



研究与开发

基于 STK 轨道预报数据的北斗卫星 导航系统频谱监测选址分析

张琪, 林辉

(国家无线电监测中心深圳监测站, 广东 深圳 518120)

摘要: 北斗卫星导航系统作为我国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统, 目前已能够在亚太区域提供定位、导航和授时服务, 并计划于 2020 年在全球范围内提供服务。随着目前卫星通信技术的飞速发展, 卫星频率和轨位愈发拥挤, 对北斗系统进行频谱保护性监测显得尤为重要。基于 STK 的轨道预报数据, 收集了目前北斗卫星导航系统 14 颗非静止轨道卫星连续 10 日内对于我国 9 个城市的可视时间段数据, 利用 R 语言对不同卫星及不同地点的监测可视时间进行了分组统计分析, 并对不同监测地点进行了相似度分析。最后根据数据分析结果给出了初步选址建议。

关键词: 北斗卫星导航系统; STK 轨道预报; 监测选址

中图分类号: TN98

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018024

Site selection analysis of radio monitoring stations to BDS based on STK orbital prediction data

ZHANG Qi, LIN Hui

Shenzhen Station of State Radio Monitoring Center, Shenzhen 518120, China

Abstract: BeiDou navigation satellite system (BDS) is a global navigation satellite system constructed and operated by China. At present, BDS is able to provide location, navigation and time service in Asia-Pacific, and will provide global service in 2020 as planned. As the fact of the rapid development of satellite communication technology, the spectrum and orbits of satellite are increasingly crowded. Therefore, it is vital to perform spectrum monitoring to BDS. Based on the STK orbital prediction data, the access time of the 14 non-GEO satellites in BDS to 9 Chinese cities in 10 days was collected. Group analysis according to different satellites and different cities, and similarity analysis within different cities were performed using the R programming language. At last, preliminary advices on site selection were provided according to the data analysis results.

Key words: BeiDou navigation satellite system, STK orbital prediction, monitoring station site selection

1 引言

北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 是我国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统, 能够为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务, 是我国重要的空间基础设施。

目前, 我国北斗二代卫星导航定位系统已能够在亚太区域范围内为用户提供定位、导航和授时服务, 按照计划, 到 2020 年系统星座将包含 27 颗中圆地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 卫星 (轨道高度 21 528 km, 轨道倾角 55°)、5 颗地球静止轨道 (geosynchronous orbit, GEO) 卫星 (轨道高度 35 786 km) 和 3 颗倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous satellite orbit, IGSO) 卫星 (轨道高度 35 786 km, 轨道倾角 55°)^[1], 能够在全球范围内提供服务, 届时将与 GPS (global positioning system, 全球定位系统)、GLONASS、Galileo 共同形成全球四大卫星导航定位系统。可以预见, 随着未来北斗卫星导航系统功能日益强大、用户数量日益增加, 系统间包括来自地面无线电系统可能造成的频率干扰可能性也大幅提高。因此, 对北斗卫星导航系统卫星进行有效的保护性频谱监测显得尤为重要。

国家无线电监测中心作为我国无线电管理技术机构, 承担无线电监测和无线电频谱管理工作, 目前在全国设有 9 个国家级监测站^[2] (北京、成都、哈尔滨、昆明、上海、深圳、乌鲁木齐、武夷山和西安)。本文对目前主流的几个卫星导航定位系统的地面监测站分布情况进行简单介绍, 利用 STK 软件的轨道预测功能及 R 语言的数据分析功能, 对可获得公开星历的 20 颗北斗导航卫星在连续 10 天内对于 9 个不同城市的监测可行性进行分析, 根据分析结果得出初步选址建议, 为完善北斗导航卫星系统监测设施提供参考。

2 主流卫星导航系统地面监测站分布情况

地面监测站作为卫星导航定位系统地面控制段的一个重要组成部分, 一方面负责监控整个系统的运行状况, 另一方面辅助主站完成系统功能^[3]。值得注意的是, 卫星导航定位系统的地面监测站需要通过无线电信号与地面主站进行通信, 部分地面监测站还会向导航卫星发送上行信号, 从而辅助卫星轨道和时钟估计并提供导航信号^[4,5]。因此在选址上比本文所要研究的频谱监测功能需要考虑的因素更为复杂。

2.1 卫星导航系统自有的地面监测站

2.1.1 GPS 的地面监测站

GPS 作为目前最成熟、使用范围最广的卫星导航系统, 在全球范围内布设了 16 个监测站^[6], 遍布七大洲, 从而使得任何一颗卫星在任何时刻都至少有 3 个地面监测站能够与其进行通信。

