北斗卫星导航系统/美国全球定位系统载波相位相对定位全球精度分析

周乐韬^{1,2*}, 黄丁发^{1†}, 冯威¹, 陈武², 张熙^{1,2}, 严丽^{1,2}

1. 西南交通大学地球科学与环境工程学院测绘遥感信息系, 成都 611756;

2. 香港理工大学土地测量及地理资讯学系, 香港 999077

* 通讯作者, E-mail: ltzhou@swjtu.edu.cn

† 通讯作者, E-mail: dfhuang@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2017-08-18; 收修改稿日期: 2018-09-18; 接受日期: 2018-10-18; 网络版发表日期: 2019-02-26

国家重点研发计划项目(编号: 2016YFB0501900)、国家自然科学基金项目(批准号: 41874008、41374032)和香港大学资助委员会研究资助局项目(编号: PolyU 152023/14E)资助

摘要 文章推导了载波相位相对定位精度的计算公式; 分析了影响载波相位相对定位精度的各项因素; 提出了频率精度衰减因子的概念, 用以表达不同频率组合对定位精度的定量影响; 在此基础上, 计算并绘制了美国全球定位系统(GPS)、北斗二号(BDS2)、北斗三号(BDS3)及其融合系统的单天解、半小时解和单历元解的相对定位精度因子全球分布图; 利用自主知识产权的处理软件(GCN和VENUS/ARSNet)解算了实测数据, 检验了GPS和BDS2的单天解和单历元解的定位精度. 分析表明: BDS的B1/B2频率定位精度优于GPS L1/L2频率; BDS2在其服务区内精度总体上与GPS相当; BDS3在亚太地区定位精度高于GPS. 根据上述结论, 文章在导航系统信号频率和全球定位系统(GPS)测量规范方面提出了优化建议, 可为系统性能优化和制定标准提供参考.

关键词 北斗卫星导航系统, 相对定位, 精度衰减因子, 频率精度衰减因子, 时空可用性

1 引言

2012年12月27日, 北斗卫星导航系统(Bei Dou navigation satellite system, BDS)区域导航系统投入正式运行, 标志着北斗卫星导航系统初步建成. 到2016年末, 中国已经发射了23颗北斗导航卫星, 包括7颗地球静止轨道(geostationary Earth orbit, GEO)卫星、8颗倾斜地球同步轨道(Inclined GeoSynchronous Orbit, IGSO)卫星、8颗中距地球轨道(medium Earth orbit,

MEO)卫星(中国卫星导航系统管理办公室, 2016), 民用用户可以收到包括5颗GEO、6颗IGSO和3颗MEO北斗导航卫星信号.

计划到2020年左右建成覆盖全球的北斗卫星导航系统, 最终包括3颗GEO卫星、3颗IGSO卫星和24颗MEO卫星(中国卫星导航系统管理办公室, 2017). BDS的GEO和IGSO卫星分布于亚太区域, 用于区域导航定位, 而GPS均为MEO卫星, 目前星数已经增加到32颗; BDS每颗卫星信号都有3个频率; GPS只有少部分卫星

中文引用格式: 周乐韬, 黄丁发, 冯威, 陈武, 张熙, 严丽. 2019. 北斗卫星导航系统/美国全球定位系统载波相位相对定位全球精度分析. 中国科学: 地球科学, 49: 671–686, doi: 10.1360/N072017-00276

英文引用格式: Zhou L, Huang D, Feng W, Chen W, Zhang X, Yan L. 2019. Global precision analysis of carrier phase relative positioning in BeiDou navigation satellite system and United States global positioning system. Science China Earth Sciences, 62: 733–749, <https://doi.org/10.1007/s11430-017-9287-3>

