

认识北斗 建设北斗

许其凤

(信息工程大学导航与空天目标工程学院, 郑州 450052)

[摘要] 指出卫星导航系统的发展规划应与国防战略和装备能力相适应, 一个包括我国周边及西太平洋的区域系统可以满足近期的军用、民用需求。分析了我国建设卫星导航系统的不利条件, 并设计了规避不利条件的卫星星座。介绍了我国发展全球系统所必需的卫星对卫星观测和数据传输的技术支撑。分析了区域增强的全球系统的竞争优势。

[关键词] 卫星导航系统; 卫星星座设计; 区域系统; 区域增强

[中图分类号] P228 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)08-0026-07

1 发展我国卫星导航系统是国家安全的需要

1.1 国防安全的需要

纵观近年的战争, 科索沃(塞尔维亚)、伊拉克等地的战事, 无不是依托军事基地从海上发起精确打击为主要手段。对于既无远程武器也无精确导航的国家而言, 只能挨打, 无有效还击能力。在近代战争中卫星导航具有重要作用, 此外它还用于许多军事领域, 如合同作战、指挥、精确制导弹药、后勤保障等。事实上, 卫星导航系统就是因军事需要而产生、发展的。早在1964年, 美军海军的子午仪卫星导航系统就是为保障美国导弹核潜艇导航需要而发展的。

GPS由美国陆海空三军联合研制, 称为美国第二代卫星导航系统。目前美军已普遍应用GPS卫星导航系统, 成为提高战斗力的重要因素。卫星导航系统的军事属性决定了它应是独立自主的, 不受控于他国。目前, 除已有的GPS和苏联几乎同时发展的GLONASS外, 中国、欧洲、日本、印度等国家和地区都在计划、发展自己的卫星导航系统。

应该指出, 卫星导航系统并不是战斗实体, 它的作用是提升实体的战斗力。因此, 卫星导航系统的发展规划应与国防战略和装备能力相适应。一个包括西太平洋在内的区域导航系统是当时(2000年)的急需, 全球导航系统是进一步发展的必然趋势。

1.2 国民经济安全的需要

民用对卫星导航也有很大需求。卫星导航可以提供定位和准确的时间(精度可达 $0.1\ \mu\text{s}$ 或更高)。近二十年, 各国(包括中国)在民用领域广泛采用GPS导航, 其中包括交通、测绘、通信、电力、银行等国民经济中的重要领域。独立自主的卫星导航系统是国民经济安全运行的保障。

卫星导航系统的民用领域具有很大的产业发展潜力, 我国民用用户主要分布在国内及周边, 前述军用需求的区域系统同时能满足绝大部分民用的需求。

2 我国发展卫星导航系统的不利条件

学习、借鉴国外已有卫星导航系统的技术、经验是重要的, 但必须充分顾及我国具体条件的不

[收稿日期] 2014-05-19

[作者简介] 许其凤, 1936年出生, 男, 天津市人, 中国工程院院士, 研究方向为卫星大地测量、卫星导航; E-mail: congqianwei@sina.com

同,尤其是不利的条件。

卫星导航的原理很简单。测量用户到某一卫星的距离,可写出如下方程

$$\rho^j = \sqrt{(x^j - x)^2 + (y^j - y)^2 + (z^j - z)^2} \quad (1)$$

式(1)中, ρ^j 为到所测卫星的距离(卫星编号为 j); x^j 、 y^j 、 z^j 为该卫星的坐标; x 、 y 、 z 为用户坐标。如果卫星的位置已知,原理上讲,只需测量3颗卫星的距离,解3个方程就可解算用户的位置(x 、 y 、 z)。

卫星导航的过程可以简要描述为:测量到卫星的距离;利用卫星的位置,解算用户的位置。为取得较高精度的导航解就需要测量距离精确;卫星位置准确;卫星空间分布良好(较好的空间几何分布,可以减少位置解算中的精度衰减)。可将以上称为精确导航的三要点。

2.1 难于做到监测站的全球分布

为取得卫星位置,必须测定卫星的轨道,通常称为定轨;而后按卫星轨道外推(计算)卫星位置;通常称为预报。由于导航是实时定位,用户解算所使用的卫星位置只能是外推的位置。故导航中卫星位置的精度受到定轨精度和外推精度的双重影响。

