

GNSS 服务空域空间信号可用性比较与分析

李振海¹, 焦文海^{1,2}, 黄晓瑞¹, 耿长江¹, 刘欣¹

(1. 中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心, 北京 100094;

2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 通过基本参数对全球卫星导航系统(GPS、GLONASS、Galileo 和北斗)空间信号可用性影响实验, 得出四系统的 A_{knee} 值分别为 3800km、1100km、3800km 和 1000km, 对应的平均可见卫星数为 25、16、22 和 14/22 (亚太地区、MEO 星座/混合星座)。分析了三种典型轨道用户的卫星可见性, 北斗和 GLONASS 对 MEO 和 HEO 用户的空间信号可用性能较 GPS 和 Galileo 稍差, 而在 LEO 用户的应用中, 北斗空间信号可用性能却表现最优, 平均可见卫星数约为 20 颗, 可用性时间分布比较均匀。最后对 GNSS 空间有效持续时间段进行统计, 随着用户高度的增加, 有效持续时间段数增多、总有效持续时间减少; 四系统提供全弧段有效服务空间分别为地面至 6100km、1600km、6100km 和 1700km。

关键词: 全球卫星导航系统; 服务空域; 空间信号可用性; 可见卫星数

中图分类号: P228.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2013)12-1605-09

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2013.12.010

Comparison and Analysis of Signal Availability in the GNSS Service Volume

LI Zhen-hai¹, JIAO Wen-hai^{1,2}, HUANG Xiao-rui¹, GENG Chang-jiang¹, LIU Xin¹

(1. Test and Assessment Center, China Satellite Navigation Office, Beijing 100094, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Based on the experiments of GNSS signal-in-space availability varying with θ_{HBW} and A_{knee} , some results can be concluded: A_{knee} for GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou is 3800km, 1100km, 3800km and 1000km respectively, and the corresponding average number of SVs is 25, 16, 22 and 14/22 (MEO constellation/Integrated constellation for Asia-Pacific region) respectively. Then the satellite visibilities for three typical user orbits are analyzed. Showing that signal availabilities of BeiDou and GLONASS are slightly worse than GPS and Galileo in MEO and HEO user orbits, and in LEO user orbit, BeiDou had the best performance that the average number of SVs is about 20, and the distribution of availability time is even. Lastly GNSS spatial effective continued time segment is analyzed, with the increment of user altitude the number of segments increases and the total effective time decreases. The space domain that GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou could supply effective service (100% continued time segments) is from the earth surface to the altitude of 6100km, 1600km, 6100km and 1700km respectively.

Key words: GNSS; Service volume; Signal-in-space availability; Number of Visible satellites number

0 引言

随着各 GNSS 建设的完善及其所提供 PNT 性能的提升, GNSS 服务空域的用户越来越多, 这些用户对空间服务性能的要求也越来越高, GNSS 的空间

服务性能研究逐步发展为卫星导航领域内的研究热点。NASA 统计了 2008 - 2027 年世界范围内的空间任务(主要应用于空间导航、卫星测高和其他科学研究): 处于 TSV (Terrestrial Service Volume, 地面至 3000km 的空间) 的任务约占 60%, 处于 SSV

(Space Service Volume, 3000km ~ 36000km 的空间) 的任务约占 35%, 其他 5% 的空间任务包括 HEO 导航及深空探测等^[1-3]。约 95% 任务所处空间(包含 TSV 和 SSV)是未来空间用户重点关注的区域,也是学者们研究的热点区域。

国外对 GNSS 空间服务的定义和空间导航试验等进行了大量的研究, Bauer^[4] 等对 GPS 空间服务性能进行了定义,并以实测数据对空间信号可用性、测距误差和信号功率三个指标进行了深入分析; Stanton^[5] 等对基于 Walker- δ (24/6/1) 的 GPS 服务空域内空间信号可用性进行了深入的研究,对用户所关心的 8 个轨道高度的可见卫星数和卫星可用性时间进行统计分析;另外,基于 GNSS 的空间飞行器导航的相关试验^[6-7]、大椭圆轨道卫星定轨^[8] 和 GEO 卫星定位技术^[9] 的相关研究也取得了部分成果。国内,王杰娟^[10] 等基于卫星-地球-空间目标点之间的几何关系,对低轨、中高轨和大椭圆轨道的空间目标点的空间信号可用性进行了分析;汪捷^[11] 等对 GPS 服务空域内导航精度性能进行了仿真评估;赵雯雯^[12] 基于星间链路的优化设计,探讨了 GNSS 星座的远地、深空导航的应用。