(Block IIF)信号有3个频率。

鉴于GPS和BDS的上述差异,同时相对定位精度与基准偏差、卫星观测轨迹、数目、分布、基线长、多路径效应等因素都相关,分析不同系统不同情况下的定位精度是有意义的。关于BDS与GPS的定位精度,杨元喜等(2011, 2014)分别从观测精度、卫星可见数目、卫星几何分布等方面做了定量分析,指出区域BDS与GPS定位精度相当、两系统融合定位可靠性和精度有较大提高,而对于载波相位相对定位,文章指出文中仅分析了北京地区情况,还未对北斗区域卫星导航系统载波相位相对定位整体性能做出全面的评估;施闯等(2012)分析了北斗系统精密定轨和精密单点定位精度情况,对于载波相位相对定位,只分析了武汉地区情况。因此,本文着重定量分析GPS、当前区域BDS和未来的全球BDS(BDS3)的载波相位相对定位精度在全球范围的时空分布及其影响因素。这些定量分析对优化系统性能、制定标准和规范具有参考意义。

2 相对定位及其精度和偏差

考虑由测站1、2构成的站间单差定位模型,以测站1为参考,设测站1具有在国际地球参考框架(international terrestrial reference frame, ITRF)下的坐标 $\mathbf{X}_{10}$,两站同步观测卫星 j ,则在测站2概略坐标 $\mathbf{X}_{20}$ 处对方程进行线性化:

$$\varphi_i = M_2 \Delta w + \Delta C - \lambda_i^2 \Delta E - \mathbf{l}_2 \mathbf{x} + \Delta h_i + \lambda_i \Delta N_i^r + \lambda_i \nabla \Delta N_i^r + \varepsilon, \quad (1)$$

式中, $\varphi_i = \lambda_i \Delta \phi_i - \Delta R_0 + \Delta \mathbf{l}(\mathbf{x}_1 - \mathbf{o}^j) - \Delta M w_1 - \Delta H - \Delta P_i$, i 表示频率, j 表示目标卫星, r 表示参考卫星, λ 为载波波长, Δ 表示站间单差算子, ϕ 为修复周跳的相位观测值, R 为站星距, $\Delta R_0 = R_{20} - R_{10}$, $\Delta \mathbf{l} = \mathbf{l}_2 - \mathbf{l}_1$ 为两站概略坐标指向卫星的方向余弦向量之差, $\mathbf{x}_1$ 为测站1的3行1列的坐标偏差, $\mathbf{o}^j$ 为卫星 j 的3行1列的轨道偏差, M 为湿延迟映射函数, w_1 表示测站1的天顶湿延迟, H 为路径上的对流层干延迟, P 为天线相位中心偏差的路径投影, Δw 表示两个测站的相对天顶湿延迟, ΔC 表示相对接收机钟差等效距离, ΔE 定义为相对路径电子含量: $\Delta E = 40.3 \Delta \text{TEC} / c^2$, c 为光速, TEC 为路径上总电子含量, $\mathbf{l}_2$ 为测站2概略坐标 $\mathbf{X}_{20}$ 指向该卫星的1行3列的方向余弦向量, $\mathbf{x}$ 为基线向量的3行1列的坐标改正数向量, h_i

为第 i 个频率的相位硬件延迟, N 为整周模糊度, $\nabla \Delta$ 表示双差算子, ε 为观测噪声。

考虑双频观测, 令

$$\begin{cases} \Delta \tau - \lambda_1^2 \Delta e = \Delta h_1 + \lambda_1 \Delta N_1^r, \\ \Delta \tau - \lambda_2^2 \Delta e = \Delta h_2 + \lambda_2 \Delta N_2^r. \end{cases} \quad (2)$$

选定参考卫星后, $\Delta h_i + \lambda_i \Delta N_i^r$ 只与频率有关,与卫星无关,所以 $\Delta \tau$ 、 Δe 可以分别被 ΔC 、 ΔE 完全吸收,也就是说 $\Delta h_i + \lambda_i \Delta N_i^r$ 可以并入参数 ΔC 和 ΔE ,而不影响基线坐标改正数向量 $\mathbf{x}$ 的解算;同理, t 个频率的观测方程除设置 $\Delta \tau$ 、 Δe 外,还应该另外设置 $t-2$ 个吸收参数。

考虑某历元 s 颗卫星 t 个频率的相位观测值,可通过式(1)、(2)构建方程组:

$$\boldsymbol{\varphi} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} + \lambda \mathbf{N} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (3)$$