卫星轨道测定是以众多地面监测站不断对卫星观测(测距),经计算得到的。为取得高精度的轨道精度,除了要求这些观测量的精度要高,还要求观测分布在卫星轨道的全弧段。在同等观测精度的条件下,观测量分布的轨道弧段越长轨道测定的精度越高。而轨道外推的精度取决于轨道测定的精度和外推时段(弧段)的长短。外推弧段越长,卫星预报(外推)位置的精度衰减越严重。这些都要求地面监测站在全球分布。而我国的具体条件,难于在全球布设安全、可靠的地面监测站。例如,在我国境内分布的监测站只能检测GPS卫星约1/3的弧段,外推弧段可达约2/3。图1是引用了实际测轨与外推精度的比较^[1]。三条曲线表示卫星坐标误差的3个分量。

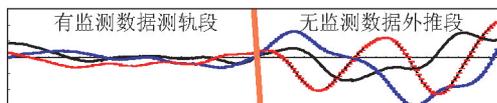


图1 测轨段和外推段的卫星位置精度

Fig. 1 Satellite positioning accuracy of orbit measurement segment and extrapolation segment

综合以上所述,为了保障精密导航所需要的精确卫星位置,需要尽量长的卫星运行弧段进行观测,这就要求监测站全球分布。和美国拥有众多海外军事基地相比,我国难于作到监测站的全球分布。

2.2 星载原子钟发展滞后

GPS(包括其他主要的卫星导航系统)采用测量电磁波传播时间 τ 测定距离 ρ

$$\rho = \tau \cdot c \quad \tau = t_2 - t^1 \quad (2)$$

式(2)中, c 为光速; t^1 和 t_2 分别为卫星发播信号和用户收到的时刻(实际上,为提高测量精度,采用伪随机噪声码的最大自相关测量传播时间)。式(2)成立的条件是卫星上的时钟和用户时钟精密同步(同步也可以是测定钟差,对钟面时进行修正)。由于测距误差为不同步误差乘以光速,要求同步精度为 10^{-9} (十亿分之一)秒。

导航定位时,用户将同时测量多颗卫星,难于做到所测诸卫星都与用户钟同步。目前的做法是所有卫星钟均与某一标准钟同步,用户钟与标准钟的同步差(用户钟差)作为一个未知数,参加导航解算。这样导航解算的未知数将为4,即至少观测4颗卫星以取得导航解(事实上,为提高精度和可靠性将观测4颗以上的卫星)。通过监测站的观测,可以解算诸卫星钟的钟差(快慢)使之同步。与卫星位置一样,这样的钟差并不能为用户所用,用户所使用的是钟差的外推值。除钟差测定的精度外,外推钟差的精度取决于外推时间的长短和星载钟的稳定性。鉴于我国监测站可能的分布,以GPS卫星为例,外推时间可达十几小时,为保障前述同步精度,要求星载原子钟的稳定度达到 10^{-14} 。我国原子钟发展相对滞后,当时国产原子钟达不到需要的技术指标,进口钟又遭禁运。这将直接影响对卫星的测距精度。

综上所述,我国发展卫星导航面临两个瓶颈问题,即监测站难于全球布设和星载原子钟发展相对滞后。不解决这两个瓶颈问题,就难于建设性能一流的卫星导航系统。

3 避短扬长的星座设计

导航系统的星座设计是为满足所需要的覆盖(服务)范围和导航精度,需由多少颗卫星组成卫星星座、采用的轨道参数以及如何分布,使得覆盖区域任何地点、任意时间卫星都有良好的分布。

卫星轨道的选择。当时,国际上可供借鉴的美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 和欧盟设计中的 Galileo 均采用均匀分布在 3 或 6 个轨道面的中轨卫星 (MEO, 轨道高度约 2×10^4 km) 组成卫星星座^[2]。事实上还有两种轨道可供选择,地球同步卫星轨道 (GEO, 高度约 3.6×10^4 km) 和倾斜轨道的同步卫星轨道 (IGSO), 后者的高度与 GEO 相同, 只是轨道面倾角不为 0° (不在赤道面上)。图 2 为从地球上观察这三种卫星轨道的示意图。如图 2 所示, 国际上导航系统所使用的 MEO 卫星自西向东绕地球旋转的; GEO 卫星从地球上看来是几乎不动; IGSO 卫星是由南到北运动 (东西变化不大)。