2.1.2 GLONASS 的地面监测站

GLONASS 系统是俄罗斯打造的全球卫星导航定位系统, 其研发早在苏联时期 (20 世纪 80—90 年代) 就开始了, 直到 1995 年完成卫星发射形成既定星座, 2007 年开始为俄罗斯境内提供导航定位服务^[6]。目前, GLONASS 卫星导航定位系统已经能够在全球范围内提供导航定位服务, 其手机用户量仅次于 GPS。

GLONASS 目前有 4 个地面监测站, 还有 6 个即将启用, 分布在俄罗斯境内。

2.1.3 Galileo 的地面监测站

Galileo 卫星导航系统是欧洲宇航局和欧洲全球卫星导航局研发的全球卫星导航定位系统, 于 2016 年 12 月 15 日开始提供早期的定位导航服务 (early operational capability)^[6]。

Galileo 系统目前没有单独的地面监测站, 其功能由 1 个位于德国的地面控制中心和 4 个分别位于瑞典 (2 个)、法国和南美的测控站共同完成^[7,8]。



2.2 IGS 的地面监测站

IGS (International GNSS Service) 是一个能够为导航定位系统提供实时监测服务、测量卫星轨道和时间地理信息, 从而辅助定位系统正常工作的全球性质公益组织^[9]。目前, IGS 包括分布在全球范围内的 500 多个地面监测站及若干个数据中心。由于具有数量庞大、遍布全球的地面监测站, IGS 能够补充全球导航定位系统地面段的不足, 对所有导航卫星进行实时监测, 并在任何时间提供任意地点准确的时间地理信息数据, 从而辅助卫星导航定位系统更好地工作。

其中, 全部地面监测站都能够对 GPS 进行实时监测, 362 个地面监测站能够对 GLONASS 系统进行实时监测, 219 个能对 Galileo 系统进行实时监测, 169 个能对北斗导航系统进行实时监测。

3 北斗卫星的监测可行性分析

按照北斗官方网站公布的卫星发射记录, 截至 2016 年年底, 我国共发射北斗卫星 23 颗, 包括 GEO 卫星 7 颗、IGSO 卫星 8 颗、MEO 卫星 8 颗。其中, 1 颗 GEO 卫星 BeiDou G2 和 2 颗 MEO 卫星 BDS-M1、BDS-M5 目前已停止服务, 因此该系统现共有 6 颗 GEO 卫星 (分别为 BeiDou G1、BeiDou G3、BeiDou G4、BeiDou G5、BeiDou G6、BeiDou G7)、8 颗 IGSO 卫星 (分别为 BeiDou IGSO 1、BeiDou IGSO 2、BeiDou IGSO 3、BeiDou IGSO 4、BeiDou IGSO 5、BeiDou IGSO 6、BeiDou I1-S、BeiDou I2-S)、6 颗 MEO 卫星 (分别为 BeiDou M3、BeiDou M4、BeiDou M6、BeiDou-3_M1、BeiDou-3_M2、BeiDou M3-S)。

3.1 不同轨道卫星的监测可行性分析

3.1.1 GEO 卫星监测可行性分析

根据星历信息, 利用 Orbitron 软件对 6 颗 GEO 卫星轨道位置进行计算, 得到 G1、G3、G4、G5、G6、G7 分别位于 140°E、110.4°E、160°E、58.7°E、84°E、144°E。6 颗卫星均位于上述 9 个候选城市

站点可视弧范围内, 由于 GEO 卫星相对地球静止, 全天可见, 在选址分析时可不考虑。

3.1.2 IGSO 与 MEO 卫星监测可行性分析

北斗卫星导航系统的 IGSO 和 MEO 卫星轨道高度分别为 35 786 km、21 528 km。根据开普勒定理, 圆形轨道卫星高度 h 与运行周期 T_s 具有以下关系^[10]:

$$T_s = \frac{2\pi(h+R)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{k}} \quad (1)$$

其中, R 为地球半径, k 为开普勒常数。

参考式 (1), 计算得到北斗卫星导航系统 IGSO、MEO 卫星运行周期分别近似为 23.94 h 和 12.90 h, 与 STK 轨道预测数据近似。

本文利用 STK 软件的轨道预测功能^[11,12], 对 2017 年 5 月 24 日—6 月 2 日连续 10 天 IGSO 和 MEO 卫星的可监测时段进行了预测计算。以 2017 年 5 月 24 日为例, 北京的可监测时段和全天累计可监测时间如图 1、图 2 所示。

