座性能  
 Fig. 9 The performance of GEO satellites when  $\lambda_{s1} = 66^\circ, \lambda_{s2} = 139^\circ$

分析图10,此时的星座部署没有改善其空域覆盖性能,而定位精度有一定程度的下降。若继续减小星下点经度差,空域覆盖性能将显著变差,定位精度将大幅降低。

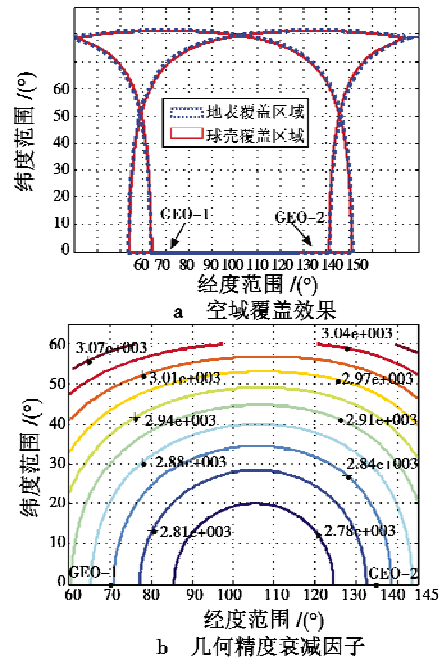


图10  $\lambda_{s1} = 70^\circ, \lambda_{s2} = 135^\circ$ 时 GEO 星座性能  
 Fig. 10 The performance of GEO satellites when  $\lambda_{s1} = 70^\circ, \lambda_{s2} = 135^\circ$

由仿真分析可知,受地球曲率的影响,单颗 GEO 卫星对特定预警区域不能实现全空域覆盖,双星协同预警是较为合适的选择;基于 DSP 卫星参数,为获得较好的空域覆盖性能和较高的定位精度,建议将 GEO 双星分别部署在  $66^\circ\text{E}$  和  $139^\circ\text{E}$  的轨道上。

#### 4 结束语

本文以空域覆盖性能和定位跟踪精度为指标研究了面向特定预警区域的 GEO 红外预警卫星部署,分别提出了空域覆盖模型和定位精度衡量指标 GDOP 的计算模型,通过仿真,典型 GEO 卫星部署的性能得到了一些有意义的结论,为部署 GEO 预警卫星提供了有价值的参考。本文的研究能为天基红外预警系统性能分析以及未来导弹防御系统构建提供一定参考和技术支撑,提出的模型也适应于低轨红外预警星座设计、星座资源调度等。

#### 参考文献

[1] 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 C M, CHEN X, DENG Y. Infrared LEO constellation design by GDE3 algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(7): 857-861.)  
 [2] BUDIANTO I A, OLDS J R. A collaborative optimization approach to design and deployment of a space based in-

## 5 结束语

使用 FPGA 来设计基于 PCIe 总线的数据传输,可以省去专用的 PCIe 接口芯片,降低硬件的设计成本,提高硬件集成度的同时还能利用 FPGA 的可编程特性提高设计的灵活性与适应性<sup>[10]</sup>。与此同时,目前很多 FPGA 内都嵌入了 PCIe 的硬核,此硬核支持 PCIe 传输的单字读写操作以及 DMA 读写操作,由于 PCIe 具有一定的协议开销,其单字传输效率不甚理想,因此,本文在 PCIe 单字传输的基础上提出了一种基于 PCIe 接口的 DMA 传输的设计方案,此方案可以稳定快速地实现 PCIe 总线的 DMA 传输。经测试,DMA 传输方案在传输带宽方面满足设计要求。