图 2 从地球观察三种卫星轨道

Fig. 2 Ground traces of three types of satellite orbit

如前所述,在国内布设监测站, MEO 卫星的可观测弧段约为 $1/3$, 而 GEO 和 IGSO 卫星可达 $80\% \sim 100\%$ ^[3], 大大增加了观测弧段, 减少了外推弧段, 解决了测轨和轨道外推 (预报) 的精度问题, 同时大大减少了卫星钟差的外推时间 (从十几小时缩短为 $1 \sim 2$ h), 降低了对卫星钟稳定性的技术要求 (使用国产原子钟即可保障卫星导航的高精度)。就我国的实际情况, 即国内布设监测站, 建设覆盖亚太的区域卫星导航系统, 选择 GEO 和 IGSO 可在很大程度上避开前述瓶颈问题。

卫星星座设计。选定卫星轨道后, 还需满足导航定位的第三要点, 即良好的卫星分布。由于地球的自转和卫星按各自轨道绕地球的旋转, 使得不同时间、不同地域的用户观测的卫星分布不同。优选的原则应是以最少的卫星 (最小的经费投入) 满足需求的覆盖和任意时间、地点的导航精度。仿真结果表明, 良好分布的 5 颗 GEO 和 5 颗 IGSO, 共 10 颗卫星组成的卫星星座可以满足建设覆盖亚太地区较高精度导航的要求。

图 3 为不同地区导航精度的仿真统计。设定测距误差为 2 m, 位置分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为 1 min。同一地区不同时间的精度不同, 图中显示为其最差 (标准差最大) 的定位精度。早期的设计为 4 颗 GEO 卫星和 12 颗 MEO 卫星共 16 颗卫星组成卫星星座。参考 GPS, 24 颗均匀分布的 MEO 卫星可保障任何地区至少可见 4 颗卫星, 12 颗 MEO 卫星可保障至少可见 2 颗卫星, 再辅以 4 颗 GEO 卫星至少可见 2 颗卫星, 可达到导航要求。由于 MEO 卫星是绕地球运转的, 对于区域系统, 它的利用率低, 所需卫星数多。

为了比较, 以同样的条件进行仿真比较, 北半球部分的比较见图 4。图中褐色表示标准差为 $30 \sim 100$ m。

4 区域增强的全球系统

随着国家经济增长、综合国力增强, 国家安全的概念和范围在扩展, 势必需要建设全球卫星导航系统。

星间测距技术。设全球系统需采用绕全球运动的中轨卫星。卫星对卫星测距与数据传输 (也称星间链路) 可以很好地解决我国监测站布设受到限制带来的监测弧段短, 外推弧段长的问题。这一技术当初是为了解决战时 GPS 地面监测和注入设备不能正常向卫星提供导航信息时, 可以使系统继续运行一段时间 (精度有所下降), 通常称为 (卫星) 自主定轨。尽管由于技术的发展, 这一目的有所淡化, 但它的全弧段监测能力和高精度的观测量使定轨和预报精度大为提高。星间链路的采用和我国星载原子钟性能的提高, 是建设高性能全球导航系统的重要技术基础。

目前世界具有多个卫星导航系统, 在民用的产业和市场存在竞争。总体性能的提高是提高竞争力的重要方面。事实上, 定位精度不是星座性能的唯一技术指标, 例如用户可视卫星数增多、高度较大的可视卫星数增多对提高系统性能有重要意义。前者可以提高可靠性并让用户具备自检功能, 后者可以减少建筑物和地形遮挡卫星的影响。