我国自主研发、独立运行的北斗卫星导航系统按照发展计划^[13-14], 将于 2020 年完成由 30 余颗卫星组成的全球系统建设,而 Galileo 也将基本完成全球系统建设,届时全球卫星导航系统将主要包括 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗(以下简称“四系统”)。由于政治、经济和技术各方面因素的影响,各系统的建设存在一定的差异,服务空域性能标准也不相同。因此,有必要对 GNSS 空间服务进行深入探讨。本文重点研究四系统服务空域内空间信号可用性指标,首先分析用户空间高度和卫星主波束角对空间信号可用性的影响;然后对三种典型轨道用户的卫星可见性进行统计,主要分析时域可见卫星数(Space Vehicles in View,下文以“SVs in View”表示)并统计卫星可用性时间;最后对 GNSS 满足空间用户导航、定位最低需求($N_{vis} \geq 4$ 且 PDOP ≤ 7) 的持续时间进行统计。

1 基本参数对空间信号可用性的影响

GNSS 可用性是指卫星导航系统在其服务空域内为运动载体提供可用导航服务的时间百分比,是

对满足服务性能标准的时间累积效应的统计^[15]。随着 GNSS 系统的发展及对 GNSS 有关标准认识的不断深入,GNSS 可用性的概念也在不断地发展,早期研究中 GNSS 可用性主要是指精度可用性(DOP 可用性)^[16-17],而 GPS SPS PS(2008)中可用性主要针对 SIS,包括单星可用性和星座可用性^[18],目前一些文献则提出可用性分为空间信号层可用性和服务层可用性,其中影响空间信号层的主要因素包括空间信号的可见性、信号接收功率和卫星的故障率与维修率等^[15]。空间用户自一定高度之后,随着高度的增加卫星信号的自由空间路径损耗增大,用户接收功率变小,进而限制了空间用户的轨道高度,但由于空间用户接收机性能优于地面且 GNSS 卫星发射功率有一定裕量,因此,在 TSV 和 SSV 内只要满足信号可见性,即可保证空间用户对接收功率的最低要求。本文主要通过空间信号的可见性来分析服务空域内空间信号的可用性,在研究有效持续时间段时采用了 DOP 的可用性概念。

影响 GNSS 空间信号可见性的两个重要参数为卫星信号主波束角(即:导航卫星的信号主波束角 θ_{HBW}) 和用户接收机的空间高度。用户接收机所能观测到的可见卫星数、接收机高度和信号主波束角之间关系如下:用户可见卫星数随高度的增加而增加,在“膝关节”高度(A_{knee}) 处达到最大值,之后随着高度的增加而迅速减少; A_{knee} 会随着 θ_{HBW} 的增加而变大,因此同一位置空间用户可以接收到更多的 GNSS 卫星信号。

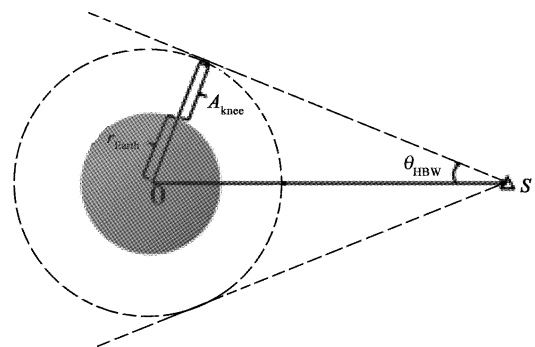


图 1 A_{knee} 与 θ_{HBW} 之间的关系

Fig. 1 Relationship between A_{knee} and θ_{HBW}

理论高度值 A_{knee} 为卫星信号主波束边与地球同心圆相切的高度(见图 1),该值用于反映 GNSS 星座服务空域内最大可见卫星数的空间高度,仅对

全球分布 MEO 星座有效,可表示为 GNSS 卫星信号主波束角 θ_{HBW} 的函数^[5]:

$$A_{knee} = r_{GNSS} \sin(\theta_{HBW}) - r_{Earth} \quad (1)$$

基于表 1 的基本参数计算了四系统空间平均可

见卫星数随 A_{knee} 和 θ_{HBW} 变化情况如图 2 所示。其中,计算点位于 $(0^\circ N, 0^\circ E)$,空间高度取 $0\text{km} \sim 10000\text{km}$,为了便于比较分析,北斗星座仅采用 24 颗 MEO 卫星。