### 参考文献

- [1] 马鸣锦,朱剑冰. PCI、PCI-X 和 PCI Express 的原理及体系结构[M]. 北京:清华大学出版社,2007. (MA M J, ZHU J B. Architecture and principle of PCI, PCI-X and PCI Express [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007. )
  - [2] BUDRUK R. PCI Express 系统体系结构标准教材[M]. 田玉敏,王崧,张波,译. 北京:电子工业出版社,2005. (BUDRUK R. PCI Express system architecture [M]. Translated by TIAN Y M, WANG S, ZHANG B. Beijing: Electronic Industry Press, 2005. )
  - [3] 王齐. PCI Express 体系结构导读[M]. 北京:机械工业出版社,2011. (WANG Q. Introduction of PCI Express architecture[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. )
  - [4] 汪精华,胡善清,龙腾. 基于 FPGA 实现的 PCIe 协议的 DMA 读写模块[J]. 微计算信息,2010,26(10):7-9. (WANG J H, HU S Q, LONG T. The implementation of DMA reading and writing module on FPGA based on PCI Express protocol [J]. Microcomputer Information, 2010, 26(10):7-9. )
  - [5] PCI Special Interest Group. PCI Express base specification revision 1.0a[EB/OL]. [2014-07-21]. <http://netyi.net/Book>.
  - [6] Xilinx. LogiCore™ IP endpoint for PCI Express V3.7 user guide[EB/OL]. [2014-07-21]. <http://www.xilinx.com>.
  - [7] 王嘉良,赵曙光. 用 FPGA 实现 PCI-E 接口和 DMA 控制器设计[J]. 计算机技术与发展,2011,21(6):181-184. (WANG J L, ZHAO S G. PCI-E interface implementation and DMA engine design with FPGA[J]. Computer Technology and Development, 2011, 21(6):181-184. )
  - [8] 石峰,吴建飞,刘凯. 基于 Xilinx FPGA 的 PCIE 接口实现[J]. 微处理机,2008(6):19-21. (SHI F, WU J F, LIU K. PCIE port develop based on Xilinx FPGA[J]. Microprocessors, 2008(6):19-21. )
  - [9] STILIADIS D, VARMA A. Selective victim caching: a method to improve the performance of direct-mapped caches [J]. IEEE Transactions on Computers, 2007, 46(5):603-610.
  - [10] 闫振兴. 基于 FPGA 的 PCI Express 接口的设计与实现[D]. 北京:北京理工大学,2009. (YAN Z X. The design and implementation of PCI Express interface based on FPGA [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2009. )
- 
- (上接第 83 页)
- frared system constellation [C]// Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 2001:385-393.
  - [3] 刘仁,梁维泰,赵敏. 一体化空天防御系统[M]. 北京:国防工业出版社,2011. (LIU R, LIANG W T, ZHAO M. Integrated aerospace defense system [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011. )
  - [4] ANDREAS N S. Space-Based Infrared System (SBIRS) system of systems [C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference, 1997:429-438.
  - [5] SMITH M S. Military space programs: issues concerning DOD's SBIRS and STSS programs [R]. USA: Library of Congress Washington DC Congressional Research Service, 2005.
  - [6] BEAULIEU M R. Launch detection satellite system engineering error analysis [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 1996.
  - [7] DANIS N J. Space-based tactical ballistic missile launch parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(2):412-424.
  - [8] 刘刚,吴诗其. 区域性星座设计[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(7):15-18. (LIU G, WU S Q. Designing satellite constellations for partial coverage [J]. Systems Engineering and Electronics, 2002, 24(7):15-18. )
  - [9] 张育林,范丽,张艳,等. 卫星星座理论与设计[M]. 北京:科学出版社,2008. (ZHANG Y L, FAN L, ZHANG Y, et al. Theory and design of satellite constellations [M]. Beijing: Science Press, 2008. )
  - [10] 张毅,杨辉耀,李俊莉. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1999. (ZHANG Y, YANG H Y, LI J L. Missile ballistics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 1999. )
  - [11] TORRIERI D J. Statistical theory of passive location systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1984, 20(2):183-198.
  - [12] HAIM Z B, ELDAR Y C. On the constrained Cramer-Rao bound with a singular fisher information matrix [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(6):453-456.
  - [13] BISHOP A N, FIDAN B, ANDERSON B D O, et al. Optimality analysis of sensor-target geometries in passive localization: part 1-bearing-only localization [C]//Proceedings of 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information (ISSNIP), 2007:7-12.