

BDS 卫星可用性评估

赵立都, 胡川, 冯晓

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074)

摘要: 为评估 BDS 卫星可用性, 基于可靠性原理, 分析 BDS 星座 MEO 空间备份策略的影响因素, 进一步根据 BDS 卫星发生故障的实际情况, 分析了 BDS 卫星故障对单星可用性的影响。结果表明: 在 BDS 的 MEO 备份卫星的轨道设计过程中, 备份卫星轨道高差约束必须综合考虑轨道倾角容许漂移量和卫星平均中断时间间隔两方面因素; 轨道机动对单星可用性的影响程度比单粒子翻转(恢复时间 12 h、24 h)影响程度小, 而且三种故障的综合影响比单方面因素的故障影响大。

关键词: BDS; 可用性; 空间备份; 轨道设计

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2017)04-0010-05

0 引言

我国的北斗卫星导航系统(BDS)采用的是混合异构星座, 包括地球静止轨道(GEO)、倾斜地球同步轨道(IGSO)和中圆轨道(MEO)。截止 2016 年 5 月底, BDS 星座由 14 颗卫星组成, 包括 4 颗 MEO 卫星、5 颗 IGSO 卫星和 5 颗 GEO 卫星组成。中国正在建设兼容多 GNSS 系统的国际 GNSS 监测评估系统(Igmas)^[1]。

卫星导航系统的可用性是指在系统服务区域内为用户提供可以满足使用要求的服务能力标识。可用性既与空间环境的物理特性和导航发射机技术设备能力有关, 也与导航系统星座空间备份策略、轨道保持、地面控制以及卫星发射替换方案等密切相关。在航空等涉及生命安全的特殊领域, 可用性是决定 GNSS 能否作为主用导航的关键性指标^[2]。

贾小林等人采用严密的数学公式推导了导航系统的四类可用性, 在顾及卫星损耗维修状态概率下, 计算了 GPS 卫星在我国地区可用时间概率^[3]。李作虎等人建立了导航系统可用性的评估模型及方法, 并采用 GPS 数据进行验证^[4]。项军华等人

基于卫星可靠度建立了星座系统可靠度模型, 分析了不同星座策略下的星座可用性^[5]。徐嘉、王晓双、李国重等学者分析了 GPS 卫星理想星座、卫星发生故障时的降阶星座对用户的服务可用性影响^[6-10]。2010 年, 连远锋等人提出了加权几何精度因子 $WDOP$ 的星座值可用性评估算法, 并对 BDS 设计星座进行全球区域仿真分析^[11]。2014 年, 张清华等人研究了 GNSS 监测评估现有理论与方法^[12]。2015 年, Suzuki 等人从卫星可见性和 DOP 角度运用谷歌地球分析了城市等受限地形下的 GNSS 可用性^[13]。

上述学者对可用性的评估已取得了丰富的成果, 但是大多数仅限于评估 GPS 可用性, 未基于北斗为亚太区域提供服务以来的实际情况评估 BDS 卫星可用性。鉴于此, 本文首先分析了 Walker 星座 MEO 的备份策略, 进一步基于我国 BDS 的实际情况, 分析 BDS 卫星三类故障(固有可靠性引起的寿命末期失效、轨道机动、单粒子翻转)对卫星可用性的影响。

1 BDS 卫星可用性评估原理

对于卫星可用性评估, 因为 Walker 构型具有

收稿日期: 2017-04-17

资助项目: 2016 年度重庆交通大学高层次人才科研启动项目(编号: 16JDKJC-A025); 重庆市教委科学技术研究项目(编号: KJ1705132); 重庆交通大学实验室开放基金资助

联系人: 赵立都 E-mail: compassgps@163.com

在全球覆盖和纬度覆盖上的优势,所以被 GNSS 普遍采用。特别需要说明的是,我国正在兴起的 BDS 采用混合异构星座,在传统 Walker 构型的基础上引入 GEO 和 IGSO 卫星轨道^[14-16]。因此,讨论 Walker 构型星座 MEO 备份策略,对于我国北斗建设、运营和管理中,星座备份具有非常重要的借鉴意义。

