



论文

基于北斗的卫星精密测速及全球重力场精密测量[†]王正博^{①②}, 赵路^{①④}, 王力军^{①②③*}

① 中国计量科学研究院-清华大学精密测量联合实验室, 北京 100084;

② 清华大学精密仪器系, 北京 100084;

③ 清华大学物理系, 北京 100084;

④ 北京航空航天大学物理学院, 北京 100191

*联系人, E-mail: lwan@mail.tsinghua.edu.cn

†王力军编委供稿

收稿日期: 2015-03-03; 接受日期: 2015-03-06; 网络出版日期: 2015-04-03

摘要 本文讨论了利用北斗系统星间链路进行航天器高精度测速的实现方法和应用前景. 根据现有技术条件, 基于对北斗导航信号载波多普勒频移的精确测量, 可实现将航天器的速度测定精确到 1 mm/s 以内. 利用高精度测速可以对全球重力势能分布、大地水准面高度、重力加速度及其梯度做三维扫描, 并有望提高测地卫星对全球重力加速度异常的测量精度.

关键词 北斗, 多普勒效应, 相对论, 大地测量, 大地水准面, 重力异常, 精密测量

PACS: 91.10.Op, 91.10.Fc, 42.79.Qx, 04.20.-q, 03.30.+p, 91.10.-v, 91.10.Ws, 47.80.Cb

doi: 10.1360/SSPMA2015-00093

“北斗”导航系统历时多年自主建设, 现已正式提供区域性导航、定位和授时服务. 根据官方公开资料^[1], 现阶段北斗定位精度优于 10 m, 授时精度优于 20 ns, 测速精度为每秒 0.2 m. 北斗在国民生产生活各领域的应用研究成果也不断涌现, 包括导航芯片、大地测量仪器及民用导航设备等. 但是, 围绕北斗“如何建”与“如何用”仍存在大量的基础科学与工程技术问题等待科研工作者研究.

在文献[2]中, 我们讨论了将来在三代北斗中如何通过地星锁相链路和星间链路实现高精度的频率传输和时间同步, 从而有望将定位精度提高至 3 cm 的水平. 本文中我们在此基础上, 进一步讨论利用北斗导航信号载频的多普勒频移实现航天器的超高精

度测速, 并指出这一技术未来在卫星大地测量中的巨大应用前景.

利用 GPS 卫星导航系统进行多普勒测速已在多篇文献中有理论和实验研究. 文献[3]讨论了 GPS 相对测量情况的多普勒测速数学模型, 实现了 mm/s 量级的测速精度. 文献[4]则利用单 GPS 接收机通过数据后处理实现了精度为 2–4 mm/s 的测量. 在国内, 文献[5]利用北斗系统进行了测速研究, 对比了包括多普勒测速的多种方法. 在理论研究方面, GPS 的相关理论已非常细致完备^[6–9]. 反观北斗系统, 包含相对论效应的测速理论和实验研究目前仍不多见.

本文首先对基于北斗系统进行多普勒测速的过程进行理论分析, 计算其中的狭义和广义相对论效

引用格式: 王正博, 赵路, 王力军. 基于北斗的卫星精密测速及全球重力场精密测量. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 059501
Wang Z B, Zhao L, Wang L J. Precision satellite velocity determination using Beidou with applications in satellite-based geodesy (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 059501, doi: 10.1360/SSPMA2015-00093

应的修正. 然后, 基于现阶段的技术指标, 我们对测速精度进行了估计. 最后, 我们讨论了北斗多普勒测速在卫星重力场测量方面的重要应用. 基于现有技术水平数据估算得出, 基于 1 mm/s 的高精度测速, 有望将卫星对重力异常的测量精度提高至 0.26 mGal. 这一精度比搭载高精度重力梯度仪的 GOCE 卫星的测量精度还高, 若能实现, 将具有重大的科学价值和现实意义.

