

基于连续覆盖特性分析的星座设计^{*}

胡俊¹ 陈博² 王建宇¹ 朱振才¹

¹(中国科学院上海技术物理研究所 上海 200083)

²(中国科学院上海微系统与信息技术研究所)

摘 要

研究了需要对地面目标进行连续覆盖的星座的设计问题。首先推导了对覆盖性能有重要影响的星间覆盖间隔时间和轨道面覆盖间隔时间的计算公式,通过算例针对不同配置的星座进行了计算,使用工程仿真软件 STK 验证了分析结果。通过理论分析、算例计算以及工程仿真为该类型星座设计提供了理论指导。

关键词 星座设计;覆盖特性;星间覆盖间隔时间;轨道面覆盖间隔时间

1 引言

近年来,国内外对卫星组网建立星座进行了大量的研究^{[1]~[3]},如美国的“全球星”星座^[4]、Orbcomm 小卫星星座^[5]以及我国正在启动的环境与灾害小卫星星座。针对不同的性能指标,对星座设计提出了不同的要求。对于灾害监测卫星星座,要求对森林火灾或者大面积虫害进行实时连续监测;对于军事侦察卫星星座,需要对敏感军事地区的敌军军事部署,以及战略物质的调动进行连续的侦察。对于特定位置的地面站,要求卫星星座对其进行连续覆盖,以满足卫星和地面站之间的信号和控制指令的实时传输。这就要求对轨道和星座进行设计,提供较好的覆盖性能:即必须保证在较短的间隔时间内卫星星座对地面目标进行连续地覆盖。这些性能要求受轨道参数、星座配置等影响,本文的目的是提供一种星座设计方法,满足星座对地面目标位置的覆盖要求。

2 问题分析

针对国内外观测星座的特点,我们采用倾斜圆轨道,另外考虑星座的寿命以及空间环境的影响^[6],轨道高度选择在 300—800 km。为了便于分析,轨道倾角选择与地面目标位置纬度一致。

下面考虑星座配置主要是考虑轨道面数,以及每个轨道面内卫星数目这两个变量对覆盖特性的影响。希望用最小数目的卫星,选取最优的轨道面数以及每轨卫星数满足星座的覆盖性能要求,也就是对于特定的地面目标能提供最少的轨道面覆盖间隔时间和星间覆盖间隔时间,这两个变量体现了星座对地面目标的覆盖性能。下面对它们进行分析推导。

^{*} 国家 863 计划项目资助 (2002AA731262)

2002-11-18 收到原稿, 2003-03-15 收到修定稿

置的经度差 Δl 可以认为近似等于 180° . 根据球面三角中两点之间的距离公式, 得到

$$\sin(\lambda_{\min}) = \cos(90^\circ - \lambda_{\min}) = \sin(l_p) \sin(l_t) + \cos(l_p) \cos(l_t) \cos(\Delta l).$$

由于卫星在低轨道高速运动, 其速度远大于地球自转的速度, 所以不考虑地球的自转, 同时由于采用圆轨道可认为卫星沿轨道常速运动, 在以上假设的基础上, 可以确定卫星在一个轨道周期内对地面目标可视的时间 T_f , 得 $T_f = \left(\frac{P}{180^\circ}\right) \arccos \left[\frac{\cos(\lambda_{\max})}{\cos(\lambda_{\min})}\right]$.

图 3 表示了当地球旋转时目标位置的地面轨迹, 以及卫星星下点轨迹运动几何关系. 该图表示了由于地球自旋目标位置开始进入卫星视场时的球面几何关系, 给出了允许目标位置处于卫星视场范围内的角度 2γ . 根据这个角度就可知道一天内卫星轨道面对目标位置的可视时间.