利用 R 语言对 9 个候选城市 10 天的数据进行分组统计分析, IGSO 和 MEO 全天可视时间平均值分别为 20.54 h 和 8.57 h, 最大值分别为 24 h 和 12.93 h, 最小值分别为 16.75 h 和 5.00 h, 监测可视时间箱线图如图 3 (a) 所示 (箱线图是对数据分布情况的一种描述方式, 图 3 中每个箱体对应 5 个值: 箱体上方的直线对应最大值、箱体上、下边分别对应 3/4 位数和 1/4 位数、箱体中间的直线对应中位数、箱体下方的直线对应最小值, 故箱线图能够很好地反映数据的总体分布情况)。

以北京时间 8:00—18:00 为工作时间为例, 考虑两类卫星在常规工作时段内可监测时间的差异, 9 个候选城市在 10 天内, IGSO 和 MEO 在常规工作时间内监测可视时间平均值分别为 9.80 h 和 3.36 h, 最大值分别为 10 h 和 9.11 h, 最小值均为 0 h (其中 8 颗 IGSO 卫星在 10 天、9 个城市共 720 个时间数据, 仅有两个 0 值, 故系统认为是离群点, 在图 3 (b) 中以空心点表示)。

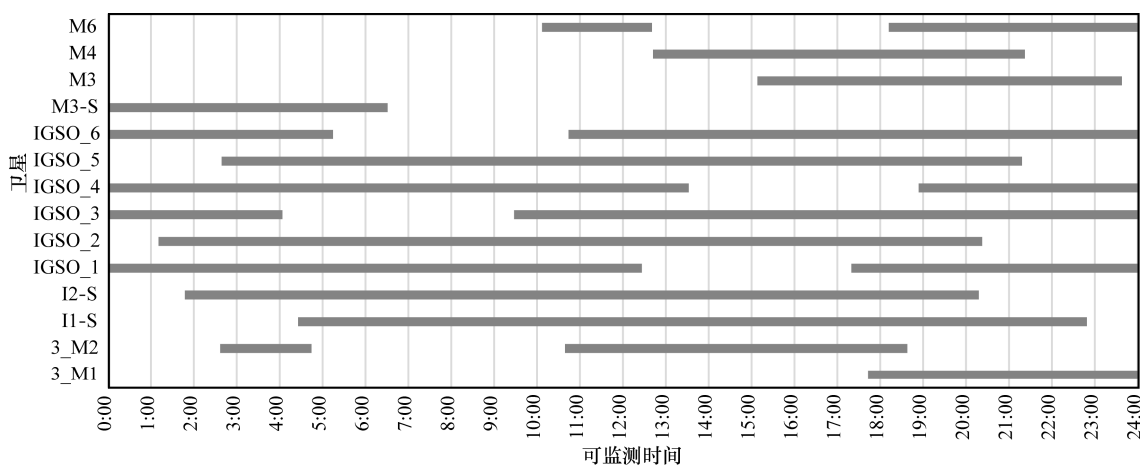


图1 北京非静止轨道卫星监测可视时间段

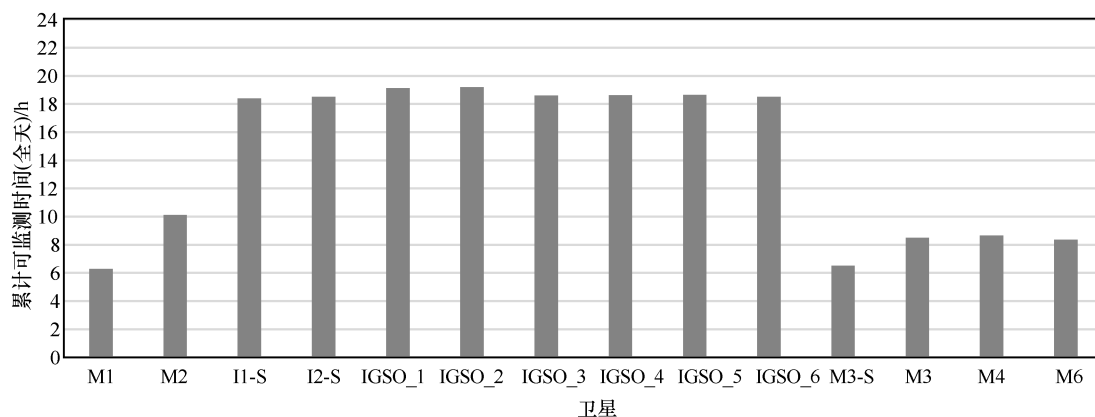


图2 北京非静止轨道卫星监测可视时间

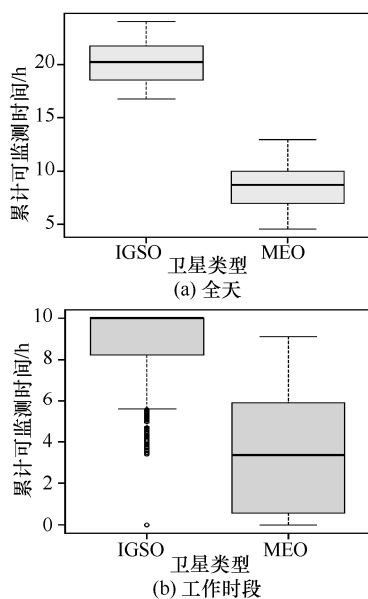


图3 北斗导航系统 IGSO 和 MEO 监测可视时间统计

由此可见, MEO 卫星监测可视时间较 IGSO 卫星无论是全天还是常规工作时间内都有较大的差距,因此在监测站点选址上要重点考虑 MEO 卫星可视时间长短并根据不同地点的差异(见下文分析)进行合理布局。

3.2 不同卫星的监测可行性分析

利用 R 语言对 9 个候选城市 10 天的监测数据进行分组统计分析,全天及常规工作时间内 14 颗非静止轨道卫星的监测可视时间箱线图分别如图 4、图 5 所示。

由统计结果可知,不同类型卫星的监测可视时间有明显差别,IGSO 可视时间远大于 MEO,但同类型不同卫星之间差距不大。其中, I1-S、I2-S、IGSO_2、IGSO_5 全部工作时间内可见,在