1 卫星精密测速

1.1 多普勒效应

基于北斗卫星导航系统实现航天器的精密测速可以通过航天器接收导航信号并测定载波的多普勒频移实现. 目前北斗测速的文献中, 大都只考虑了经典多普勒效应:

$$\frac{f_R}{f_S} = \frac{1 - \mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n} / c}{1 - \mathbf{v}_S \cdot \mathbf{n} / c}. \quad (1)$$

式中下标 S 代表信号发射端, 也就是导航卫星, 下标 R 代表接收端的待测速航天器(下文简称航天器), $\mathbf{n} = \mathbf{R} / |\mathbf{R}|$ 为信号传播方向上的单位矢量, 这里 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_R(t_R) - \mathbf{R}_S(t_S)$ 为发射端至接收端的距离矢量, 且需考虑信号传播延时.

本文所考虑的情况是导航卫星与航天器同时高速运动的情形, 因而需要考虑狭义相对论效应. 再考虑到地球的引力势所带来的广义相对论效应后, 多普勒效应的表达式为

$$\frac{f_R}{f_S} = \frac{1 - \mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n} / c}{1 - \mathbf{v}_S \cdot \mathbf{n} / c} \cdot \frac{\gamma_R}{\gamma_S} \left(1 + \frac{\Phi_S - \Phi_R}{c^2} \right). \quad (2)$$

$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$ 为相对论因子, 与二者在惯性系中的运动速度有关. Φ_S 和 Φ_R 分别是发射信号的卫星和航天器的接收装置所处位置的引力势

$$\Phi = -\frac{GM_E}{R} \left[1 - J_2 \left(\frac{a_E}{R} \right)^2 P_2(\cos \theta) \right].$$

其中 GM_E 为万有引力常数与地球质量的乘积, WGS84 (the World Geodetic System 1984) 推荐值为 $(3986004.418 \pm 0.008) \times 10^8 \text{ m}^3/\text{s}^2$, $J_2 = 1.0826300 \times 10^{-3}$ 是地球重力势四极矩, $a_E = 6.3781370 \times 10^6 \text{ m}$ 为地球赤道半径, P_2 为二阶勒让德函数.

由于 $\Phi / c^2 \sim 10^{-10}$, $1 - \Phi / c^2 \approx 1 / (1 + \Phi / c^2)$, 我

们可将式(2)写成

$$\frac{f'_R}{f'_S} = \frac{1 - \mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n} / c}{1 - \mathbf{v}_S \cdot \mathbf{n} / c}, \quad (3)$$

对于下标 R 和 S 均有: $f' = f(1 + \Phi / c^2) / \gamma$. 可以看出, 多普勒效应中的相对论修正实际来源于相对论时钟修正, 对于这些修正, 我们在文献[2]中已有详尽分析, 此处不再赘述. GEO/IGSO 与 MEO 相对地面固定钟的相对论频率修正分别为 5.39150×10^{-10} 和 4.58486×10^{-10} .

对于接收端 R, 即对航天器的相对论效应的分析过程也是类似的, 所得相对论修正具有同样的数量级.

我们将在下一节给出多普勒微分形式的公式后, 给出基于相对论频移的速度测量值的修正.

1.2 测速精度与修正分析

由于待测航天器处于大气层边缘或以外, 大气及电离层的扰动带来的影响远小于其对处于地面的接收机的影响, 可以忽略不计. 另外, 多径干扰也不存在. 由于相对论修正都是小量, 因此在位置速度误差等引起的误差中, 相对论修正的误差为二阶小量, 在误差分析中我们只需要考虑经典多普勒效应. 将式(1)取全微分并整理后有

$$\delta \mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n} = (c - \mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n}) \delta f_S / f_S - (c - \mathbf{v}_S \cdot \mathbf{n}) \delta f_R / f_S + (f_R / f_S \mathbf{v}_S - \mathbf{v}_R) \cdot \delta \mathbf{n} + f_R / f_S \delta \mathbf{v}_S \cdot \mathbf{n}.$$