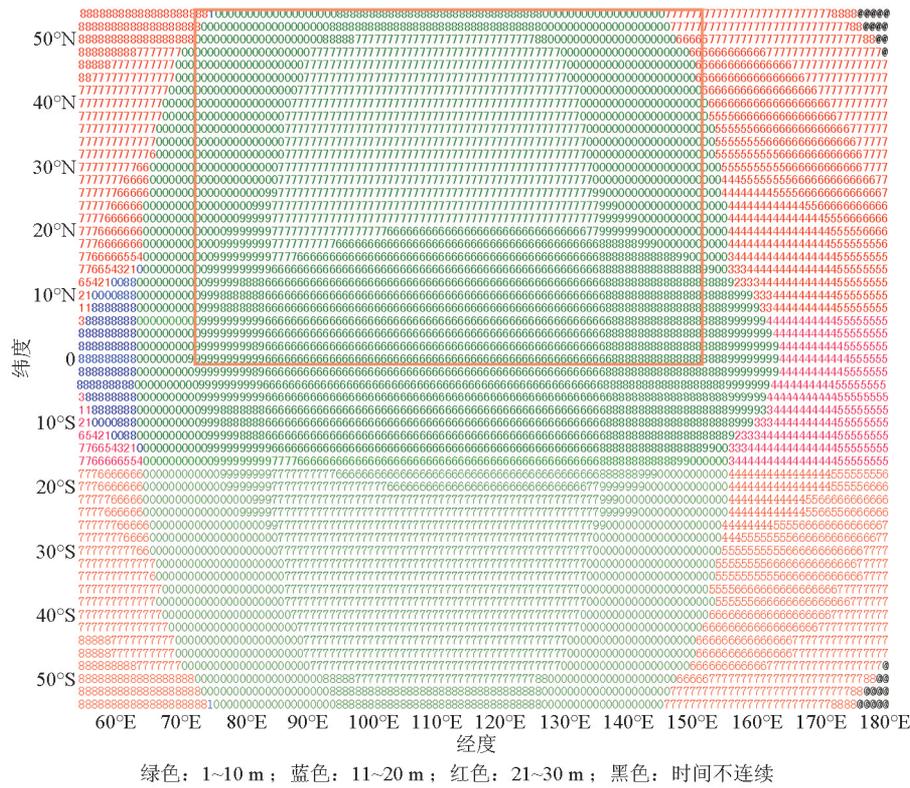
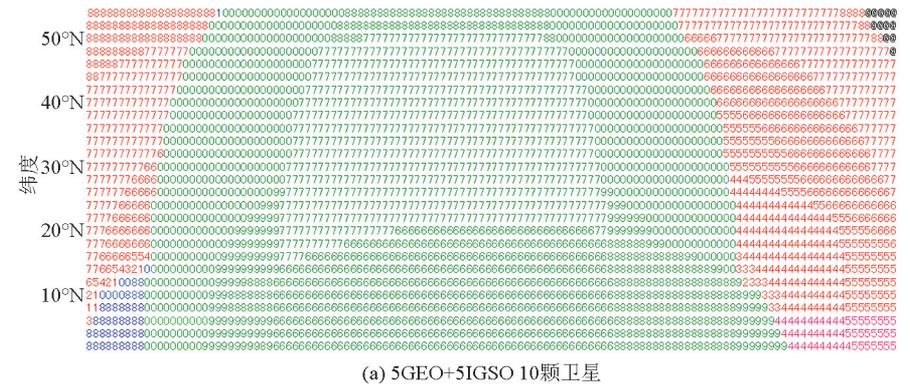


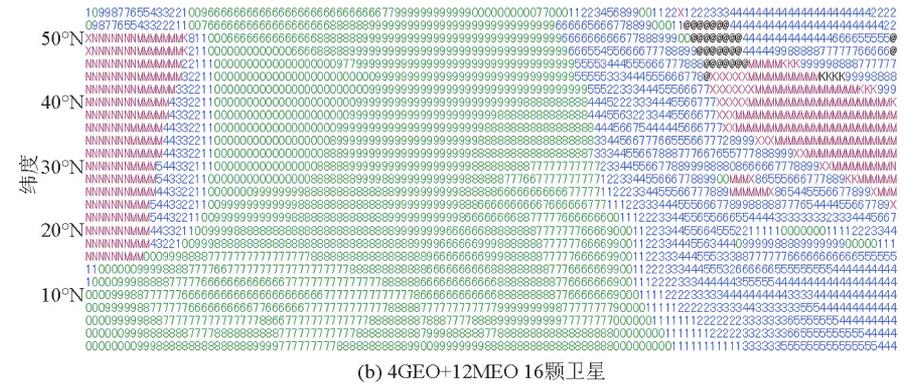
图3 不同地点的导航精度(标准差)

