

文章编号: 1001-1595(2011)S-0068-05

北斗卫星导航系统的星座及 XPL 性能分析

杨鑫春, 李征航, 吴 云

武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079

The Performance Analysis of Constellation and XPL for Compass

YANG Xinchun, LI Zhenghang, WU Yun

School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract : Structure of the Compass is analyzed. Then the system's visibility, DOP value and position accuracy in China mainland are simulated and analyzed. According to the features of the system's constellation and referring the principle of space-based augmentation system's integrity algorithm, the XPL value which the system can provide in China mainland is analyzed. The conclusion shows that the Compass can provide the integrity of APV-iv in China mainland under a single frequency.

Key words : Compass navigation satellite system; visibility; DOP; position accuracy; integrity; XPL

摘 要: 分析北斗卫星导航系统的组成结构, 就系统在中国大陆区域内卫星的可见性、DOP 值和定位精度进行仿真分析。借鉴 SBAS 完备性算法的原理分析在中国大陆区域内北斗卫星导航系统所能提供的 XPL 性能指标。表明在单频条件下, 中国大陆区域内仿真的 Compass 系统能满足 APV-iv 飞行阶段的完备性要求。

关键词: 北斗卫星导航系统; 可见性; 精度因子; 定位精度; 完备性; 用户保护水平

中图分类号: P228

文献标识码: A

基金项目: 国家 863 计划(2009AA12Z301); 武汉大学卫星导航与定位教育部重点实验室开放基金(GRG-2009008)

我国计划于 2020 年建成覆盖全球的北斗卫星导航系统(Compass)。Compass 系统采用被动定位方式, 卫星星座将由 5 颗静止轨道卫星和 30 颗非静止轨道卫星组成。在 Compass 系统论证中明确提出完备性的概念, 计划在将来的系统中发布完备性信息, 但具体的技术实现还需要进一步研究和论证。基于此, 本文在仿真 Compass 系统星座结构的基础上分析该系统在中国大陆区域内卫星的可见性、PDOP 值和定位精度; 并采用 SBAS 完备性算法分析了在中国大陆区域内 Compass 系统所能提供的用户保护水平(XPL)性能指标。初步分析表明在单频条件下, 中国大陆区域内仿真的 Compass 系统能满足 APV-iv 飞行阶段的完备性要求。

1 星座结构仿真和性能分析

1.1 星座结构仿真

国内有不少学者对 Compass 系统的星座结构进行了详细的分析和研究^[6-8], 本文仿真的星座结构为 5 颗 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星和 27 颗 MEO 卫星, 卫星的基本参数如表 1 所示。

仿真星座的卫星星下点轨迹如图 1 所示。大

椭圆线为 5 颗 GEO 卫星的星下点轨迹, 形如 8 字形的线为 3 颗 IGSO 卫星的星下点轨迹; 介于 55°N~55°S 之间的三条线为 27 颗 MEO 卫星的星下点轨迹。从轨迹图可以得到 27 颗 MEO 卫星可实现全球覆盖, 5 颗 GEO 卫星基本可实现对中国大陆区域的五重增强覆盖, 3 颗 IGSO 卫星在对中国大陆区域增强的同时也可克服高纬度地区始终是低仰角的问题。

表 1 仿真星座的基本参数

Tab. 1 The basic parameters of simulated constellation

轨道	GEO	IGSO	MEO
长半轴/km	42 164	42 164	27 878
偏心率	0	0	0
轨道倾角/(°)	0	75	55
升交点赤经	158.75°E 180°E 210.5°E 240°E 260°E	218°E 98°E 338°E	0°, 120°E 240°E
近地点角距/(°)	0	0	0
平近点角/(°)	0	0(218°E) 120(98°E) 240(338°E)	0, 40, 80 120, 160, 200 240, 280, 320
卫星数	5	3	27
平面数	1	3	3

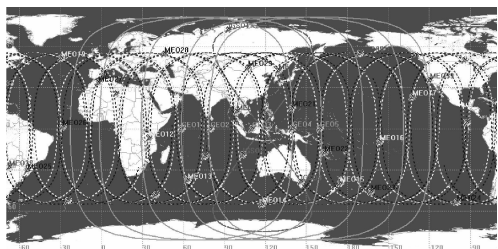


图 1 仿真星座的卫星星下点轨迹图

Fig. 1 Constellation ground track map of simulated satellite

1.2 仿真星座的性能分析

通过对仿真星座所能提供的卫星可见性, 位置精度衰减因子 (position dilution of precision, PDOP), 定位精度 (position accuracy, PACC) 来对其性能进行分析。总的参数条件设置如下: 分析的范围为中国大陆区域; 时间为 24 h; 采样间隔为 300 s; 经纬度格网为 $3^\circ \times 3^\circ$; 卫星的截止高度角为 5° ; 在标准定位服务情况下 MEO 卫星、IGSO 卫星的用户等效距离误差 (user equivalent range error, UERE) 均为 8 m; GEO 卫星的 UERE 为 $11\text{ m}^{[10]}$ 。