进一步忽略小量, 使 $f_R / f_S \sim 1$, $c - \mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n} \sim c$ 有

$$\delta \mathbf{v}_R \cdot \mathbf{n} = c \delta f_S / f_S - c \delta f_R / f_S + (\mathbf{v}_S - \mathbf{v}_R) \cdot \delta \mathbf{n} + \delta \mathbf{v}_S \cdot \mathbf{n}. \quad (4)$$

下面将基于式(4)对速度测量误差进行分析. 等式右侧四项是造成误差的因素, 包括: 北斗卫星星载钟频偏 δf_S 和航天器时钟的频偏 δf_R 、北斗卫星和航天器的位置误差, 体现在信号传播方向单位矢量的改变上 $\delta \mathbf{n}$, 以及北斗卫星的速度误差 $\delta \mathbf{v}_S$.

不难看出, 式(4)形式与卫星定位基本方程有相似之处^[10], 二者系数矩阵是相同的. 也就是说, 多普勒测速精度受到卫星几何分布的影响与定位过程是相同的, 也可以用 DOP(Dilution of Precision)等来描述(由于不含时间维度, 实际上是 PDOP).

1.2.1 测频误差

可以测量的最小频移 δf 与测量时间 τ 和测量系统

的相位分辨率 $\delta\varphi$ 在满足如下关系:

$$2\pi\delta f \cdot \tau \geq \delta\varphi \quad (5)$$

时才可以实现有效分辨. 此外, 测量的准确度还受参考频率源的准确度及稳定性制约(二者皆可用星载钟的短期稳定性代替), 星载钟的中短期稳定度可用阿仑方差表示为 $\delta f / f = \sigma(1s)\tau^{-1/2}$, 与(5)联立可得受限于时钟的最短测量时间

$$\tau_{\min} = \left(\frac{\delta\varphi}{2\pi f \cdot \sigma(1s)} \right)^2. \quad (6)$$

测量时间小于 τ_{\min} 时, 测频精度取决于测频系统的相位分辨能力; 测量时间大于 τ_{\min} 后, 测频精度将受限于星载钟. 进一步, 若要达到 δv 的测速精度, 测频精度需要达到 $\delta f / f = \delta v / c$. 通过这些关系, 可以获得测速精度与所需测量时间的关系为 $(\delta v)^2 \cdot \tau = \text{const.}$. 即测速精度提高一倍, 采样时间则需要延长 4 倍.

考虑实际参数, 对于星载铷钟, 在现阶段技术水平下其短期稳定度可以达到 $2 \times 10^{-12} \tau^{-1/2}$ (http://www.excelitas.com/Downloads/DTS_Frequency_Standards_RAFS.pdf), 相位分辨率 $\delta\varphi \approx 1 \times 10^{-5} \text{ rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的水平是可以实现的, 载频取 $f \sim 1.2 \text{ GHz}$. 要达到 1 mm/s 的测速精度, 所需测量时间为 0.36 s .

航天器的时钟频率误差带来的测速误差的分析与星载钟相同, 此处不再赘述.

1.2.2 星历误差

星历精度会决定北斗卫星的位置和速度误差. 若采用预报星历, MEO 和 IGSO 轨道精度可达 $10\text{--}20 \text{ cm}$ ^[11], GEO 轨道精度较差, 但采用合适的模型参数可以达到 2 m 以内. 经过后期处理后的星历, 精度可进一步提高, 但是不再具有实时性.