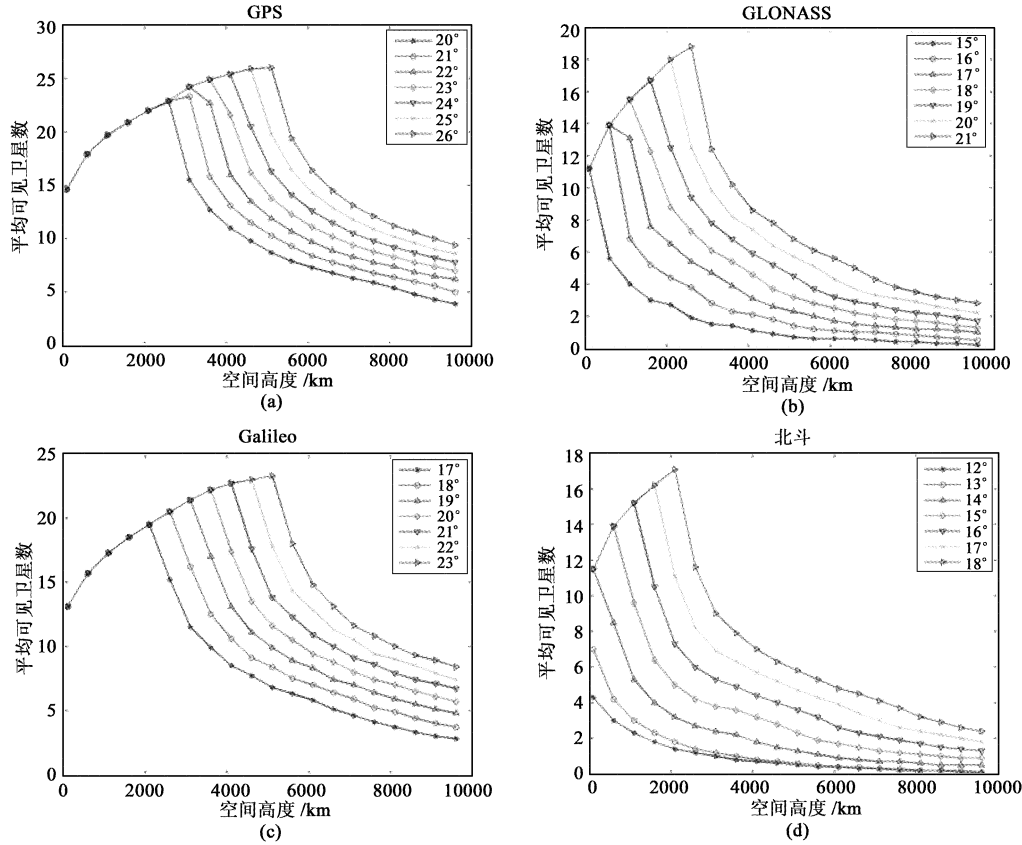


图 2 θ_{HBW} 和空间高度对平均可见卫星数的影响

Fig. 2 Varying of average SVs in view caused by θ_{HBW}

由图 2 可知, A_{knee} 随 θ_{HBW} 的增加而变大;平均可见卫星数从地面至 A_{knee} 表现为随高度增加而增加, A_{knee} 之后表现为迅速下降;按表 1 给定信号主波束角 θ_{HBW} , 四系统的 A_{knee} 值分别为 3800km、1100km、3800km 和 1000km, 且在 A_{knee} 处的平均可见卫星数分别达到 25、16、22 和 14 颗。

为了查看北斗混合星座 A'_{knee} 值在不同区域的分布情况, 本文根据表 1 给定的 θ_{HBW} , 计算了均匀分布于赤道的六个点 $65^\circ W$ 、 $30^\circ W$ 、 $5^\circ E$ 、 $40^\circ E$ 、 $75^\circ E$ 和 $110^\circ E$ 的空间平均可见卫星数随用户高度的变化情况, 见图 3。

由图 3 可知, 北斗混合星座的 A'_{knee} 值与 MEO 星座 A_{knee} 是一致的, 为 1000km, 由西半球到东半球 A'_{knee} 所对应的平均可见卫星数逐渐增多, 最长达 22