1.2.1 卫星可见性分析

根据参数设定的条件得到在中国大陆区域内 24 小时的卫星平均可见数如图 2 所示。从图 2 可以看出, 在仿真区域范围的高纬度地区和低纬度地区卫星的平均可见数为 17 颗, 中纬度的绝大部分地区为 16 颗; 在中纬度的西方向有小部分地区的卫星平均可见数为 15 颗, 这是因为升交点赤经为 260°E 的 GEO 卫星未覆盖该地区; 海南岛周围卫星可见数为 18 颗。图 2 结果表明仿真的 Compass 系统能很好地覆盖中国大陆区域。

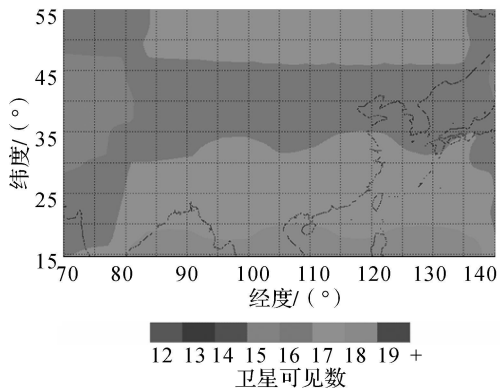


图 2 中国大陆区域内的卫星可见平均数

Fig. 2 The average number of visibility satellites in China mainland

1.2.2 位置精度因子分析

一般导航系统的定位几何可以由精度衰减因子 (dilution of precision, DOP) 值来描述。DOP 定义为用户等效距离误差 UERE 到最终定位误差或定时误差的放大系数, 它反映了卫星的几何位置对定位误差的影响。图 3 表明在中国大陆区域内 24 小时内的 PDOP 平均值在 1.05~ 1.20 之间。这说明仿真的 Compass 系统能在中国大陆区域内提供理想的 PDOP 值。

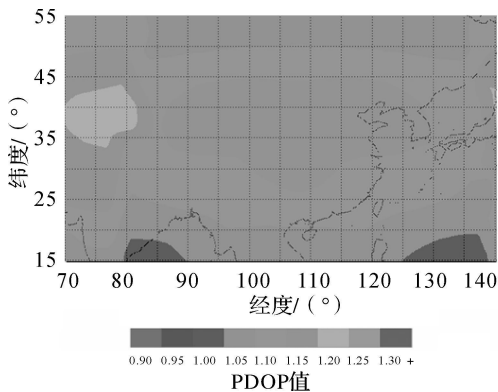


图 3 中国大陆区域内的 PDOP 平均值

Fig. 3 The average value of PDOP in China mainland

1.2.3 定位精度分析

导航系统的定位精度取决于两个方面: 一是观测量的精度即是用户等效距离误差 UERE; 二是所观测到的卫星的 PDOP 值。按照本文参数设置 GEO 卫星、IGSO 卫星、MEO 卫星的 UERE 值, 模拟计算得到中国大陆区域内的定位精度, 如图 4 所示。图 4 结果表明在以上参数值下, Compass 系统在中国大陆区域内可以提供 9~ 10 m 的标准定位精度, 这基本满足预定定位精度 10 m 的要求^[11]。需要指出的是在本文中 UERE 的设置较为保守, 若能改进卫星的 UERE, 那么 Compass 系统将提供更高的定位精度。