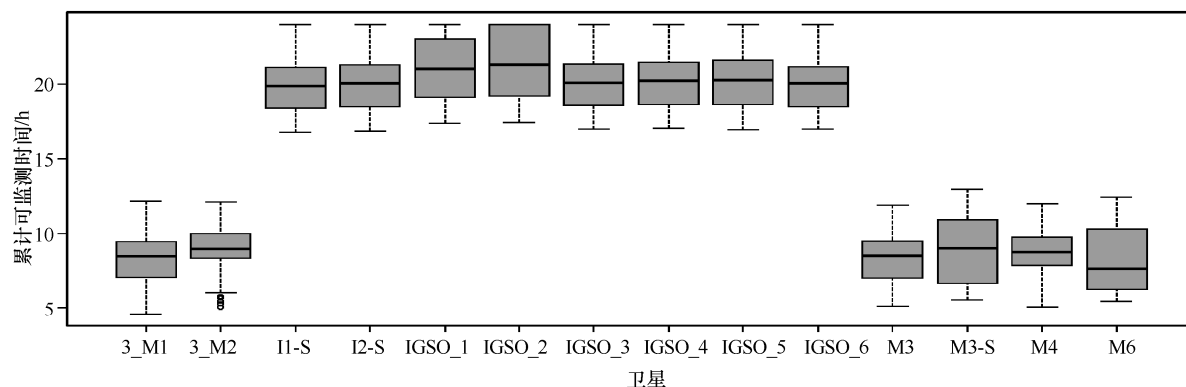


图4 14颗非静止轨道卫星全天监测可视时间箱线图

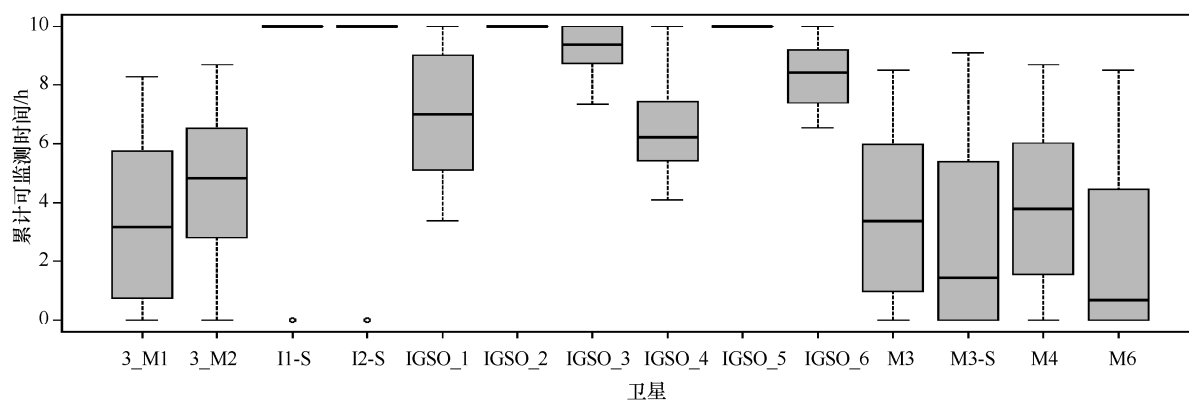


图5 14颗非静止轨道卫星工作时间监测可视时间箱线图

选址分析时可不考虑；M3-S和M6在常规工作时间内可视时间较短，需重点关注。

4 9个候选城市监测可行性分析

4.1 监测可视时间分析

4.1.1 总体分析

利用R语言对不同城市10天的监测数据进行分组统计分析，全天及常规工作时间内9个城市的监测可视时间箱线图分别如图6、图7所示。

图6、图7中，纵轴的取值范围（也即箱线图纵向取值范围）显示的是在给定城市条件下14颗非静止轨道卫星在10天内的监测可视时间的变化（即这140个监测可视时间数据的变化范围），可以看出无论是全天还是工作时间内，可视时间变化很大。对 median 进行比较，可视时间较长的是昆明、深圳和武夷山，较短的是哈尔滨和乌鲁木齐。另外，北京和西安虽然全天可视时间较长，但在常规工作时间内可视时间较短。可以发现，