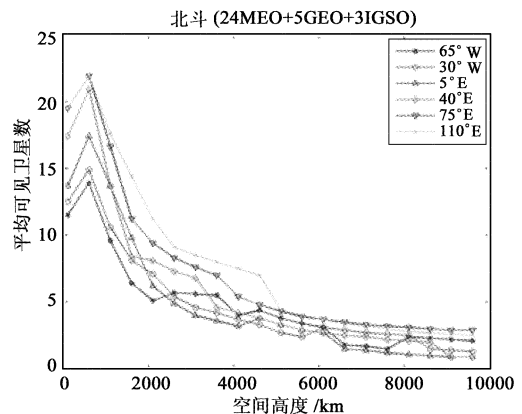


图 3 北斗星座平均可见卫星数的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of average SVs in view for BeiDou

颗。其主要原因是 GEO/IGSO 增强了亚太地区信号的空间覆盖, 但对 MEO 星座 A_{knee} 值的影响较小。

表 1 四系统仿真基本参数

Table 1 The simulation parameters of GNSS

	GPS	GLONASS	Galileo	北斗			
				24 MEO	5 GEO	3 IGSO	
数据来源	广播星历	Walker (24/3/1)	Walker (27/3/1)	Walker (24/3/1)	58.75°E/80°E/110.5°E /140°E/160°E	Walker (3/3/2)	
星座参数	信号主波束角 θ_{HBW}	23.5°	18°	20°	15°	10°	10°
	轨道倾角	55°	64.8°	56°	55°	0°	55°
	轨道高度	20200km	19100km	23600km	21500km	36000km	36000km
	回归周期	1/2 恒星日	8/17 恒星日	10/17 恒星日	7/13 恒星日	—	—
	卫星总数	31	24	27		32	
实验参数	起始时间	2012-07-01 00:00:00	2012-07-01 00:00:00	2012-07-01 00:00:00		2012-07-01 00:00:00	
	结束时间	2012-07-03 00:00:00	2012-07-09 00:00:00	2012-07-11 00:00:00		2012-07-08 00:00:00	
	总天数	共 2 天	共 8 天	共 10 天		共 7 天	
	步长	1min	5min	5min		5min	
	θ_{HBW} 实验值	20° ~ 26°	15° ~ 21°	17° ~ 23°		12° ~ 18°	

2 典型轨道用户对 GNSS 卫星可见性统计

本节进一步分析了三种典型轨道用户对 GNSS 的可见卫星数,并统计了在各系统回归周期内卫星可用性时间(以百分比表示),以模拟应用来比较分析 GNSS 在其服务空域内的空间信号可用性。三种轨道依次代表典型的低轨(LEO)、中高轨(MEO)和

处于 SSV 边缘的大椭圆轨道 HEO 卫星,具体参数见表 2。实验采用文献[10]的卫星可视模型,基于卫星、地球和计算轨道点位之间的几何关系,进行典型轨道用户的卫星可见性分析,统计结果见图 4,其中,图左为回归周期内可见卫星数,北斗采用混合星座;图右为卫星可用性时间统计。

表 2 三种典型卫星轨道

Table 2 Three typical satellites' orbits

轨道	e	Ω	ω	i	M_0	a	远地点	近地点	备注
1	0.0010186	204.27°	71.01°	98.94°	289.22°	7227km	863km	849km	TSV
2	0.0026660	353.0°	192.52°	53.03°	167.42°	26560km	20260km	20118km	SSV
3	0.7258004	154.84°	280.29°	62.96°	11.91°	26555km	39457km	910km	SSV 外

如图 4 左所示,Orbit 1 对 GNSS 的平均可见卫星数分别为 19、15、17 和 20,Orbit 2 的平均可见卫星数 3、1、1 和 1,而 Orbit 3 的平均可见卫星数和 Orbit 2 接近,但是在其近地点时的卫星可见性依次达到 24、15、22、15,在图上呈现出周期性的尖峰曲线;右图为对应左图平均可见卫星数的卫星可用性时间统计结果,四系统最大可见卫星数的持续时间对于 Orbit 1 分别为 33% (20 颗)、30% (16 颗)、32% (18 颗)、15% (22 颗),对于 Orbit 2 分别为 37% (3 颗)、46% (0 颗)、46% (2 颗)、60% (0 颗),