北斗卫星的位置误差将导致信号传播方向的偏差, 具体表现为单位矢量 \boldsymbol{n} 的指向角度误差:

$$\delta\theta_n = |\delta R_s| / |R|. \quad (7)$$

因此, 卫星的星历误差带来的测速误差为

$$\begin{aligned} |\delta v_r| &\leq |\boldsymbol{v}_s - \boldsymbol{v}_r| \delta\theta_n \leq (|\boldsymbol{v}_s| + |\boldsymbol{v}_r|) \delta\theta_n \\ &< \frac{(|\boldsymbol{v}_s| + |\boldsymbol{v}_r|) |\delta R_s|}{\left| |R_s| - |R_r| \right|}. \end{aligned} \quad (8)$$

假设北斗卫星与航天器的相对几何构型良好, PDOP ~ 1 . 由于矢量内积的存在, 我们在此处给出的

为误差上限. 假设待测速卫星对北斗中的中轨道卫星(MEO)和同步轨道卫星(GEO)分别考虑, 其参数参考表 1.

因此, 可得对于低轨航天器(轨道高度 $\sim 400 \text{ km}$, 运动速度 $\sim 7.7 \text{ km/s}$), MEO, IGSO 和 GEO 卫星星历误差引起的测速误差分别为 $0.1, 0.06$ 和 0.6 mm/s . 此处的估算误差上限在航天器轨道与导航卫星轨道半径接近时将出现发散, 精确的误差计算需要具体考虑星座的构型.

航天器的定位误差带来的测速误差的分析过程与北斗卫星相同, 不再赘述.

下面分析导航卫星速度误差引起的测速误差, 根据圆形轨道卫星速度与轨道高度的关系

$$v = \sqrt{\frac{GM_E}{R}}, \quad (9)$$

有

$$\delta v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{GM_E}{R^3}} \delta R. \quad (10)$$

考虑中轨道卫星(MEO), 当轨道误差 δR 取预报星历误差 20 cm 时, 速度误差为 0.015 mm/s . 假设在 PDOP ~ 1 的情况下, 对航天器测速带来的误差也在 0.015 mm/s , 完全可以忽略.

1.2.3 相对论修正

如前所述, GEO/IGSO 与 MEO 相对地面固定钟的相对论修正分别为 5.39150×10^{-10} 和 4.58486×10^{-10} , 相应的速度修正分别为 162 和 138 mm/s , 可见相对论效应在卫星测速过程中具有不可忽略的影响. 另一方面, 卫星测速精度比相对论修正小两个数量级以上, 因此有望作为研究及实验验证相对论效应的新方法.

2 卫星精密测速用于大地精密测量

目前, 国外已发射多颗勘测卫星进行了地球重力异常的测量和大地水准面的测定, 包括 CHAMP (2000 年), GRACE(2002 年)和 GOCE(2009 年), 各自

表 1 北斗卫星主要参数

Table 1 Main parameters of Beidou satellites

轨道参数	MEO	GEO/IGSO
轨道半长轴 km	27521	42164
平均速度 km/s	3.805	3.075

公开的主要精度汇总于表 1. 从原理上分析, CHAMP 通过测定卫星在重力场异常引起的卫星轨道变化反推异常数值; GRACE 通过两颗卫星相跟随的方法, 测定轨道变化的差分, 反推重力异常; GOCE 则更为直接, 直接使用星载重力梯度仪测定重力梯度, 从而确定重力势的高阶分量. 目前, 利用重力梯度仪的 GOCE 可实现最高的测量精度, 为 1 mGal(http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Facts_and_figures).

2.1 测速法提高重力测量精度

根据本文的分析, 利用北斗系统可以实现对航天器的高精度测速, 如果结合高精度的定位, 基于基本的能量守恒定律, 可以实现更高精度的全球重力势测量. 下面我们讨论这一方案并估算其测量精度.

根据能量守恒, 单位质量的勘测卫星在地心惯性系中运动的动能 T 和势能 U 满足

$$T + U = -\frac{GM_E}{2a}. \quad (11)$$

其中 $T = v^2/2$, v 为卫星速度. U 为单位质量在地球重力场内的势能, a 为卫星轨道半长轴. 各种非保守力, 如太阳光压、空气阻力等, 可通过星载加速度计测量, 通过微喷射器抵消或后期计算消除; 因日月引潮力变化而导致的地球周边重力场势能变化可以通过精确的理论模型加以修正, 本文中暂不予考虑. 值得指出, 当除去各类非保守力的影响和日月引力势能后, 式(11)相当精确地描述了测地卫星的轨道运动. 广义相对论引起的轨道变化等在地球附近可以忽略不计.