研究图 3 中由 $\lambda_{\max}$, $90^\circ - i$ 和 ϕ 组成的球面三角形, ϕ 是天顶到卫星视场中心的球面距离, 并且 $\phi = 90^\circ - \delta$, 由于轨道倾角 i 等于目标位置的纬度 ϕ_t , 所以 $90^\circ - \phi_{ta} = 90^\circ - i$, 根据球面几何余弦公式, 得到

$$\cos(90^\circ - \phi_{ta}) = \cos(\lambda_{\max}) \cos(90^\circ - \delta) + \sin(\lambda_{\max}) \sin(90^\circ - \delta) \cos(90^\circ - \alpha), \quad (4)$$

$$\sin(\phi_{ta}) = \cos(\lambda_{\max}) \sin(\delta) + \sin(\lambda_{\max}) \cos(\delta) \sin(\alpha). \quad (5)$$

又根据直角球面三角公式, 得到

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(i)}{\cos(\delta)}. \quad (6)$$

将式 (6) 代入式 (5), 得到

$$\sin(i) = \cos(\lambda_{\max}) \sin(\delta) + \sin(\lambda_{\max}) \cos(i). \quad (7)$$

由式 (7) 可以得到 $\sin(\delta) = \left[\frac{\sin(i) - \sin(\lambda_{\max}) \cos(i)}{\cos(\lambda_{\max})} \right]$.

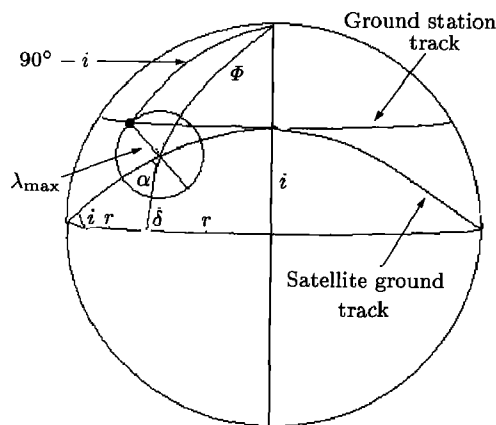


图 3 目标位置与星下点轨迹运动几何关系

Fig.3 Kinematic geometry relation between target location and sub-satellite point

根据直角球面三角公式, 得到 $\sin(\Gamma) = \frac{\tan(\delta)}{\tan(i)}$.

已知 $\gamma = 90^\circ - \Gamma$, 令 $\theta_c = 2\gamma$ 是地面目标在卫星视场范围内的总覆盖角. 则可以求得地面目标在一天内处于卫星视场范围内的合计时间, 得 $T_c = \left(\frac{\theta_{cov}}{360^\circ}\right) 24$ (恒星时).

根据以上推导公式, 我们考虑由 n 颗卫星, m 个轨道平面组成的星座.

星间覆盖间隔时间 T_s 定义为同轨道平面内 2 颗卫星之间对目标位置可视的间隔时间,

$$T_s = \frac{P}{n/m} - \frac{T_{fov}}{2}. \quad (8)$$

轨道面覆盖间隔时间 T_{n1} 定义为地面目标位置随着地球自转从星座的一个轨道平面进入另一个轨道面的时间, 它是由于轨道间距引起的星座对地面目标覆盖的间隔时间. 定义 θ_n 表示地球自转的角度, 此时目标位置不在星座中任何一颗卫星的可视范围内, 假设星座 m 个轨道面均匀分布, 可以得到:

$$\theta_n = \frac{360^\circ - m\theta_{cov}}{m} = \frac{360^\circ}{m} - \theta_c, \quad (9)$$

$$T_{n1} = \theta_n \left(\frac{24}{360^\circ}\right) \text{ 恒星时}. \quad (10)$$

同理, 可以得到目标位置不被任一轨道平面覆盖的时间 T_n 为 $T_n = m\theta_n \left(\frac{24}{360^\circ}\right)$ 恒星时.

式 (9) 表明, 当 $\theta_c \rightarrow 360^\circ/m$ 时, $\theta_n \rightarrow 0^\circ$. 由于 θ_c 取决于卫星的视场, 而卫星的视场又由卫星的高度决定, 所以从理论上可以认为对于指定不同的轨道高度, 都可以设计出最优的星座轨道面数 m 以提供完全的轨道面覆盖. 即 $\theta_n \rightarrow 0^\circ \Rightarrow \frac{360^\circ}{m} - \theta_c = 0^\circ \Rightarrow m = \frac{360^\circ}{\theta_c}$.