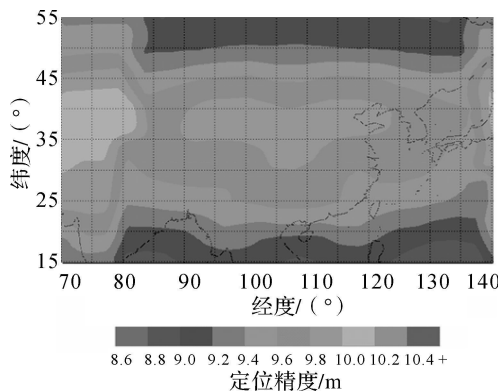


图 4 中国大陆区域内的定位精度平均值

Fig. 4 The average value of PACC in China mainland

2 完备性和 Compass 系统的 XPL 分析

国际民航组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO) 规定对服务于民用航空的导航系统要满足四个方面的性能, 即精度、完备性、可用性和连续性。四个性能同等重要, 但相比而言完备性的实现最为困难。对于安全性能要求较高的用户来说, 完备性为用户最为关注的性能指标。

2.1 完备性

完备性是指导航系统发生任何故障或者误差超限, 无法用于导航和定位时, 系统向用户及时发出报警的能力。一般可以通过告警门限 (alarm limit, AL)、告警时间 (time to alarm, TTA)、完备性风险 (integrity risk, IR) 等参数来对其进行衡量和评估^[2]。不同的飞行阶段对其有不同的要求, 如表 2 所示。

表 2 精密进近阶段导航性能要求^[4] (ICAO/SARPS2004)

Tab. 2 Required navigation performance for approach with vertical guidance

飞行阶段	完备性 (每处理一次)	告警门限/m	告警时间/s	连续性 (每 15 s)	可用性
垂直引导进近 iv (APV-iv)	$(1 \sim 2) \times 10^{-7}$	H: 40 V: 50	10	$(1 \sim 8) \times 10^{-6}$	0.99~0.999
垂直引导进近 (APV-Ⓢ)	$(1 \sim 2) \times 10^{-7}$	H: 40 V: 20	6	$(1 \sim 8) \times 10^{-6}$	0.99~0.999
精密进近 iv (Cat-iv)	$(1 \sim 2) \times 10^{-7}$	H: 40 V: 12	6	$(1 \sim 8) \times 10^{-6}$	0.99~0.999

Compass 系统中包含 5 颗 GEO 卫星, 其组成结构与空基增强系统 (space-based augmentation system, SBAS) 相类似, 基于此本文采用 SBAS 系统的完备性算法来模拟计算 Compass 系统在中国大陆区域内的完备性, 并进行分析。

SBAS 系统完备性算法中用户保护水平 (XPL) 是某一时刻与完备性相关的参数值, 包含水平保护水平 (horizontal protection level, HPL) 和垂直保护水平 (vertical protection level, VPL) 两个方面。将得到的 XPL 值与表 2 中给出的不同飞行阶段的 AL 值进行比较, 若其中任意一项超限, 则说明系统不满足该飞行阶段的完备性要求, 系统会向用户报警。因此可以通过 XPL 值来对完备性进行分析, XPL 的计算公式为^[1]

$$HPL = k_h \sigma_h \quad (1)$$

$$VPL = k_v \sigma_v \quad (2)$$

式中, k_h 表示水平方向与给定的 P_{md} (P_{md} 表示误检的概率) 对应的置信分位数^[1]; 同样 k_v 表示垂直方向对应 P_{md} 的置信分位数; σ_h 表示定位误差水平方向的中误差, σ_v 表示定位误差垂直方向的中误差, σ_h 、 σ_v 详细的计算见式 (3)、式 (4)。按照 APV-iv、APV-Ⓢ Cat-iv 飞行阶段的完备性要求, $P_{mdHPL} = 2 \times 10^{-9}$, $P_{mdVPL} = 1 \times 10^{-7}$, 因此可以得到 APV-iv、APV-Ⓢ Cat-iv 飞行阶段与之对应的置信分位数: $k_h = 6.0$, $k_v = 5.33$ ^[1]。

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x^2 - \sigma_y^2}{2}\right)^2 + \sigma_{xy}^2}} \quad (3)$$

$$\sigma_x = \sqrt{(\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})_{11}^{-1}} \quad (4)$$

式中, $\sigma_x^2 = (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})_{11}^{-1}$; $\sigma_y^2 = (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})_{22}^{-1}$; $\sigma_{xy} = (\mathbf{G}^T \mathbf{W} \mathbf{G})_{12}^{-1}$; \mathbf{G} 为卫星与用户之间的观测矩阵; \mathbf{W} 为权矩阵。 \mathbf{G} 、 \mathbf{W} 可通过以下公式得到

$$\mathbf{G}_i = \begin{bmatrix} -\cos E_i \cos A_i & -\cos E_i \sin A_i \\ -\sin E_i & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{W}^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_i^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_i^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_i^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (5) 中, E_i 表示卫星的高度角; A_i 表示卫星的方位角; 式 (6) 中 σ_i^2 为观测值方差。对于单频用户来讲 σ_i^2 的计算公式为^[1]

$$\sigma_i^2 = \sigma_{\text{flr}}^2 + \sigma_{\text{UIRE}}^2 + \sigma_{\text{air}}^2 + \sigma_{\text{trop}}^2 \quad (7)$$