1.1 BDS 星座的 MEO 备份原理

在卫星实际在轨运行过程中,卫星不可避免地会出现故障,这都会影响系统服务性能。因此为确保导航系统满足用户的可用性、连续性等要求,必须具有备份卫星。在空间备份策略中,通常将备份卫星部署在比标称轨道稍低的服务轨道上,备份策略如图 1 所示。

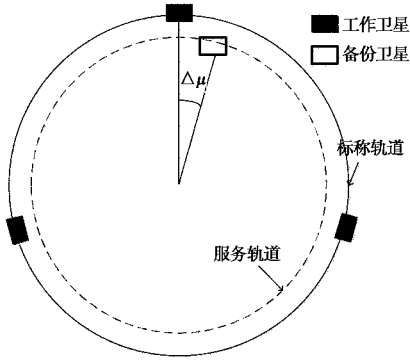


图 1 备份卫星部署策略^[16]

如图 1 所示,备份卫星可以采用轨道漂移的方法实现对故障卫星的快速替换。因为在卫星运行过程中,备份卫星所在轨道和正常工作卫星所在轨道的高度差使得备份卫星有一个相对缓慢漂移的过程,当备份卫星漂移到工作卫星附近时,如果工作卫星发生故障,备份卫星可替换故障卫星提供服务,使得系统的服务性能保持稳定。本文基于星座系统可靠度和备份卫星的可用性,分析了对备份卫星的轨道高度和轨道倾角要求。

当卫星的寿命服从指数分布时,假定卫星发生故障概率为常数 λ ,则卫星的可靠度为

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (1)$$

假设 Walker 星座中卫星总数 N ,导航星座轨道平面数 P ,相位因子 F 。每个轨道面卫星个数 $S = N/P$, S_r 表示星座结构冗余度, S_b 表示每个轨道面备份卫星数目。按照 Walker 星座特点,可以得到每个轨道面可靠度

$$R_j(t) = \sum_{i=0}^{S+S_b-1} C_{S+S_b-1}^i R(t)^i (1-R(t))^{S+S_b-1-i}. \quad (2)$$

在轨道面不存在故障卫星的情况下,轨道面可靠度表示为

$$R_j(t) = \sum_{i=1}^{S+S_b} C_{S+S_b}^i R(t)^i (1-R(t))^{S+S_b-i}. \quad (3)$$

进一步可计算出,卫星平均故障间隔时间 T_{BF} 为

$$T_{BF} = \int_0^\infty R_j(t) dt = \sum_{i=S-1}^{S+S_b} \frac{1}{i\lambda}. \quad (4)$$

由此可以求出导航系统可靠度为

$$R_c(t) = \prod_{j=1}^{S_r} R'_j(t) \prod_{j=S_r+1}^P R_j(t). \quad (5)$$

假定导航星座相位角容许漂移量为 Δu ,备份卫星轨道与工作卫星轨道之间的高差为 Δh ,备份卫星替换故障卫星的最大相位角为 $2\Delta u$,可进一步得出容许工作卫星暂时离开星座的平均中断间隔时间 T_{BF} 为

$$T_{BF} = \frac{2a^2}{3} \sqrt{\frac{a}{\mu}} \cdot \frac{2\Delta u}{\Delta h}, \quad (6)$$

式中: a 为导航星座轨道标称长半轴; μ 为地球万有引力常数。在确定相位角容许漂移量 Δu 后,可通过选择合适的轨道高差来满足 MTBF 的要求。

根据导航星座轨道标称长半轴 a 、相位角容许漂移量 Δu 、卫星平均中断间隔时间 T_{BF} 等因素,能够确定备份卫星轨道与正常工作卫星轨道之间的轨道高差为

$$\Delta h_1 = \frac{4a^2}{3} \sqrt{\frac{a}{\mu}} \cdot \frac{\Delta u}{T_{BF}}. \quad (7)$$

因为备份卫星与正常工作卫星之间存在一定高度差和轨道倾角偏差,所引起的升交点赤经相对变化率为

$$\Delta\Omega = -\frac{7\Omega}{2a} \Delta h - \Omega \tan i \Delta i, \quad (8)$$