上式为任何一个卫星星座提供了理论上对地面目标位置实现完全轨道面覆盖的必要条件, 能否在任何时间都可以实现对地面目标位置的连续覆盖还要由式 (8) 决定的星间覆盖间隔时间以及传感器性能决定.

3 算例及结果

根据以上分析, 给定以下轨道参数.

轨道半长轴: $6\,378 + (300 - 800)$ km

偏心率: 0

轨道倾角: 目标位置纬度

升交点赤经: 270°

近地点幅角: 90°

对于本文的轨道高度 300—800 km, 设定 $\varepsilon_{\min} = 10^\circ$, 则 $\lambda_{\max}$ 约等于 36° .

首先根据式 (8) 计算星间覆盖间隔时间 T_s . 随高度以及每轨卫星数的变化规律如图 4. 图中给出了在不同的轨道高度下, 由不同数目的卫星组成的轨道提供的星间覆盖间隔时间. 每轨 7 颗卫星能够提供 5 min 的星间间隔; 每轨 5 颗卫星能够提供 10 min 的星间间隔; 每轨 3 颗卫星能够提供 25 min 的时间间隔. 同时可以看出轨道高度对结果影响很小. 在计算中只选取了倾角等于 40° 的情况, 因为轨道倾角对星间覆盖间隔时间 T_s 没有影响.

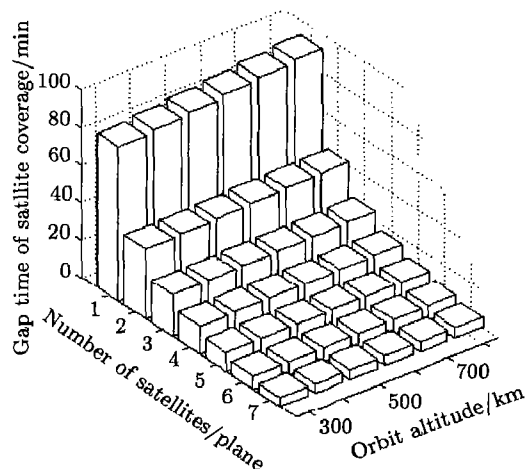


图 4 星间覆盖间隔时间分布图

Fig.4 Distribution of gap time of satellite coverage

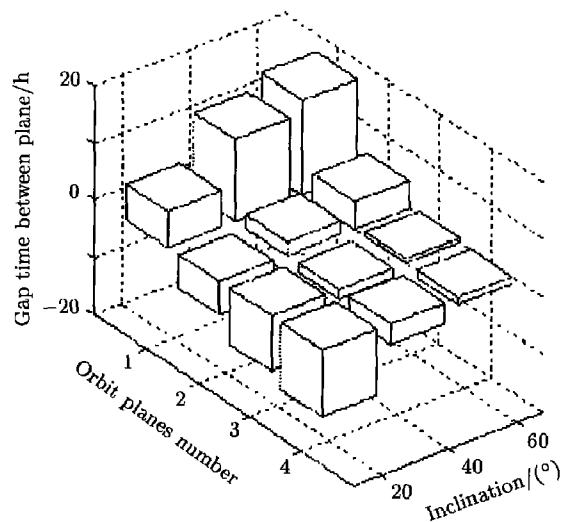


图 5 轨道面覆盖间隔时间分布图

Fig.5 Distribution of gap time of plane coverage

根据式 (10) 计算出的轨道面覆盖间隔时间 T_{n1} 随轨道倾角和轨道面数的变化规律如图 5. 由于轨道面覆盖时间间隔受轨道倾角影响, 算例中给出了倾角为 20° 、 40° 、 60° 三种情况下的计算结果. 由图中可以看出, 对于倾角为 20° 的低倾角轨道, 2 个轨道面就可以保证星座对地面目标位置的轨道面完全覆盖; 而对于 40° 倾角的轨道, 需要 3 个轨道面才能满足上述的要求; 对于 60° 的倾角, 则需要 4 个轨道面实现轨道面对同纬度目标的连续覆盖.