式中, $\boldsymbol{\varphi}$ 为 $s \times t$ 行1列的伪观测向量, $\mathbf{y}$ 为 $t+s$ 行1列的参数向量,包括1个相对天顶湿延迟 Δw 、1个相对接收机钟差 ΔC 、 s 个相对路径电子含量 ΔE 和 $t-2$ 个吸收参数, $\mathbf{A}$ 为其 $s \times t$ 行 $t+s$ 列的系数阵; $\mathbf{x}$ 为3行1列的时不变参数,即基线坐标改正数向量, $\mathbf{B}$ 为其 $s \times t$ 行3列的方向余弦矩阵; λ 为 $s \times t$ 行 $s \times t$ 列的由 λ 构成的对角阵, $\mathbf{N}$ 为 $s \times t$ 行1列的双差模糊度向量, $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为 $s \times t$ 行1列的观测误差向量。

$\boldsymbol{\varepsilon}$ 在观测时间段内可看成零均值方差为 $\mathbf{D}$ 的高斯白噪声, BDS相位观测值的精度可参考相关文献(杨元喜等, 2014)。本文以高度角定权,具体策略适用于各系统卫星:设定天顶单差相位观测噪声方差为 4 mm^2 ,则MEO和IGSO卫星的单差相位方差设定为 $4 \sin^{-2} \theta \text{ mm}^2$, GEO卫星单差相位方差设定为 $4 \sin^{-3} \theta \text{ mm}^2$, θ 为两站平均高度角。

联合伪距观测方程,观测多个频率、多颗卫星和多个历元,估计 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 和 $\mathbf{N}$,通过降相关搜索使双差整周模糊度 $\mathbf{N}$ 得到固定。固定时间长短取决于观测卫星的几何精度衰减因子(由观测卫星的数量和几何分布决定)、相对路径电子含量、观测频率数目和多路径效应的大小和白化程度。观测卫星几何精度衰减因子越小,相对路径电子含量越小、观测频率数越多,多路径噪声越白、方差越小,则固定时间越短。限于篇幅,本文只讨论相对定位精度,不具体讨论模糊度固定时间等定位性能。

当双差模糊度得到固定,观测模型可以写成

$$\mathbf{L} = \boldsymbol{\varphi} - \lambda \mathbf{N} = [\mathbf{A} \quad \mathbf{B}] \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (4)$$

其法方程为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A} & \mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y} \\ \mathbf{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{L} \\ \mathbf{B}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{L} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

本文关注位置参数, 因此, 使用越组约化方法(周江文, 1979; 许国昌和钱志瀚, 1986)消去参数 $\mathbf{y}$, 得到只含 $\mathbf{x}$ 的法方程:

$$\mathbf{F}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F} \mathbf{x} = \mathbf{F}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{L}, \quad (6)$$

式中, $\mathbf{F} = (\mathbf{E} - \mathbf{J})\mathbf{B}$, $\mathbf{J} = \mathbf{A}(\mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{D}^{-1}$, $\mathbf{E}$ 为单位阵. 注意, 在进行多星座联合解算时, 由于参数 $\mathbf{y}$ 与系统相关, 因此, 需要分别计算各个系统的 $\mathbf{J}$ 、 $\mathbf{F}$ 矩阵, 然后再进行融合.

假设基线改正向量 $\mathbf{x}$ 在 t_0 到 t_1 的测段内是时不变的, 对式(6)从 t_0 到 t_1 的多历元的法方程进行叠加, 基线改正参数向量 $\mathbf{x}$ 的协因数阵、协方差阵及估值表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{Q}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} &= \left(\sum_{i=t_0}^{t_1} \mathbf{F}_i^T \mathbf{D}_i^{-1} \mathbf{F}_i \right)^{-1}, \\ \mathbf{D}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} &= \sigma_0^2 \mathbf{Q}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}, \\ \hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{Q}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} \sum_{i=t_0}^{t_1} \mathbf{F}_i^T \mathbf{D}_i^{-1} \mathbf{L}_i, \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\sigma_0^2 = \frac{1}{n-m-3} \sum_{i=t_0}^{t_1} \mathbf{V}_i^T \mathbf{D}_i^{-1} \mathbf{V}_i$, $\mathbf{V}_i = (\mathbf{E}_i - \mathbf{J}_i) \mathbf{L}_i - \mathbf{F}_i \hat{\mathbf{x}}$, n 为从 t_0 到 t_1 的各可见卫星各频率的观测值总数, m 是各历元未知量 $\mathbf{y}$ 的元素的个数的总和, σ_0 为验后单位权中误差, 以本文模型和定权策略, 利用普通的双频接收机和大地测量型天线, 验后单位权中误差一般小于0.3m.