根据式(11)并通过卫星精密测轨和测速即可得到全球重力势场分布. 如果采用较为保守的半长轴测定精度 $\delta a = 0.5$ m, 则对于低轨卫星总能量测量的相对精度为 $\delta a/a = 7 \times 10^{-8}$. 重力场测量的相对精度因而主要由测速精度决定 $\delta U/U = 2.6 \times 10^{-7}$. 势能绝对测量的精度为 $\delta U \sim 7.7 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

作为对重力测量精度的估计, 可以将卫星所处

高度 h 处(h 为卫星距大地水准面高度)的重力势能写为 $U(\mathbf{r}, h) = U_0 + g(\mathbf{r})h$, 其中, $U_0 = -GM_E/R_E$ 为大地水准面势能, $g(\mathbf{r})$ 为地面经纬度 \mathbf{r} 处的重力加速度在 h 高度内的测量平均值. 进而, 求全微分可得

$$v dv + h dg + g dh = 0. \quad (12)$$

可见, 重力异常的测量精度取决于对于勘测卫星的轨道高度与速度的测量精度:

$$|dg| = |v dv + g dh|/h. \quad (13)$$

由于重力异常在高轨道存在较大衰减, 难以精确测量, 因此测地卫星多采用低轨道, 此处 h 取 300 km. 简单计算可得, 在此轨道高度上卫星平均速度为 $v = 7.7$ km/s.

g 为测地卫星轨道高度处的重力加速度, 相比在地面上的重力加速度有一定衰减

$$g = g_0 \left(\frac{R_E}{R_E + h} \right)^2 = 8.95 \text{ m/s}^2.$$

根据前面的分析, 基于北斗系统卫星测速精度 $dv = 1$ mm/s 是可以达到的, 定位精度 dh 只要满足 $g dh \ll v dv$, 即 $dh \ll 0.85$ m, 则重力测量精度主要取决于测速精度. 可得 $|dg| \approx 2.6 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2 = 0.26 \text{ mGal}$. 此结果不仅比应用高低卫星跟踪方法(hl-SST)的 CHAMP 的精度有很大提高, 且比目前分辨率最高的 GOCE 还可提高 3 倍. 从 1.2 节分析得到的测量时间即重力测量时的采样间隔, 乘以卫星速度即换算成空间分辨率 λ , 可以得到 $(\delta v)^2 \cdot \lambda = \text{const.}$, 即测速精度提高一倍, 空间分辨率将降低为 1/4. 0.26 mGal 的测量精度对应的空间分辨率为 $\lambda = 7.7 \text{ km/s} \times 0.36 \text{ s} = 2.8 \text{ km}$, 较其他方法有很大幅度提高.

从以上分析不难发现, 相对于定位误差, 测速误差对重力测量精度的影响更为显著, 因此直接测速并大幅度提高其精度有着重大意义.

卫星测地不像航天器发射具有严格的实时性要求, 若对测地卫星接收到的原始导航信号进行全面记录, 然后利用后处理的精密星历不仅可将测量精度进一步提升, 也便于实现不同精度和不同尺度上数据处理的需要.

由于北斗系统的星间链路尚未建设, “天链一号”数据中继卫星可以用于初步原理验证性实验. “天链”系统包含三颗地球同步轨道卫星, 可以实现全球范围对地和对低轨卫星的数据传输. 对其精密定轨, 并

表 2 各国测地卫星项目主要信息汇总^[12]

Table 2 Main information of geodesy satellites [12]

参数	CHAMP	GRACE	GOCE	GRACE Follow On
所属国家	德国	美国、德国	欧盟	美国
发射时间	2000	2003	2008	2013
测量模式	SST2HL	SST2HL/LL	SST2HL/SGG	SST2HL/LL
空间分辨	285 km	166 km	80 km	55 km

转发地面站发出的高精度频率信号, 可实现卫星速度的精密测量, 实现初步的验证性实验.