对于 Orbit 3 分别为 33% (2 颗)、41% (0 颗)、36% (2 颗)、58% (0 颗)。

由以上结果可以看出,尽管北斗与 GLONASS 系统对 MEO 和 HEO 的空间信号可用性能较 GPS 和 Galileo 稍差,但是在 LEO 的应用中,北斗服务性能却表现为最优,平均可见卫星数达到了 20 颗。另外,从卫星可用性时间统计图可看出,北斗对 LEO 可见卫星数大于 15 颗以上的可用性时间分布比较均匀,这对于空间连续、稳定的导航十分有益。

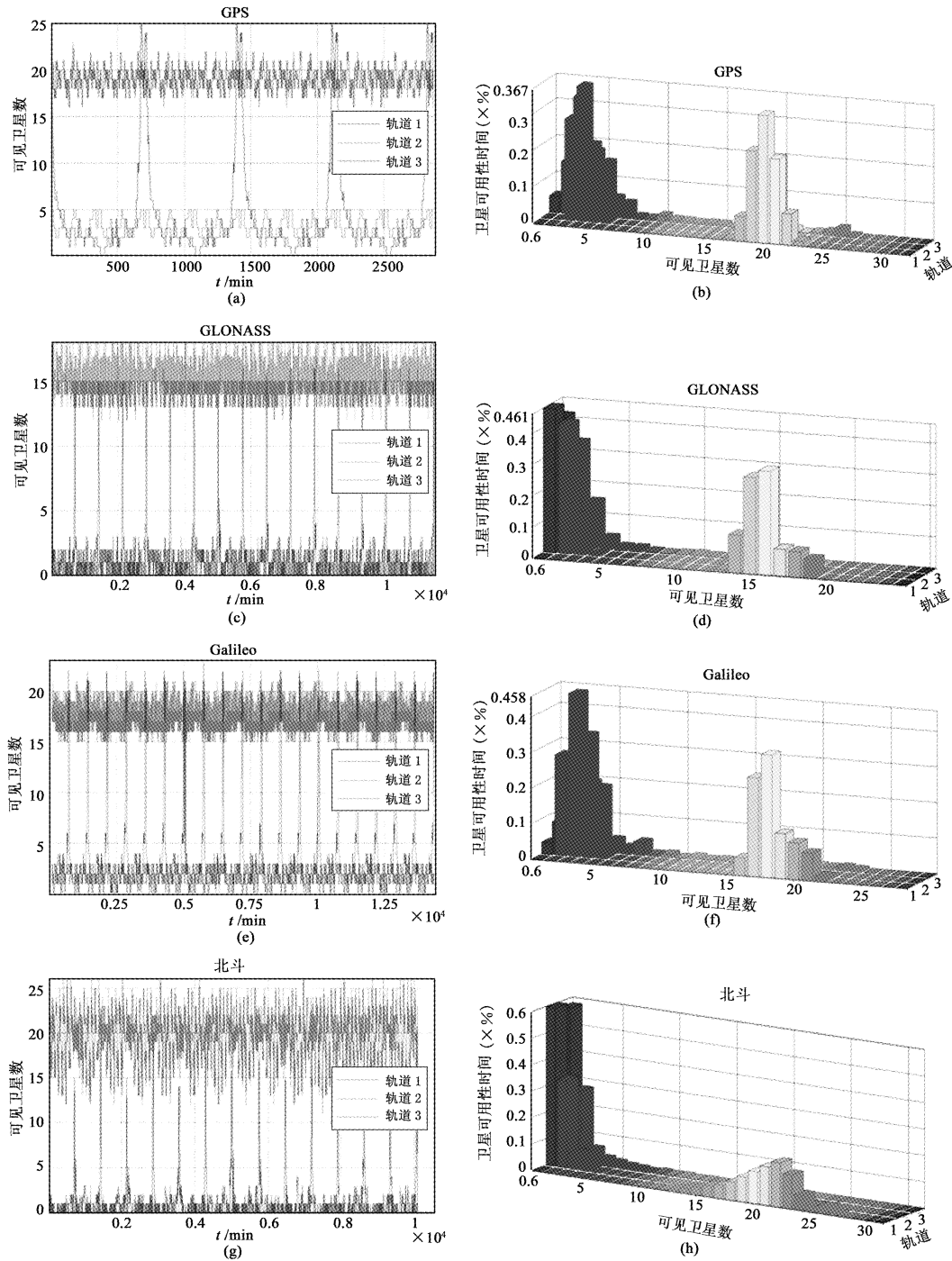


图 4 典型空间轨道卫星可见性统计

Fig. 4 Statistics of satellites' visibility for typical orbits

3 有效持续时间统计

假设空间用户对 GNSS 可见卫星数 $N_{vis} \geq 4$ 且 PDOP ≤ 7 (即:有效持续时间段) 便可满足用户的导航、定位的最低需求,本节对 GNSS 在各回归周期内的空间有效持续时间进行统计。北斗混合星座统计