式中: Ω 表示升交点赤经; i 表示轨道倾角。由式(8)可知,消除轨道高差对升交点赤经变化率的影响可通过偏置轨道倾角的方法。

根据星座倾角容许漂移量 Δi ,可以得到备份卫星轨道与星座设计轨道之间轨道高差最大值为

$$\Delta h_{\max} = \frac{2a \sin i}{7 \cos i} \Delta i. \quad (9)$$

所以,备份卫星轨道与工作卫星标称轨道之间的轨道高度差为

$$\Delta h = \min(\Delta h_1, \Delta h_{\max}), \quad (10)$$

在轨道高度差达到最大值情况下的容许时间间隔就是卫星的平均中断间隔时间的最小值,即

$$T_{BFmin} = \frac{14a\cos i}{3\sin i} \sqrt{\frac{a}{\mu}} \cdot \frac{\Delta u}{\Delta i}. \quad (11)$$

1.2 BDS 卫星可用性评估原理

根据 2008 年,美国国防部关于单星可用性的解释:单星可用性是指占据轨位的健康卫星发射的能被接收机接收到的信号所占时间的百分比^[17]。卫星可用性与卫星本身特征(固有可靠性)、卫星在轨维护(单粒子翻转、轨道机动)等因素有关。

假设某区域导航定位星座由 $n(n \geq 4)$ 颗卫星组成,每颗卫星在每个时刻至多发生一类故障,并假设第 i 颗卫星的三类故障(固有可靠性引起的寿命末期失效、轨道机动和单粒子翻转)的平均故障间隔时间(平均故障率的倒数)和平均故障修复时间(平均故障修复率的倒数)分别为 $MTBF_{ij}$ 、 $MTTR_{ij}$, $j = 1, 2, 3$, 易得第 i 颗卫星平均可用性为

$$P_i = 1 - \sum_{j=1}^3 \frac{MTTR_{ij}}{MTBF_{ij} + MTTR_{ij}}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

2 BDS 卫星可用性评估算例分析

2.1 BDS 星座 MEO 备份分析

为了分析 Walker 星座 MEO 备份卫星轨道高差设计时的影响因素,本文采取了两种方案。

方案一:假定 MEO 卫星的轨道长半轴为 2 15 00 km,倾角为 55° ,当 Δi 分别取 $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$ 时,分析了相位角容许漂移量 Δu 对平均中断时间间隔 $MTBF$ 最小值的影响,如图 2 所示。从图 2 可以看出,随着倾角容许漂移量的增大,相位角容许漂移量对平均中断间隔时间的影响变化量越小。

方案二:限制倾角容许漂移量为 1° ,卫星中断时间间隔 T_{BF} 最大值为 5 天,当相位角容许漂移量 Δu 分别取 $2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ$ 时,分析平均中断时间间隔对轨道高差的影响如图 3 所示。从图 3 可以看出,因为限制倾角容许漂移量,所以轨道高差存在最大值,平均中断时间间隔存在最小值。