通常, 习惯考察定位的水平精度和垂向精度. 因此, 需要将精度信息转换到东北天站心坐标系, 设测站2概略坐标 $\mathbf{X}_{20}$ 处的大地经度和纬度分别是 α 、 β , 则

$$\mathbf{Q}_L = \mathbf{Z} \mathbf{Q}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} \mathbf{Z}^T, \quad (8)$$

$$\text{式中, } \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ -\sin\beta\cos\alpha & -\sin\beta\sin\alpha & \cos\beta \\ \cos\beta\cos\alpha & \cos\beta\sin\alpha & \sin\beta \end{bmatrix}, \mathbf{Q}_L \text{ 为东北天当}$$

地坐标系下的位置协因数阵, 其对角线元素开根号分别代表EDOP(east dilution of precision)、NDOP(north dilution of precision)和UDOP(up dilution of precision).

本文定位结果的东北天分量DOP值是一种广义DOP值, 对应于广义DOP中的第二类广义DOP值(Yang等, 2011).

在法方程式(4)中, 估值的误差来源于两部分: 第一部分是观测值的观测误差, 它由其方差阵体现, 这已经假设观测噪声服从零均值高斯分布, 通过观测模型的系数矩阵对观测值的权阵进行投影形成待估参数的协因数阵; 第二部分来源于观测模型的不完善, 使伪观测值向量 $\mathbf{L}$ 含有偏差, 导致估值有偏. 定位偏差 $\hat{\mathbf{b}}$ 可以表示为

$$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{Q}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} \sum_{i=t_0}^{t_1} \mathbf{F}_i^T \mathbf{D}_i^{-1} \mathbf{l}_i, \quad (9)$$

式中, $\mathbf{l}_i$ 表示第 i 历元的未建模误差在各观测值上的投影.

3 相对定位偏差的影响因素

式(1)中, 天线相位中心偏差路径投影 P 精度达到亚毫米级; 在大气状态平稳并能精确获取气压的情况下, 干延迟 H 的模型值可以达到毫米精度(Davis等, 1985), 干延迟偏差还能被天顶湿延迟参数部分吸收, 从而减小对位置偏差的影响. 他们对定位偏差的影响为亚毫米级. 主要考虑基准偏差、多路径效应和长基线未建模误差对相对定位偏差的影响.

3.1 基准偏差对相对定位偏差的影响

考虑参考站坐标基准 $\mathbf{X}_{10}$ 、卫星位置基准 $\mathbf{X}^0$ 和天顶湿延迟基准 w_1 的偏差的影响.

从式(1)等号左边第3项可知, 参考站坐标基准偏差和卫星位置基准偏差都会对伪观测值造成偏差, 继而导致相对定位结果出现偏差. Kleusberg和Teunissen(1998)对此进行了分析, 利用其公式可知: 如果要让该项对伪观测值的偏差控制在亚毫米级, 基线长度为10km时, 测站坐标基准偏差与卫星位置偏差之差应该控制在2m以内, 基线长度200km时, 偏差应控制在0.1m以内. 因此, 长基线精密定位最好使用具有精确ITRF坐标的测站作为参考站. 需注意的是, 若使用广播星历解算200km的基线, 最不利的情况下伪观测值偏差会达到1cm.