了空间均匀分布的 60 个点位的计算值,见表 3;由于 GPS、GLONASS 和 Galileo 系统对可见卫星数和 PDOP 的影响表现为南北、东西对称,因此仅统计位于 $(0^\circ N, 0^\circ E)$ 、空间高度取地面至 14000km 均匀分布 10 个点位的计算值,见表 4。

表3 北斗系统持续时间统计

Table 3 Statistics of continual time segments for BeiDou

高度	经度 /(°)	纬度 /(°)	持续时间段数	最大持续时间 /min	最小持续时间 /min	持续时间总和 /min	百分比
100km	-105	-30	1	10075	10075	10075	100%
	-35	-30	1	10075	10075	10075	100%
	35	-30	1	10075	10075	10075	100%
	105	-30	1	10075	10075	10075	100%
	-105	0	1	10075	10075	10075	100%
	-35	0	1	10075	10075	10075	100%
	35	0	1	10075	10075	10075	100%
	105	0	1	10075	10075	10075	100%
	-105	30	1	10075	10075	10075	100%
	-35	30	1	10075	10075	10075	100%
	35	30	1	10075	10075	10075	100%
	105	30	1	10075	10075	10075	100%
900km	-105	-30	1	10075	10075	10075	100%
	-35	-30	1	10075	10075	10075	100%
	35	-30	1	10075	10075	10075	100%
	105	-30	1	10075	10075	10075	100%
	-105	0	1	10075	10075	10075	100%
	-35	0	1	10075	10075	10075	100%
	35	0	1	10075	10075	10075	100%
	105	0	1	10075	10075	10075	100%
	-105	30	1	10075	10075	10075	100%
	-35	30	1	10075	10075	10075	100%
	35	30	1	10075	10075	10075	100%
	105	30	1	10075	10075	10075	100%
1700km	-105	-30	1	10075	10075	10075	100%
	-35	-30	1	10075	10075	10075	100%
	35	-30	1	10075	10075	10075	100%
	105	-30	1	10075	10075	10075	100%
	-105	0	1	10075	10075	10075	100%
	-35	0	1	10075	10075	10075	100%
	35	0	1	10075	10075	10075	100%
	105	0	1	10075	10075	10075	100%
	-105	30	1	10075	10075	10075	100%
	-35	30	1	10075	10075	10075	100%
	35	30	1	10075	10075	10075	100%
	105	30	1	10075	10075	10075	100%
2500km	-105	-30	146	180	0	7090	70%
	-35	-30	165	185	0	6725	67%
	35	-30	1	10075	10075	10075	100%
	105	-30	1	10075	10075	10075	100%
	-105	0	29	1165	0	8925	89%
	-35	0	25	1190	80	9070	90%
	35	0	2	9490	575	10065	100%
	105	0	7	4045	210	9950	99%
	-105	30	152	175	0	7040	70%
	-35	30	174	180	0	6610	66%
	35	30	1	10075	10075	10075	100%
	105	30	1	10075	10075	10075	100%

表 3(续) 北斗系统持续时间统计
Table 3(Continued) Statistics of continual time segments for BeiDou

高度	经度 / (°)	纬度 / (°)	持续时间段数	最大持续时间 /min	最小持续时间 /min	持续时间总和 /min	百分比
3300km	-105	-30	211	110	0	4350	43%
	-35	-30	189	190	0	4610	46%
	35	-30	123	270	0	6685	66%
	105	-30	47	425	45	8805	87%
	-105	0	92	155	0	5825	58%
	-35	0	105	155	0	5865	58%
	35	0	66	195	0	7275	72%
	105	0	32	975	0	9195	91%
	-105	30	205	100	0	4355	43%
	-35	30	190	145	0	4565	45%
	35	30	114	225	0	6845	68%
	105	30	42	430	0	8925	89%