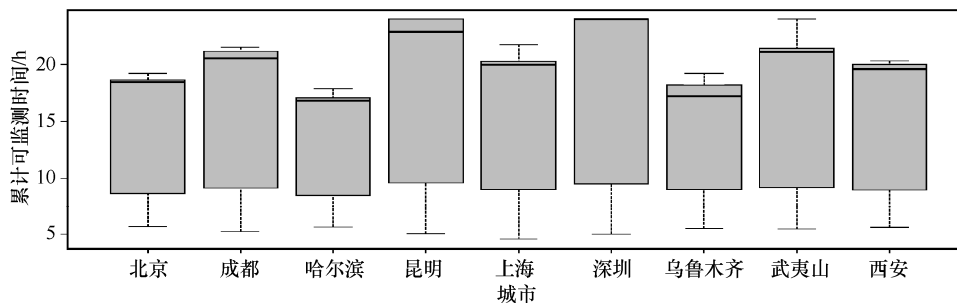


图6 9个候选城市全天监测可视时间箱线图

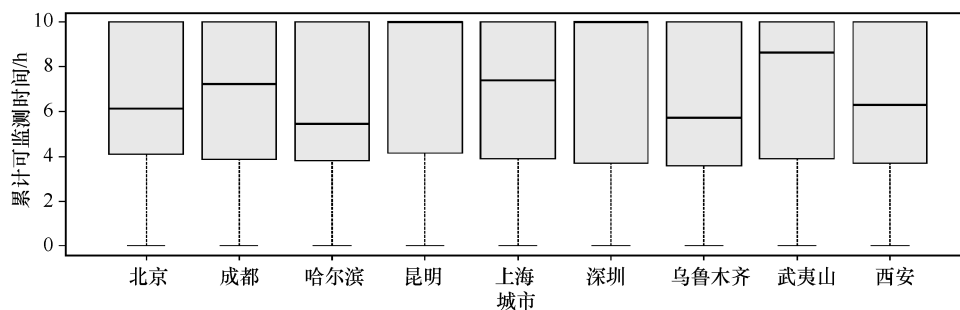


图7 9个候选城市工作时间监测可视时间箱线图

可视时间的长短与监测站点的纬度有较大关系，
纬度越低可视时间越长。

4.1.2 不同城市对不同类型卫星监测可行性分析

利用 R 语言对城市及卫星类型做分组统计，

全天及工作时间内城市与卫星类型统计箱线图分别如图 8、图 9 所示。

由统计结果可以看出，IGSO 卫星的监测可视时间与监测地点有较大关系，深圳、昆明、武夷

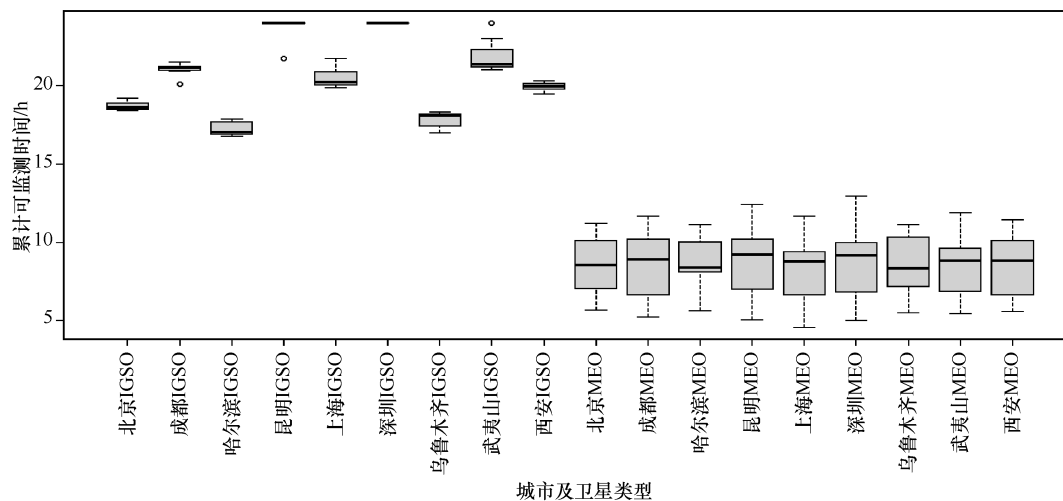


图8 全天时间内不同城市与卫星类型分组可视时间统计

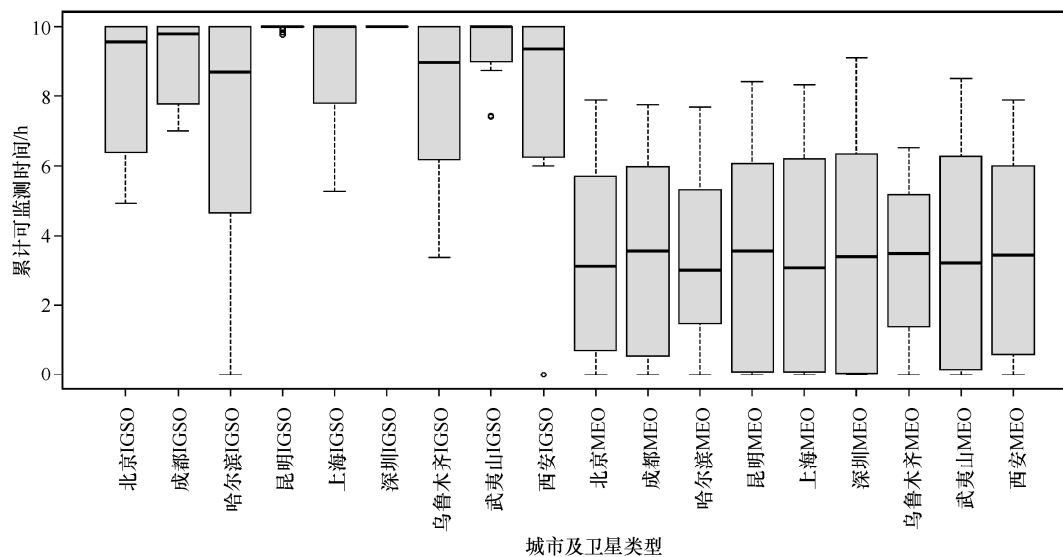


图9 工作时间内不同城市与卫星类型分组可视时间统计



山这 3 个纬度较低的站点可视时间最长。而 MEO 卫星监测可视时间中位数随站点变化不大,但随日期和卫星变化较大。

4.2 不同候选城市相似度分析

将卫星的可视时间数据(单日内最多有 3 段可视时间,因此可处理为 3 对起始时间)视为一个数组,利用 R 语言对 10 天内不同城市的可视时间数据做相关分析,相关组图如图 10 所示。

图 10 中斜向上条纹表示正相关(由于至少一半卫星在全天仅有 1 个可视时段,其余数据默认为 0 处理,因此各城市间相关性全为正相关,且相关数值普遍较高),且颜色越深相关性越大。但每天的统计数据仍然会有变化,可以看出,北京和西安、北京和哈尔滨、西安和乌鲁木齐这 3 对站点相似度很高,西安和成都、深圳和昆明相似度也较高。10 天内各城市相关性系数均值见表 1,均值数据也支持了上述结论。

5 结束语

本文利用 STK 软件的轨道预测数据及 R 语言的数据分析功能,收集了目前北斗卫星导航系统 14 颗非静止轨道卫星连续 10 日内对于 9 个候选城市(北京、成都、哈尔滨、昆明、上海、深圳、乌鲁木齐、武夷山和西安)的可视时间段数据,针对不同轨道卫星、不同卫星、不同城市、不同城市+不同卫星类型进行了分