Fig. 3 Navigation accuracy of different regions

注: 图为5 GEO + 5IGSO 10颗卫星



(a) 5GEO+5IGSO 10颗卫星



(b) 4GEO+12MEO 16颗卫星

图4 两种方案的比较

Fig. 4 Comparison between two schemes

可以举几个例子进行比较:a. 类似GPS(初期), 含24颗均匀分布的MEO卫星;b. 类似Galileo, 含30颗均匀分布的MEO卫星;c. 区域增强系统, 含24颗均匀分布的MEO卫星和3颗GEO卫星及3颗IGSO卫星(卫星总数为30)。除表示精度的

衰减因子PDOP(位置精度衰减因子)外, 还有高度角大于5°的卫星数和高度角大于35°的卫星数。

仿真结果见图5~图7。图中仅显示了我国境内的部分, 事实上, 在经度60°~160°, 纬度±55°的区域内这种增强都很明显(见图8)。

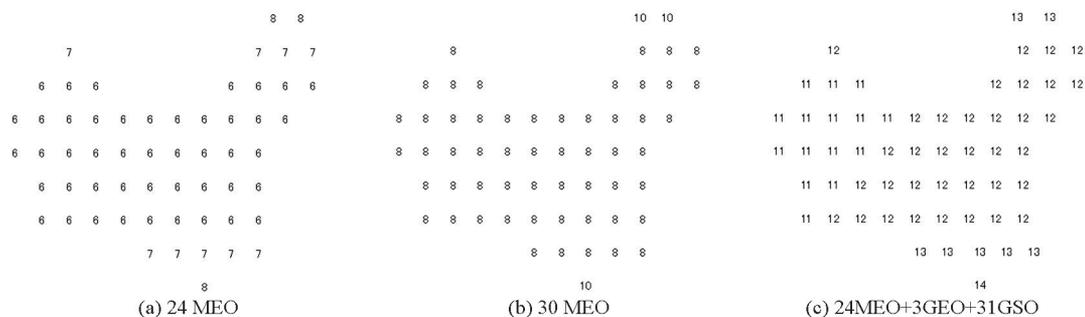


图5 高度角>5°的卫星数(90%)

Fig. 5 The number of satellite whose elevation angle is more than 5°(90%)

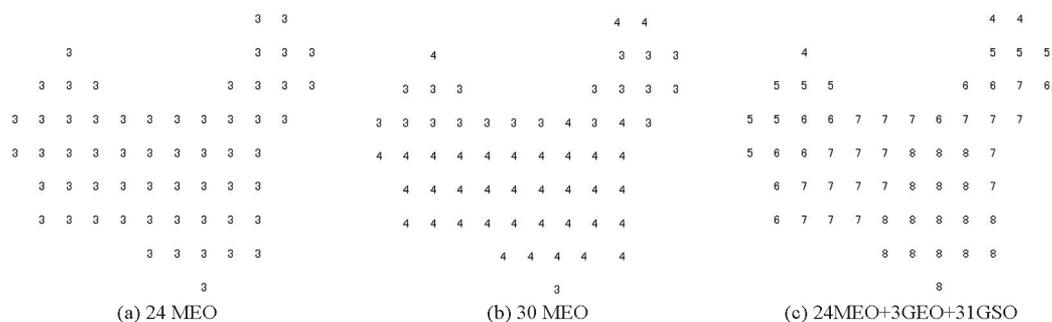


图6 高度角>35°的卫星数(90%)

Fig. 6 The number of satellite whose elevation angle is more than 35°(90%)

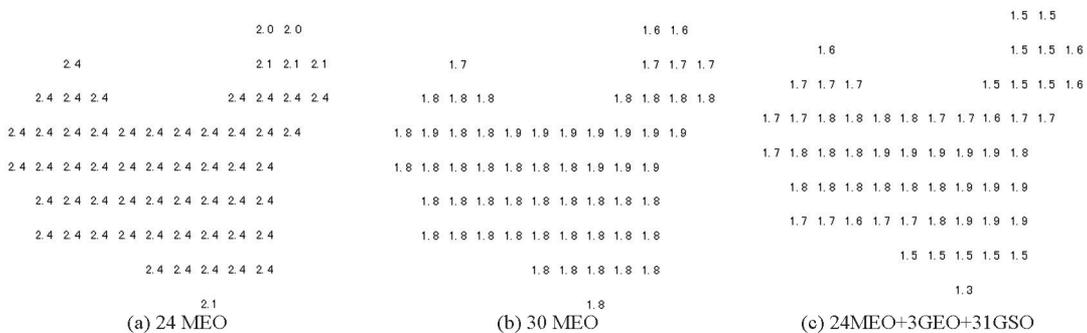


图7 高度角>5°的PDOP(90%)