2.2 测地卫星的轨道选择

测地卫星通常轨道高度较低, 可以实现高速近地扫描. 在此基础上, 若将其设计为具有一定偏心率的轨道, 则可以实现地球附近一定厚度球壳的三维扫描, 不仅可以获得重力势能和加速度分布, 也可以进一步得到各方向上的重力加速度梯度.

我们对轨道参数如下表所示的近地轨道卫星进行了数值仿真^[13], 其参数如表 3 所示.

可以计算出其轨道进动除了将导致升交点赤经的漂移外还会实现近地点幅角的漂移, 从而实现不同纬度上不同高度的扫描. 根据数值计算, 我们得

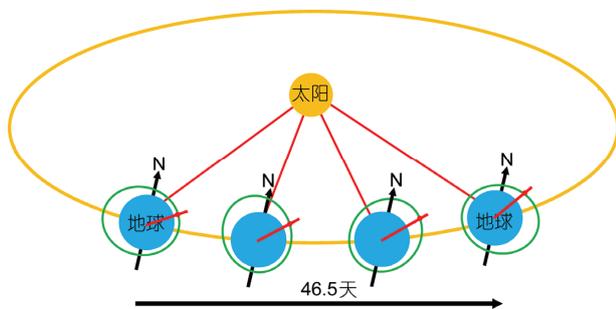


图 1 (网络版彩图)测地卫星的轨道进动效果示意图. 利用轨道近地点的进动可实现卫星在全球任一位置的高度变化
Figure 1 (Color online) The schematic plot of geodesy satellite orbit procession. Satellite height scan above any position on earth can be realized utilizing orbit procession.

表 3 近地轨道卫星仿真参数

Table 3 Satellite orbital elements for simulation

参数	数值
半长轴	6671 km
偏心率	0.0075
近地点幅角	155.00°
升交点赤经	90.00°
轨道倾角	97.65°

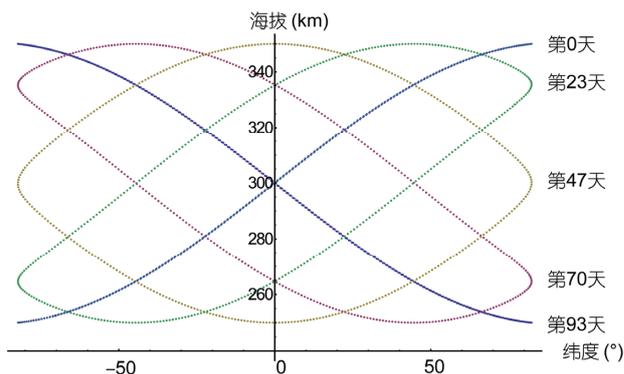


图 2 (网络版彩图)具有表 3 轨道参数的测地卫星扫过的纬度及高度范围

Figure 2 (Color online) Coverage of geodesy satellite with orbital elements in Table 3.

到这样一颗卫星在不同时间扫过各纬度时的高度将呈周期性变化, 变化周期为 93 d, 变化过程如图 2 所示. 可见, 仅这样一颗卫星即可完成从 250 km 到 350 km 高度的全球扫描, 这样就可以获得地球附近重力势能的三维分布.

3 结论

本文讨论了利用北斗卫星导航系统对航天器进行精密测速中的问题, 包括相对论修正和测量误差分析, 并对基于北斗的精密速度测量及其在卫星测地领域的重要应用做了初步分析. 以 1 mm/s 的测速精度, 可望对全球重力加速度异常达到很高的绝对测量精度, 若能实现, 将有望使我国在卫星测地领域走在世界前列. 另外, 基于北斗的精密测速还有望在航天器自动发射及轨道控制中得到应用, 具体内容我们将在后续文章中加以讨论.