组统计分析,并对不同候选城市进行了相似度分析。

分析结果表明,6 颗 GSO 卫星均位于 9 个候选城市可视弧范围内,选址时可不作特殊考虑;对于 8 颗 IGSO 卫星,9 个候选城市在全天和工作时间内可视时间平均值分别可达到 20.54 h 和 9.80 h,其中,深圳、昆明、武夷山这 3 个城市在常规工作时段内可视时间中位数可达到 10 h,即几乎全部工作时间都可观测到;对于 6 颗 MEO 卫星,9 个城市在全天和工作时间内可视时间平均值分别为 8.57 h 和 3.36 h,并且随时间和卫星不同有较大变化,但整体来看,9 个城市间差异不明显,需要不同地点配合进行监测。此外,城市间相似度分析表示,北京和西安、北京和哈尔滨、西安和乌鲁木齐这 3 对相似度很高,西安和成都、深圳和昆明相似度也较高。

综合上述分析结论,选址建议为深圳、武夷山、北京、上海、乌鲁木齐。

参考文献:

- [1] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号(2.1 版)[S]. 2016.
China Satellite Navigation System Management Office. BeiDou satellite navigation system space signal interface control file open service signal (version 2.1)[S]. 2016.
- [2] 周鸿顺,刘武兵,王爱举,等. 国家空间卫星监测系统[J]. 电信科学, 2015, 31(12): 8-9.
ZHOU H S, LIU W B, WANG A J, et al. National space satellite monitoring system[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(12): 8-9.

表 1 不同候选城市相关性系数 10 日均值

站点	北京	成都	哈尔滨	昆明	上海	深圳	乌鲁木齐	武夷山	西安
北京	1.000	0.814	0.875	0.628	0.811	0.548	0.844	0.834	0.941
成都	0.814	1.000	0.712	0.605	0.762	0.509	0.789	0.743	0.866
哈尔滨	0.875	0.712	1.000	0.541	0.707	0.446	0.802	0.731	0.826
昆明	0.628	0.605	0.541	1.000	0.563	0.822	0.556	0.599	0.644
上海	0.811	0.762	0.707	0.563	1.000	0.596	0.692	0.845	0.788
深圳	0.548	0.509	0.446	0.822	0.596	1.000	0.457	0.623	0.568
乌鲁木齐	0.844	0.789	0.802	0.556	0.692	0.457	1.000	0.728	0.898
武夷山	0.834	0.743	0.731	0.599	0.845	0.623	0.728	1.000	0.824
西安	0.941	0.866	0.826	0.644	0.788	0.568	0.898	0.824	1.000