Fig. 7 The PDOP of every area when satellite's elevation angle is more than 5°(90%)

综合比较见表1。观察图5~图8以及表1可见, 不论民用(国内及周边)还是军用(含太平洋西

部), 区域增强的全球系统在我国最重要的区域都有明显的优势。

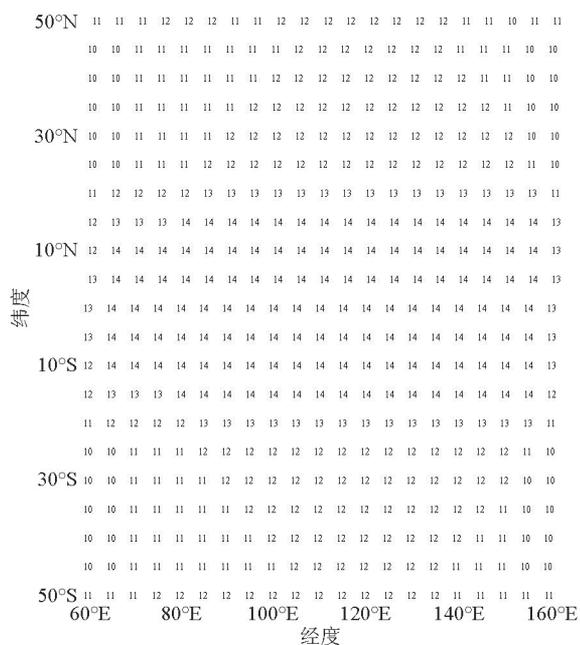


图8 更大范围高度角>5°的卫星数(90%)

Fig. 8 The number of satellite whose elevation angle is more than 5° in larger areas(90%)

表1 区域增强效果

Table 1 Regional augmentation results

统计指标 (90%置信度)	24MEO	30MEO	24MEO + 3GEO +3IGSO
$h>5^\circ$ 的卫星数	6.24	8.17	11.88
可见星增多	—	31%	90%
$h>35^\circ$ 的卫星数	3.00	3.66	6.64
可见星增多	—	22%	121%
精度衰减因子 PDOP	2.43	1.85	1.75
精度提高	—	24%	28%

5 结语

我国发展卫星导航系统的特殊性可归结为两个瓶颈,即监测站难于全球布设和星载原子钟发展相对滞后。这具体表现在对卫星的监测弧段短,外推弧段长,不利于精确测定和外推卫星轨道和卫星钟差,而国产星载原子钟的稳定度较差更使测距误差增大。选择地球同步卫星和倾斜轨道的同步卫星可以近全弧段跟踪,缩小外推弧段,可使用国产原子钟建设较高精度的亚太地区卫星导航系统。

建设全球导航系统需采用MEO,采用卫星间测距和数据传输技术可以做到全弧段跟踪,实现高精度全球导航。采用同步卫星(GEO、IGSO)增强的全球系统可在亚太地区的导航性能得到显著增强,即在我国军用、民用最重要的区域性可以超越其他卫星导航系统。

参考文献

- [1] 马欣,焦文海. IGS的IGU轨道及其精度分析[J]. 军事测绘, 2001(6):36-40.
- [2] 艾利奥 D 卡普兰, 克利斯朵夫 J H. GPS原理与应用(第二版)[M]. 寇艳红,译. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [3] Xu Qifeng, Yang Li. Local-area satellite navigation system (LNS) [J]. International Conference on Navigation, 2001, 10 (10):24-29.

Understand and construct Beidou Navigation System

Xu Qifeng

(Institute of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China)

[Abstract] This paper indicates that the development of satellite navigation system should correspond to defense strategy and equipment capacity, and a regional navigation system covering neighboring countries and the Western Pacific is able to meet the recent military and civilian demands. The adverse conditions of constructing satellite navigation system in our country are analyzed and satellite constellation of avoiding adverse conditions is designed. Technical supports of satellite observations and data transmission for satellites which are needed in global system development of our country are introduced. Competitive advantage of global navigation system with regional augmentation is analyzed.

[Key words] satellite navigation system; satellite constellation design; regional navigation system; regional augmentation