式中, σ_{flr} 表示快速长周期改正中误差; σ_{UIRE} 为用户电离层延迟改正中误差; σ_{air} 为接收机和多路径效应改正中误差; σ_{trop} 为对流层延迟改正中误差。

2.1.1 σ_{flr} 的计算

$$\sigma_{\text{flr}}^2 = \begin{cases} (\sigma_{\text{UDRE}} \times \delta \sigma_{\text{UDRE}} + \varepsilon_c + \varepsilon_{\text{re}} + \varepsilon_{\text{tc}} + \varepsilon_{\text{tr}})^2, \\ \text{RSS}_{\text{UDRE}} = 0 \\ (\sigma_{\text{UDRE}} \times \delta \sigma_{\text{UDRE}})^2 + \varepsilon_{\text{tc}} + \varepsilon_{\text{ac}} + \varepsilon_{\text{lc}} + \varepsilon_{\text{er}}, \\ \text{RSS}_{\text{UDRE}} = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, σ_{UDRE} 为用户差分伪距中误差, 可从 SBAS 广播的消息 2-5, 6, 24 (MT2-5, 6, 24) 中得到^[1]; $\delta \sigma_{\text{UDRE}}$ 为 σ_{UDRE} 的变化因子, 可从 MT27 或者 MT28 中得到 (MT27, MT28 中的 $\delta \sigma_{\text{UDRE}}$ 只能任选其一, 不能同时选取), 若 MT27 与 MT28 均未提供该值, 则认为 $\delta \sigma_{\text{UDRE}} = 1$; ε_c 是关于快速改正项的衰减因子, 可从 MT-7 中得到; ε_{re} 是关于伪距改正速率的衰减因子, 可从 MT-10 中得到; ε_{tc}

是关于 GEO 导航信息数据的衰减因子, 可从 MT-10 中得到; ϵ_{er} 为非精密进近阶段的衰减因子, 可从 MT-10 中得到; RS_{SUDRE} 是用户差分伪距误差和的平方根标记, 可从 MT-10 中得到。为方便定量分析, 假定 $RS_{SUDRE} = 0$, $\delta\alpha_{UDRE} = 1$, 不考虑 ϵ_{ic} 、 ϵ_{rc} 、 ϵ_{ac} 、 ϵ_{er} 的影响, 则得到

$$\sigma_{i, fl}^2 = \sigma_{UDRE}^2 \quad (9)$$

2.1.2 σ_{UIVE} 的计算

$$\sigma_{UIVE}^2 = F_{PP}^2 \sigma_{UIVE}^2 \quad (10)$$

式中, F_{PP} 为倾斜因子; σ_{UIVE} 为用户电离层垂直方向延迟改正中误差。 F_{PP} 的计算公式为

$$F_{PP} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos E_i}{R_e + h_1} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

式中, R_e 为地球平均半径; E_i 为卫星高度角; h_1 为电离层的参考高度。根据电离层延迟格网修正法, σ_{UIVE} 的计算可采用两种内插法^[11]:

矩形内插法

$$\sigma_{UIVE}^2(\Phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^4 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \sigma_{i, ionogr1}^2 \quad (12)$$

三角形内插法

$$\sigma_{UIVE}^2(\Phi_{pp}, \lambda_{pp}) = \sum_{i=1}^3 W_i(x_{pp}, y_{pp}) \sigma_{i, ionogr1}^2 \quad (13)$$

式中

$$\sigma_{i, ionogr1}^2 = \begin{cases} (\sigma_{UIVE} + \epsilon_{iono})^2, & RSS_{iono} = 0 \\ \sigma_{UIVE} + \epsilon_{iono}, & RSS_{iono} = 1 \end{cases} \quad (14)$$

式中, σ_{UIVE} 为电离层格网点垂直方向改正中误差; ϵ_{iono} 为电离层延迟改正衰减因子; RS_{iono} 是电离层延迟改正和的平方根标记, 可从 MT-10 中得到。

ϵ_{iono} 计算公式为

$$\epsilon_{iono} = C_{iono-step} \left| \frac{t - t_{iono}}{I_{iono}} \right| + C_{iono-ramp}(t - t_{iono}) \quad (15)$$