表 4 其他系统持续时间统计
Table 4 Statistics of continual time segments for other GNSS

系统	高度/km	持续时间段数	最大持续时间 /min	最小持续时间 /min	持续时间总和 /min	百分比
GPS	100	1	2879	2879	2879	100%
	1600	1	2879	2879	2879	100%
	3100	1	2879	2879	2879	100%
	4600	1	2879	2879	2879	100%
	6100	1	2879	2879	2879	100%
	7600	5	1172	254	2860	99%
	9100	19	208	0	2055	71%
	10600	18	132	13	1238	43%
	12100	18	57	7	742	26%
13600	16	43	0	344	12%	
Galileo	100	1	14395	14395	14395	100%
	1600	1	14395	14395	14395	100%
	3100	1	14395	14395	14395	100%
	4600	1	14395	14395	14395	100%
	6100	1	14395	14395	14395	100%
	7600	21	960	345	13850	96%
	9100	68	190	0	9865	69%
	10600	100	125	0	6405	45%
	12100	61	105	35	3920	27%
13600	42	30	0	910	6%	
GLONASS	100	1	11515	11515	11515	100%
	1600	1	11515	11515	11515	100%
	3100	37	700	0	10745	93%
	4600	91	180	0	5815	51%
	6100	59	45	0	1270	11%
	7600	55	20	0	650	6%
	9100	33	15	0	225	2%
	10600	—	—	—	—	—
	12100	—	—	—	—	—
13600	—	—	—	—	—	

注 1. 表 3、表 4 中最小持续时间的“0”值表示统计时间段仅一个时间点,时间单位为分钟,高度单位为 km。

由表 3 可知,北斗系统有效持续时间从空间分布上看:各项指标南、北纬对称,由于东半球增加了 5 颗 GEO 和 3 颗 IGSO 卫星的影响,东半球最大持续时间、总持续时间优于西半球;1700km 以下空间可达到 100% 全弧段覆盖,随着高度的增加,有效持续时间段数增多、总有效持续时间减少。

由表 4 可知,GPS、Galileo 和 GLONASS 系统有效持续弧段中:随着高度的增加,弧段数增多、最大持续时间、总有效持续时间减少;三系统能提供全弧段有效服务(有效持续时间达 100%)的空间高度分别为 6100km、6100km 和 1600km。

4 结 论

本文对 GNSS 服务空域内空间信号可用性进行了比较分析,主要研究了卫星信号主波束角和用户接收机的空间高度两个参数对空间信号可用性的影响、典型轨道用户的卫星可见性和 GNSS 信号的空间有效持续时间统计,并得出以下结论:

(1) 不考虑自由空间损耗导致空间信号接收功率衰减的情况下, A_{knee} 为 GNSS 服务空域内空间信号可用性最优的空间高度,跟卫星信号主波束角有直接关系,北斗(MEO)星座和 GLONASS 星座的 θ_{HBW} 值小于 GPS 和 Galileo,因此,前两者的 A_{knee} 值(约 1000km)小于后两者(约 3800km)。

(2) 基于本文给出的三种经典轨道的卫星可见性分析,北斗和 GLONASS 系统对 MEO 和 HEO 的空间信号可用性能较 GPS 和 Galileo 稍差,而在 LEO 的应用中,北斗空间信号可用性能却表现为最优,平均可见卫星数约为 20 颗,大于 15 颗可见卫星的可用性时间分布比较均匀。

(3) GNSS 有效持续时间段中,随着高度的增加,持续时间段数增多、总有效持续时间减少;四系统提供全弧段有效服务(有效持续时间达 100%)的空间高度依次为 6100km、1600km、6100km 和 1700km。

(4) 北斗混合星座服务空域自西半球至东半球,平均可见卫星数逐渐增多(约 22 颗,接近 GPS 和 Galileo)、有效持续时间段性能提高,说明北斗混合星座加强了亚太地区的信号覆盖,改善了 MEO 星座的服务性能。

本文仅从 GNSS 空间服务性能的空间信号可见性指标进行分析,在未来工作中还需要对空间服务性能的另外两个指标——测距误差和信号功率进行研究;另外,文中给出的 TSV 和 SSV 划分是以美国 GPS 标准定位服务性能标准划分的,我国北斗导航系统服务性能标准中 TSV 和 SSV 的划分也需进行深入研究。