综上所述, Walker 星座中 MEO 备份卫星的轨道高差设计时,必须综合考虑倾角容许漂移量与平均中断时间间隔两种因素,这对于 BDS 组网完善

以后, MEO 卫星轨道备份具有重要的借鉴意义。

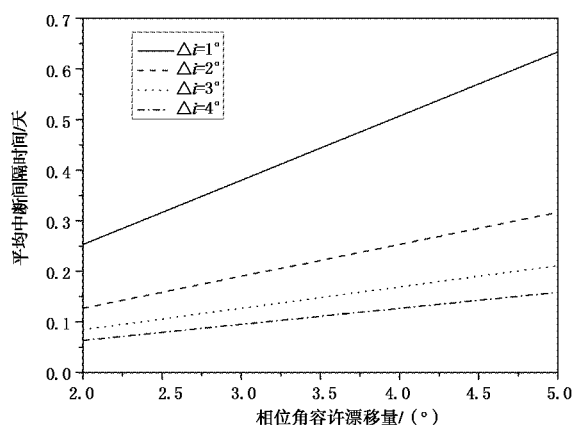


图 2 相位角容许漂移量对平均中断间隔时间的影响

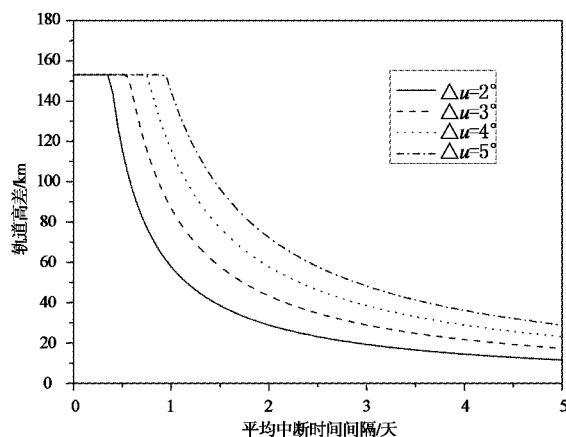


图 3 平均中断时间间隔对轨道高差的影响

2.2 BDS 卫星可用性评估分析

由于北斗是区域混合异构导航星座,考虑到 GEO、IGSO、MEO 空间所处物理环境和设计制作工艺与 GPS 是不同的,所以在分析单星可用性时,需要按照北斗卫星的实际情况,不能完全按照 GPS 单星可用性的分析方法。本章假设可用性输入参数如表 1 所示。

根据表 1 的单星可用性输入参数,参照公式 (12) 计算在 BDS 常见的三种卫星故障以及故障组合对 BDS 单星可用性的影响,如表 2 所示。

表 1 单星的轨道机动、单粒子翻转及固有可靠性输入参数

卫星故障类型	卫星类型	平均故障间隔时间	平均故障修复时间
轨道机动	GEO-5	1 次/30 d	每次持续(恢复)6 h
	GEO-2	1 次/50 d	每次持续(恢复)6 h
	GEO-3	1 次/30 d	每次持续(恢复)6 h
	GEO-1	1 次/30 d	每次持续(恢复)6 h
	GEO-4	1 次/50 d	每次持续(恢复)6 h
	IGSO	1 次/100 d	每次持续(恢复)8 h
单粒子 翻转	MEO	1 次/200 d	每次持续(恢复)8 h
	GEO/IGSO	1 次/1 月	每次持续(恢复) 12 h、24 h 等
	MEO	1 次/2 月	
固有可靠性	GEO/IGSO/MEO	12 年	4 个月

表 2 轨道机动、单粒子翻转和固有可靠性影响下的单星可用性/%

卫星正常		GEO-4	GEO-1	GEO-3	GEO-2	GEO-5	IGSO	MEO
		100	100	100	100	100	100	100
固有可靠性	4 个月恢复	97.33	97.33	97.33	97.33	97.33	97.33	97.33
固有可靠性 +轨道机动	6~8 h	96.83	96.50	96.50	96.83	96.50	97.00	97.16
固有可靠性	12 h	95.69	95.69	95.69	95.69	95.69	95.69	96.50
+单粒子翻转	24 h	94.10	94.10	94.10	94.10	94.10	94.10	95.69
固有可靠性	12 h	95.34	94.05	94.05	95.34	94.05	94.70	96.25
+单粒子翻转	12 h	95.34	94.05	94.05	95.34	94.05	94.70	96.25
+轨道机动	24 h	92.14	90.88	90.88	92.14	90.88	93.11	95.19

注:一年按 365 d 6 h 9 min 计算,即一年有 365.256 3 d;一个月按 30 d 计算。

从表 2 可以得出:

1) 固有可靠性的影响,使得所有卫星可用性均下降 2.67%($1-97.33\%=2.67\%$)。

2) 北斗卫星轨道机动使得单星可用性在固有可靠性的基础上进一步下降,因为北斗不同类型卫星所处空间环境不同,轨道机动频率不同、持续时间不同,所以导致的可用性下降程度不同。