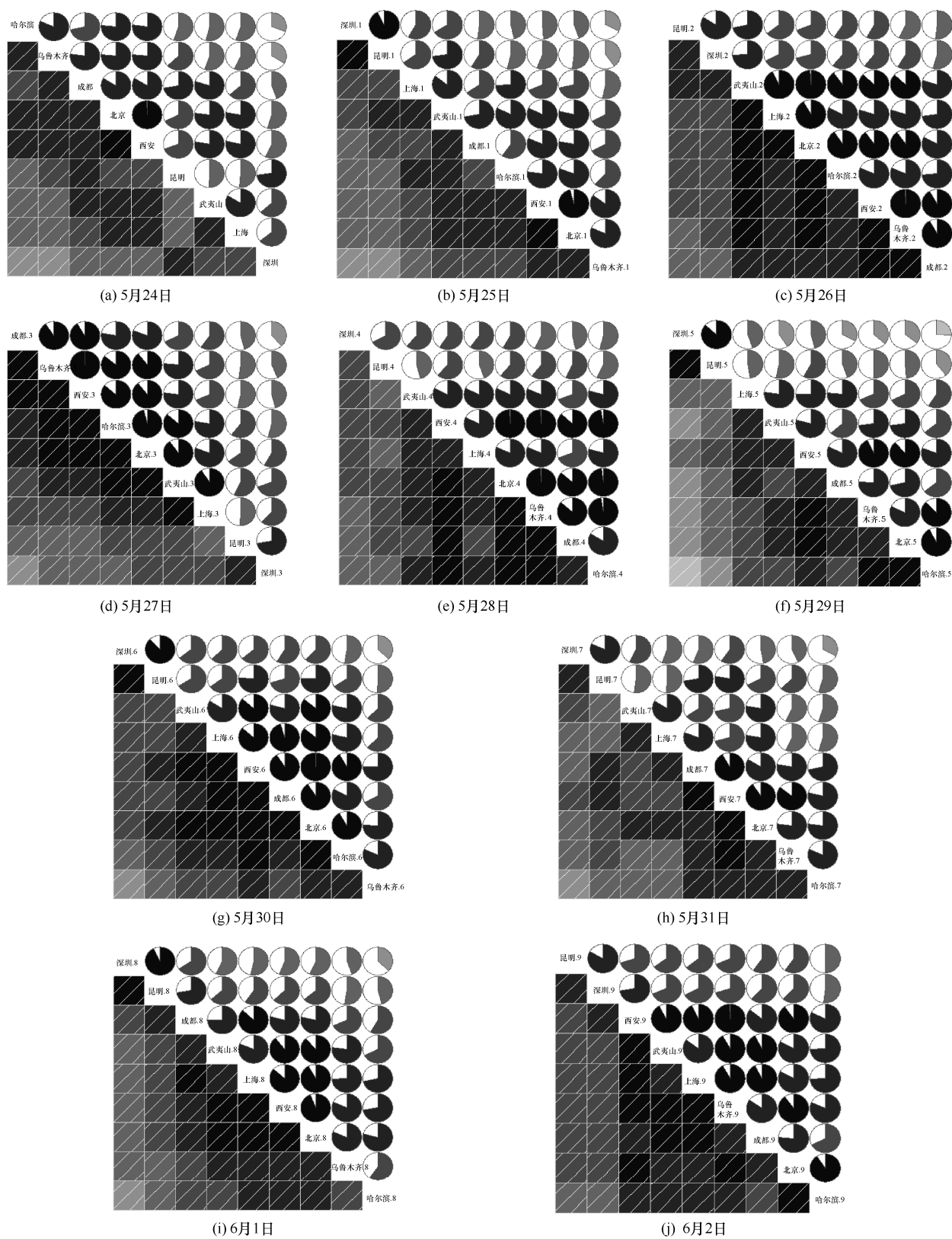
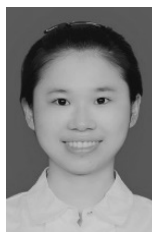


图 10 9 个候选城市相关组图 (2017 年 5 月 24 日-6 月 2 日)



- [3] 李作虎, 郝金明, 李建文, 等. 卫星导航系统监测站覆盖性能分析及布设方法初步研究[EB]. 2010.
LI Z H, HAO J M, LI J W, et al. Satellite navigation system monitoring station coverage performance analysis and layout method[EB]. 2010.
- [4] 陈茜, 马煦, 李春霞. 一种 GNSS 监测站选址模糊综合评价方法[J]. 电讯技术, 2015(3): 305-307.
CHEN Q, MA X, LI C X. A fuzzy synthetic evaluation method for address choosing of GNSS monitoring station[J]. Telecommunication Engineering, 2015(3): 305-307.
- [5] 宫磊, 马煦, 冯晓超, 等. 卫星导航系统监测站选址因素分析[J]. 数字通信世界, 2014(12): 10-13.
GONG L, MA X, FENG X C, et al. Specification for the address-choosing and construction of GNSS monitoring station[J]. Digital Communication World, 2014(12): 10-13.
- [6] International Committee on Global Navigation Satellite Systems. Current and planned global and regional navigation satellite systems and satellite-based augmentations systems[R]. 2010.
- [7] Commission Implementing Decision. Official Journal of the European Union[R]. 2012.
- [8] European Space Agency. Galileo: the future becomes reality[R]. 2017.
- [9] International GNSS Service. Terms of reference[R]. 2017.
- [10] 付锋. 局域卫星导航系统的星座设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
FU F. Constellation design of local satellite navigation system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- [11] 代明鑫, 张文明, 王雪松. 基于 STK 的 SAR 卫星轨道预报设计与仿真[J]. 现代防御技术, 2008(1): 5-9.
DAI M X, ZHANG W M, WANG X S. Design and simulation of SAR satellite orbit prediction based on STK[J]. Modern Defence Technology, 2008(1): 5-9.
- [12] 杜玉萍, 陆君. STK 在航天器轨道预报仿真系统中的应用[J]. 光电技术应用, 2015, 30(4): 62-65.
DU Y P, LU J. Application of STK in simulation system of spacecraft orbit prediction[J]. Electro-Optic Technology Application, 2015, 30(4): 62-65.

[作者简介]



张琪 (1989-), 女, 国家无线电监测中心深圳监测站工程师, 主要研究方向为卫星信号监测与干扰定位。



林辉 (1987-), 男, 国家无线电监测中心深圳监测站工程师, 主要研究方向为卫星干扰源定位与信号监测。