图中一些情况下轨道面覆盖间隔时间出现了负数, 这是由于对得出这些结果所用到的公式作了一些近似假设并且忽略了某些因素比如多个轨道面对地面目标位置覆盖的重

叠、轨道面之间卫星的相位关系。上面的分析和计算虽然存在着一些偏差,但是可以真实反映轨道面间隔时间的分布趋势。

对于 $60^\circ\text{--}90^\circ$ 的大倾角轨道卫星,当地面目标位置纬度的互余角 $\kappa \leq \frac{1}{2}\lambda_{\max}$ 时,在只有一个轨道平面的情况下,地面目标也总是在卫星的视场范围内,所以通过增加轨道面数来满足对地面目标的完全覆盖已经没有意义。可以根据允许的星间覆盖间隔时间 T_s ,来确定轨道面内的卫星数目 $l = \frac{P}{T_s + T_f}$ 。

4 STK 仿真及结论

运用卫星仿真工具软件 Satellite Tool Kit(STK) 验证以上分析计算结果。STK 是当前航天工业领先的商品化分析软件,它提供了各种分析模块以及分析工具支持卫星设计任务。本文主要采用 STK 的覆盖模块以及相关的特性参数。轨道参数同上面算例,需要监测的地面目标位置纬度同轨道倾角。为了检验上述算例中结果的正确性,希望通过仿真验证以下问题。

(1) 对 40° 左右中倾角轨道,2 个轨道面与 3 个轨道面星座对相同目标位置的覆盖性能差异。

(2) 对于相同配置的星座, 20° 以下的小倾角和 40° 的中倾角轨道对相同目标位置的覆盖性能差异。

表 1 用于 STK 仿真的星座配置

Table 1 Satellite deployment for STK simulation

星座	轨道面数	每轨卫星数	倾角 / ($^\circ$)	高度 / km
1	2	3	40	500
2	2	3	15	500
3	3	3	40	500
4	3	5	40	500

(3) 对 3 颗卫星和 5 颗卫星组成的轨道面,其星间覆盖间隔时间的差异。

为此分别建立如表 1 所示 4 个星座。

图 6 是运用 STK 软件计算得到的仿真结果,表示在 24 小时内星座对地面目标位置的瞬时覆盖情况。图中较短的时间间隔表示的是星间覆盖间隔时间 T_{sg} ,较长的间隔是轨道面覆盖间隔时间 T_{nc1} 。表 2 是星座对地面目标的覆盖特性统计。

通过仿真得出以下结论:

- (1) 对于 20° 以下的小倾角轨道,2 个轨道面可以实现完全轨道面覆盖;
- (2) 对于 $20^\circ\text{--}50^\circ$ 倾角的轨道,需要 3 个轨道面实现完全轨道面覆盖;
- (3) 每轨 3 颗卫星可以提供 25 min 左右的星间覆盖间隔;
- (4) 每轨 5 颗卫星可以提供 17 min 左右的星间覆盖间隔。