式中, $C_{iono-step}$ 为电离层格网点延迟更新误差限值, 可从 MT-10 中得到; $C_{iono-ramp}$ 为电离层格网点延迟变化率, 可从 MT-10 中得到; t 为当前时间; t_{iono} 为 MT26 中第一字段播发的时间; I_{iono} 为电离层延迟改正 MT26 更新的时间间隔, 可从 MT-10 中得到; $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示取小于变量的最大正整数的函数。为了定量分析, 假定 $RS_{iono} = 0$, $\epsilon_{iono} = 0$, 则得到

$$\sigma_{i, ionogr1}^2 = \sigma_{UIVE}^2 \quad (16)$$

2.1.3 σ_{air} 的计算

$$\sigma_{air}^2 = [0.074(1 + 0.18e^{(-E_i/27.7)})^2] \quad (17)$$

式中, E_i 为卫星的高度角。

2.1.4 σ_{trop} 的计算

$$\sigma_{i, trop}^2 = (0.12m(E_i))^2 \quad (18)$$

$$m(E_i) = \frac{1.001}{\sqrt{0.002001 + \sin^2 E_i}} \quad (19)$$

式中, E_i 为卫星的高度角。

2.2 系统的 XPL 分析

假定系统的各个部分的可靠性为百分之百, 参考 WAAS 系统、EGNOS 系统提供的数据信息^[12-13], 设定 MEO 卫星和 IGSO 卫星的用户差分伪距中误差 $\sigma_{UDRE} = 3.75$ m, 5 颗 GEO 卫星的 $\sigma_{UDRE} = 15$ m; 电离层格网点和用户区域范围如图 5 所示; 电离层格网点垂直方向延迟改正中误差 $\sigma_{UIVE} = 4.5$ m。利用相关软件模拟 Compass 系统的卫星轨道, 计算的是时间间隔为 300 s、地面经纬度间隔为 $3^\circ \times 3^\circ$ 格网点处的 XPL 值。观测值方差 σ^2 的计算公式参见 2.1 节。得到一天 24 小时格网点处单频 (1575.420 MHz) 用户可用性为 99.9% 的 XPL 值, 如图 6、图 7 所示。