北斗卫星导航系统的自主建设表明了我国综合国力, 特别是科技实力的全面提高, 对国家安全及民用领域意义重大; 另一方面北斗也是一个巨大的应用宝藏与创新平台, 充分发掘其潜力, 可望促进我国的科技自主创新水平上升一个新的层次.

参考文献

- 1 冉承其. 北斗卫星导航系统运行与发展. 卫星应用, 2014, 8: 7-10
- 2 Wang Z B, Zhao L, Wang S G, et al. COMPASS time synchronization and dissemination-Toward centimetre positioning accuracy. Sci China-Phys Mech Astron, 2014, 57: 1788-1804

- 3 He H, Yang Y, Sun Z, et al. Mathematic model and error analyses for velocity determination using GPS Doppler measurements. *J Inst Surv Mapp*, 2003, 20: 79–82
- 4 van Graas F, Soloviev A. Precise velocity estimation using a stand-alone GPS receiver. *Navigation*, 2004, 51: 283–292
- 5 Li Z B, Cai C L, Wang L J, et al. Comparison and analysis of velocity determination based on BDS (in Chinese). *J Naviga Posi*, 2014, 2: 13–25 [李志斌, 蔡成林, 王利杰, 等. 基于北斗系统测速方法的对比分析. *导航定位学报*, 2014, 2: 13–25]
- 6 Ashby N. Relativity and the global positioning system. *Phys Tod*, 2002, 55: 41–47
- 7 Ashby N. Relativity in the global positioning system. *Liv Rev Relat*, 2003, 6: 1–42
- 8 Zhang J, Zhang K, Grenfell R, et al. Short note: On the relativistic Doppler effect for precise velocity determination using GPS. *J Geod*, 2006, 80: 104–110
- 9 Zhang J. Precise Velocity and Acceleration Determination Using A Standalone GPS Receiver in Real Time. Dissertation for Master Degree. Melbourne: Royal Melbourne Institute of Technology, 2007
- 10 王惠南. GPS 导航原理与应用. 北京: 科学出版社, 2003. 134–139
- 11 Lou Y, Liu Y, Shi C, et al. Precise orbit determination of BeiDou constellation based on BETS and MGEX network. *Sci Rep*, 2014, 4: 4692
- 12 Zheng W, Xu H Z, Zhong M, et al. Research progress in international gravity satellites and future satellite gravity measurement program in China (in Chinese). *Sci Surve Mapp*, 2010, 35: 5–9 [郑伟, 许厚泽, 钟敏, 等. 国际重力卫星研究进展和我国将来卫星重力测量计划. *测绘科学*, 2010, 35: 5–9]
- 13 杨嘉墀. 航天轨道动力学与控制. 北京: 中国宇航出版社, 2005

Precision satellite velocity determination using beidou with applications in satellite-based geodesy

WANG ZhengBo^{1,3}, ZHAO Lu^{1,4} & WANG LiJun^{1,2,3*}

¹ *NIM-THU Joint Institute for Measurement Science (JMI), Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

² *Department of Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

³ *Department of Precision Instruments & Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

⁴ *School of Physics and Nuclear Energy Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China*

A method for precisely determining the absolute velocity of a space craft using Beidou system is presented. Based on present-day technology, we find that, by precisely measuring the Doppler shift of the carrier frequency from Beidou satellites, a space craft's absolute velocity can be measured with an accuracy of 1 mm/s. Such a method can be used to determine the earth's gravitational potential, acceleration and its gradient, globally and with high precision, forming a three-dimensional mapping. We also show that with a set of specially designed orbital elements, three dimension scan around earth can be realized with a single satellite.

beidou satellite navigation system, doppler effect, relativity, geodesy, geoid, gravity anomaly, precision measurement

PACS: 91.10.Op, 91.10.Fc, 42.79.Qx, 04.20.-q, 03.30.+p, 91.10.-v, 91.10.Ws, 47.80.Cb

doi: 10.1360/SSPMA2015-00093