参 考 文 献

- [1] Young L. Meeting space user requirements through evolving PNT services[C]. 4th ICG, St. Petersburg, Russia, Sep 14 - 18, 2009.
- [2] Miller J J. Enabling a fully interoperable GNSS space service volume[C]. 6th ICG, Tokyo, Japan, Sep 5 - 9, 2011.
- [3] Garcia-Rodriguez A. Characteristics for an interoperable GNSS space service volume[C]. ICG WG-B, Vienna, Austria, June 2012.
- [4] Bauer F H, Moreau M C, Dahle-Melsaether M E, et al. The GPS space service volume[C]. 19th ION GNSS, Fort Worth, USA, Sep 26 - 29, 2006.
- [5] Stanton B J, Temple L P, Edgar C E. Analysis of signal availability in the GPS space service volume[C]. 19th ION GNSS, Fort Worth, USA, Sep 26 - 29, 2006.
- [6] Moreau M, Davis E, Carpenter J R, et al. Results from the GPS flight experiment on the high earth orbit AMSAT AO-40 spacecraft[C]. ION GPS, Portland, USA, Sep 24 - 27, 2002.
- [7] Kronman J D. Experience using GPS for orbit determination of a geosynchronous satellite[C]. Institute of Navigation GPS, Salt Lake City, USA, Sep 19 - 22, 2000.
- [8] Qiao L, Lim S, Rizos C, et al. GNSS-Based orbit determination for highly elliptical orbit satellites[C]. International Symposium on GPS/GNSS, Jeju Island, South Korea, Nov 4 - 6, 2009.
- [9] Chibout B, Macabiau C, Escher A C, et al. Investigation of new processing techniques for geostationary satellite positioning[C]. ION NTM, Monterey, USA, Jan 18 - 20, 2006.
- [10] 王杰娟,刁华飞,董正宏. 32 颗 GPS 卫星星座空间覆盖特性建模与仿真[J]. 航天控制, 2009, 27(6): 52 - 55. [Wang Jie-juan, Diao Hua-fei, Dong Zheng-hong. Modeling and simulation of coverage performance of 32 GPS satellites constellation[J]. Aerospace Control, 2009, 27(6): 52 - 55.]
- [11] 汪捷,欧阳文,赵学军. GPS 服务空域内导航精度性能仿真评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(6): 635 - 639. [Wang Jie, Ouyang Wen, Zhao Xue-jun. Evaluation and simulation of GPS navigation performance in service volume[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(6): 635 - 639.]

- [12] 赵雯雯, 张立新, 蒙艳松, 等. 全球导航星座的远地/深空导航应用研究[J]. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2011, 41(5): 581 – 588. [Zhao Wen-wen, Zhang Li-xin, Meng Yan-song, et al. The application of global navigation constellation for HEO(high earth orbit) satellites and deep-space satellites[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2011, 41(5): 581 – 588.]
- [13] 冉承其. 北斗卫星导航系统建设与应用[C]. 第三届中国卫星导航学术年会, 广州, 2012 年 5 月 15 日 – 19 日. [Ran Cheng-qi. Development and application of BeiDou navigation satellite system [C]. The 3rd China Satellite Navigation Conference, Guangzhou, May 15 – 19, 2012.]
- [14] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(2.0 版)[EB/OL]. 北斗网, 2012. [China Satellite Navigation Office. Report on the development of BeiDou navigation satellite system (Version 2.0)[EB/OL]. www.beidou.gov.cn, 2012.]
- [15] 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. [Li Zuo-hu. Research on monitoring and assessment of satellite navigation system performance [D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2012.]
- [16] Kelley C W, Fisher S C. Orbital optimization of the GPS constellation and its effect on accuracy and availability[C]. ION GPS, Kansas City, USA, Sep 16 – 19, 1997.
- [17] Thiebolt V, Zwolska F, Provenzano J P. Operational performances of an Innovative European Navigation System (INES)[C]. The 54th Annual Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Denver, Colorado, USA, Jun 1 – 3, 1998.
- [18] U. S. Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard [R]. 4th Edition, Washington DC, Sep 2008.

作者简介:

李振海(1981 –),男,博士,工程师,主要从事卫星导航系统数据处理研究。

通信地址:北京市海淀区丰滢东路 1 号(100094)

电话:(010)88105922

E-mail:lizhenhai666@163.com

(编辑:曹亚君)