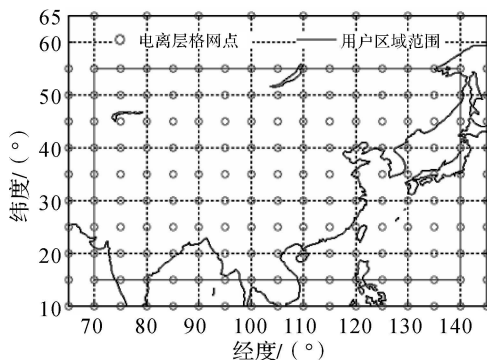


图 5 电离层格网点和用户区域范围图

Fig. 5 The ionospheric grid point and user region

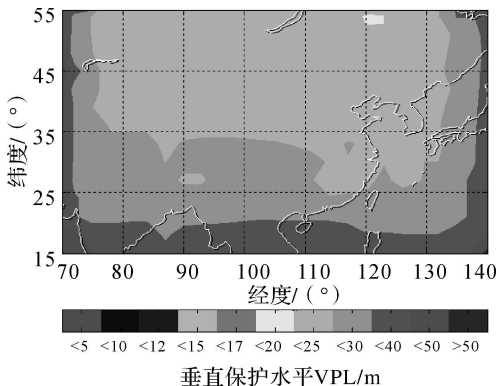


图 6 中国大陆区域内的 VPL 值

Fig. 6 The VPL value in China mainland

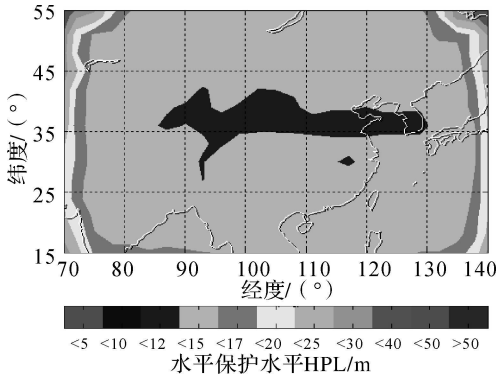


图7 中国大陆区域内的HPL值

Fig.7 The HPL value in China mainland

图6表明在中国大陆区域内Compass系统向单频用户提供的VPL值除海南岛周围大于30 m (小于40 m)外其余部分均小于30 m,在区域范围内北纬35°以上的地区小于25 m。从图7可以得到Compass系统向中国大陆区域内的单频用户提供的HPL值均小于17 m,中纬度部分地区优于12 m。根据表2可以看出区域内计算得到的H/VPL值均小于垂直引导进近 $i\dot{y}$ APV- $i\dot{y}$ 飞行阶段的告警门限,这表明Compass系统在中国大陆区域内能向单频(1 575.420 MHz)用户提供APV- $i\dot{y}$ 飞行阶段的完备性导航,这与WAAS系统和EGNOS系统所提供的完备性性能相当^[3,12,13]。

3 结论

初步分析表明由5颗GEO卫星、3颗IGSO卫星、27颗MEO卫星构成的Compass系统在中国大陆区域内能提供很好的卫星可见性、PDOP值和定位精度,这些指标也基本满足预定的性能要求。根据SBAS系统完备性算法,在中国大陆区域内Compass系统能向单频(1 575.420 MHz)用户提供APV- $i\dot{y}$ 飞行阶段的完备性导航,这与WAAS系统与EGNOS系统所提供的完备性性能相当。在计算XPL值时,其限制条件设置得较为乐观,如何分析这些限制条件对Compass系统相关性指标的影响将是下一步研究的重点。

参考文献:

[1] RTCA SG-159. Minimum Operational Performance Standard for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment[S]. Washington DC: RTCA, 2006.
 [2] SHAU S J. Aircraft Landing Using a Modernized Global Positioning System and the Wide Area Augmentation System[D]. Stanford: Stanford University, 2003.

[3] TODD W, JUAN B, PER E. Future Augmented Coverage Improvement for Dual-Frequency SBAS [J]. GPS World, 2010(5): 36-41.
 [4] WU Yun. Research on GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (吴云. GNSS接收机自主完备性监测研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009.)
 [5] CHEN Jinping. Research of GPS Integrity Augmentation [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2001. (陈金平. GPS完善性增强研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2001.)
 [6] DAI Shaowu, MA Changli, LI Yu, et al. Design of Constellation Based on Beidou II[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(1): 1-5. (戴邵武, 马长里, 李宇, 等. 基于“北斗二代”的卫星星座设计[J]. 海军航空工程学报, 2010, 25(1): 1-5.)
 [7] LIU Genyou, HAO Xiaoguang, CHEN Xiaofeng, et al. On Constellation Scheme of 2nd Generation of China Satellite Navigation System for Northward Extending Coverage Range [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 23(5): 115-118. (刘根友, 郝晓光, 陈晓峰, 等. 对我国二代卫星导航系统覆盖范围向北扩展星座方案的探讨[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(5): 115-118.)
 [8] ZENG Qinghua, LIU Jianye, LIANG Yuqin, et al. Multi-constellation Integrated Navigation Based on Beidou/GPS/GLONASS/GALILEO [C] // Chinese Satellite Navigation Academic Conference. Beijing: [s.n.], 2010. (曾庆化, 刘建业, 梁玉琴, 等. 北斗/GPS/GLONASS/GALILEO多星座组合导航研究[C] // 第一届中国卫星导航学术年会. 北京: [s.n.], 2010.)
 [9] YANG Ying, WANG Qi. STK in the Application of Computer Simulations[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005. (杨颖, 王琦. STK在计算机仿真中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.)
 [10] ELLIOTT D K. Understanding GPS Principles and Applications[M]. Boston: Artech House, 1996.
 [11] Chinese Satellite Navigation Systems Management Office. Compass Navigation Satellite System[EB/OL]. [2010-11-18]. <http://www.beidou.gov.cn/index.html>.
 [12] WILLIAM J H. Technical Center WAAS Test Team[EB/OL]. [2010-11-18]. <http://www.nstb.tc.faa.gov/>.
 [13] European Space Agency. EGNOS Message Server[EB/OL]. [2010-11-18]. <http://www.egnos-pro.esa.int/em/s/index.html>.

(责任编辑: 宋启凡)

收稿日期: 2011-01-17

修回日期: 2011-03-20

第一作者简介: 杨鑫春(1987—), 男, 硕士生, 现从事卫星导航系统的完备性研究。

First author: YANG Xinchun(1987—), male, postgraduate, majors in satellite navigation systems' integrity.

E-mail: Compass2020@163.com