3) 对于同一类型的北斗卫星,单粒子翻转故障持续时间越长,单星的可用性越小。

4) 轨道机动对单星可用性的影响程度比单粒子翻转(恢复时间 12 h、24 h)影响程度小,而且三种故障的综合影响比单方面因素的故障影响大。

3 结束语

1) 在 BDS 的 MEO 备份卫星的轨道设计过程中,备份卫星轨道高差约束必须综合考虑轨道倾角容许漂移量和卫星平均中断时间间隔两方面因素。

2) 基于可靠性分析 BDS 的 3 类卫星故障对单星可用性的分析表明,固有可靠性使所有卫星均下降 2.67%;北斗卫星轨道机动使得单星可用性

在固有可靠性的基础上进一步下降;对于同一类型的北斗卫星,单粒子翻转故障持续时间越长,单星的可用性越小;三种故障的综合影响比单方面因素的故障影响大。

但是鉴于我国 BDS 是第一个混合异构星座,GEO 和 IGSO 备份策略处于理论与技术研究空白。而基于 Walker 星座的 MEO 卫星是全球构网,已有的评估指标不适用于 GEO 和 IGSO 卫星,下一步研究针对 GEO、IGSO 卫星备份策略所选用的评价指标。

参考文献

- [1] 焦文海,丁群,李建文,等. GNSS 开放服务的监测评估[J]. 中国科学:物理学、力学、天文学,2011,41(5): 521-527.
- [2] Department U S. of Defense, Global Positioning System standard Positioning Service Performance Standard. GPS & Its Augmentation Systems [R]. 2008,35 (2):197-216.
- [3] 贾小林. 导航卫星系统的可用性及算法[C]// 全国飞

- 机与船舶通信导航学术研讨会, 2000:16-21.
- [4] 李作虎. 卫星导航系统性能监测及评估方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012:41-46.
- [5] 项军华, 张育林. 基于卫星可靠度和 MTTR 星座空间备份策略设计[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9):1576-1580.
- [6] 徐嘉. 故障星分布对星座 PDOP 可用性影响的建模及评价[J]. 航空学报, 2008, 29(5):1139-1143.
- [7] 徐嘉, 韩潮. 一种改进的卫星星座服务可用性评价方法[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(5):44-49.
- [8] 王晓双, 苏年乐, 侯洪涛, 等. 卫星导航系统服务可用性分析仿真系统的设计与实现[J]. 航天器工程, 2009, 18(3):14-20.
- [9] 李国重, 李建文, 焦文海, 等. 顾及卫星故障修复的导航星座 PDOP 可用性分析方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010(7):841-845.
- [10] 李国重, 李军正, 李建文, 等. 基于卫星服务中断的 GPS 在中国服务区可用性分析[J]. 测绘科学技术学报, 2011, 28(1):1-4.
- [11] 连远锋, 赵剡, 吴发林. 北斗二代卫星导航系统全球可用性分析[J]. 电子测量技术, 2010, 33(2):15-18.
- [12] 张清华. GNSS 监测评估与理论方法研究[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2014:56-62.
- [13] SUZUKI T, KUBO N. Simulation of GNSS satellite availability in urban environments using Google earth [C] // Proceedings of the ION 2015 Pacific PNT Meeting, Honolulu, Hawaii, 2015:1069-1079.
- [14] 薛树强, 杨元喜. 最小 GDOP 组合 Walker 星座构型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(3):380-387.
- [15] 杨霞, 李建成. Walker 星座星间链路分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2):143-147.
- [16] 项军华. 卫星星座构形控制与设计研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007:53-58.

作者简介

赵立都 (1991—), 男, 硕士, 助理实验师, 主要从事 BDS 可用性研究。

胡川 (1983—), 男, 博士, 讲师, 主要从事测量数据处理新理论、新方法及在测绘科学中的应用研究。

冯晓 (1960—), 男, 博士, 教授, 主要从事工程测量、地理信息系统、道路规划、地质灾害防治等领域的理论与方法研究。

Availability Assessment of BDS Satellite

ZHAO Lidu, HU Chuan, FENG Xiao

(College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to evaluate the availability of BDS satellites and analyze the influence factors of BDS constellation MEO space backup strategy based on the reliability principle, the influence of BDS satellite fault on the availability of single satellite is analyzed based on the actual situation of BDS satellite. The results show that in the orbit design of BDS MEO backup satellites, the height difference constraint of the backup satellite orbit must consider both the orbital inclination allowable drift and the satellite mean interruption time interval. The effect of orbital maneuver on the availability of single star is smaller than that of single particle inversion (recovery time 12h, 24h), and the combined effect of the three faults is greater than that of unilateral factor.

Keywords: BDS; availability; space backup; orbit design