上述结论同算例计算结果是一致的,仿真结果验证了本文的分析。

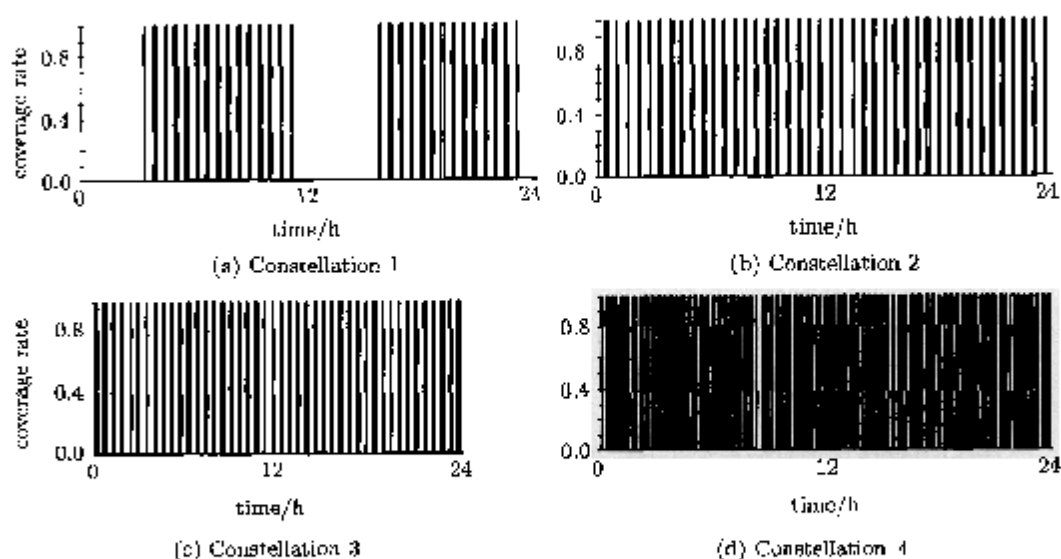


图6 卫星星座对目标位置瞬时覆盖图

Fig.6 Instant coverage of constellation for target location

表2 星座覆盖特性统计

Table 2 Character statistic of constellation coverage

星座	1	2	3	4
星间覆盖间隔时间 /min	25	25	25	12
轨道面覆盖间隔时间 /min	276	0	0	0
星座覆盖百分比 / (%)	13.7	19.6	20.7	34.4

5 结束语

本文研究了卫星星座需要对地面目标进行连续覆盖时的星座设计问题. 在地面目标纬度小于或等于轨道倾角这个前提下, 根据地面目标和星下点轨迹的球面几何关系推导了计算星间覆盖间隔时间和轨道面覆盖间隔时间的公式, 推导中由于一些近似假设给计算结果带了一些误差, 但是通过仿真计算表明文中的推论为需要对地面目标进行连续覆盖时的星座设计提供了理论指导.

参 考 文 献

- [1] Bai Hefeng, Ren Xuan. The optimal design method for rosette constellations. *J. Astron.*, 1999, **120**(4):77—82. in Chinese (白鹤峰, 任萱. 玫瑰星座的优化设计方法. 宇航学报, 1999, **120**(4):77—82)
- [2] Yan Ye *et al.* Satellite-net autonomous positioning with relative ranging. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(1):54—60. in Chinese (闫野等. 利用星间测距实现卫星网自主定位. 空间科学学报, 2000, **20**(1):54—60)
- [3] Xu Min *et al.* Research of launching window of satellite constellation. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(3):282—288. in Chinese (徐敏等. 星座的发射规划研究. 空间科学学报, 2000, **20**(3):282—288)
- [4] D Smilh. Operations innovations for the 48-satellite globalstar constellation. AIAA-96-1051-CP, 1996
- [5] Tandler J. Automating the operations of the orbcomm constellation. 10th Ann. AIAA/UTAH State Univ. Conf. Small Satellites, 1996
- [6] Hu Jianhao *et al.* Constellation design for a LEO mobile satellite communication system of China. *Acta Ele. Sinica*, 1996, **24**(7):12—16. in Chinese (胡剑浩等. 中国低轨移动卫星通信系统星座设计. 电子学报, 1996, **24**(7):12—16)
- [7] Zhang Renwei. Dynamics and control of orbit and attitude for satellite. Beijing: Beijing Univ. Aeron. Astron. Pub. Press, 1998. 13—15. in Chinese (章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998. 13—15)

CONSTELLATION DESIGN BASED ON THE ANALYZING CHARACTER OF CONTINUOUS COVERAGE

HU Jun¹ CHEN Bo² WANG Jianyu¹ ZHU Zhencai¹

¹(Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083)

²(Shanghai Institute Microsystem and Information Technology, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract

In this paper, design of constellation in need of continuous coverage for ground target is studied. The equations of two variables, gap time of satellite coverage and gap time of plane coverage, which having essential influence on the coverage capability are inferred. They are calculated in the case of constellations with various deployments. Finally, the inferences are validated using the engineer simulation software STK. This paper provides theoretical guidance for constellation design through theoretical analysis, calculated examples as well as engineering simulation.

Key words Constellation design, Coverage performance, Gap time of satellite coverage, Gap time of plane coverage