本文使用GMF模型(Boehm等, 2006), 对连分数映

射函数求微分, 测站相对湿延迟映射函数可以写成:

$$\Delta M = \frac{a+ac}{1+b+c} \frac{\cos\theta_1}{v^2} \left(\frac{av^2-ab}{\mu^2v^2} - 1 \right) \Delta\theta, \quad (10)$$

式中, $v=\sin\theta_1+c$, $\mu=\sin\theta_1+bv^{-1}$, $v=\sin\theta_1+av^{-1}$, θ_1 为测站1对某卫星的高度角, $\Delta\theta=\theta_2-\theta_1$, a 、 b 、 c 为连分数系数. 当 a 、 b 、 c 取赤道附近系数、 θ_1 取截止高度角、 $\Delta\theta=|\mathbf{X}_{20}-\mathbf{X}_{10}|/R_e$ 时, ΔM 取得最大值, R_e 为地球半径. 若截止高度角为 10° , 基线长1000km, 天顶湿延迟偏差为0.35m, 则最不利情况下对观测值的影响约为1mm. 因此, 大多数情况下, 可以不考虑天顶湿延迟基准 w_1 偏差的影响.

3.2 多路径效应对相对定位偏差的影响

多路径效应与观测环境相关, 由于环境的复杂性, 难以获取反射信号的幅值衰减系数和相位差这两个时变参数, 这导致其很难在式(1)中进行建模.

GEO卫星的高度角和方位角几乎不发生变化, 其反射信号的幅值衰减系数和相位差也几乎不变. 分析表明GEO卫星的多路径效应是有偏的(杨元喜等, 2014). 而相比MEO卫星, IGSO卫星的高度角和方位角变化缓慢, 其多路径效应频率也小于MEO卫星. 因此, 通常对MEO卫星进行高度角加权; 对IGSO卫星, 若观测时段较短, 可考虑减小观测值的权; 而对GEO卫星可以考虑设置多路径参数进行估计或减小观测值的权. 多路径效应被位置参数吸收引起的偏差是定位偏差中的重要成分, 在实时动态定位和快速静态定位中尤其显著.

3.3 长基线未建模误差对相对定位偏差的影响

进行精密相对定位, 长基线比短基线要求建立更完善的观测模型, 须使用精密星历, 同时应考虑电离层二阶项及三阶项、相对论效应、固体潮等改正, 如果距离海岸很近, 还要考虑海洋潮的影响. 如果模型不完善, 未建模误差会被位置参数吸收, 使结果出现毫米级甚至厘米级偏差, 基线越长, 偏差越大.

4 相对定位精度的影响因素

通过(7)式可知相对定位精度 $\mathbf{D}_{xx}$ 由协因数阵 $\mathbf{Q}_{xx}$ 和验后方差 $\sigma_0^2 = \frac{1}{n-m-3} \sum_{i=t_0}^{t_1} \mathbf{v}_i^T \mathbf{D}_i^{-1} \mathbf{v}_i$ 共同确定. 其中,

σ_0^2 与观测值的实际观测精度有关, 也与观测模型的完善程度有关, 以本文模型和定权策略, 利用普通的双频接收机和大地测量型天线, 验后单位权中误差 σ_0 一般小于0.3m; 协因数阵 $\mathbf{Q}_{xx}$ 是由测站的卫星观测轨迹、数目、分布等状况以及观测值的先验精度确定的, 与实际观测值无关. 因此可以预测相对定位精度 $\mathbf{D}_{xx}$ 的上限.

4.1 基线长短及方向对相对定位精度的影响

考察不同参考站1与相同测站2构成的基线. 1000km的基线对应的地心夹角约为 9° , 基线越长共视卫星数目越少, 这会导致观测值的个数减小, 进而使协因数阵 $\mathbf{Q}_{xx}$ 增大. 因此, 相同观测时段的长基线定位精度比短基线低. 200km的基线对应的地心夹角仅为 1.8° ; 以测站2为圆心, 考察200km半径内任意位置的参考站与测站2形成的基线, 发现所有基线共视卫星数目差异很小. 因此, 在模糊度固定的情况下, 除了上千公里的超长基线外, 根据式(6)、(7)计算此范围内不同长度、方向的基线解的协因数阵 $\mathbf{Q}_{xx}$, 可以发现差异很小, 该差异主要是由于低高度角共视卫星不同所致, 也就是说相对定位精度与基线长度和方向的相关性很小.

4.2 不同频率对定位精度的影响

考虑某颗卫星的双频观测信号, 令式(6)中 $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{-2} & \lambda_2^{-2} \end{bmatrix}$ 为双频电离层参数系数阵, 分号表示换行, λ 为信号波长, $\mathbf{B}$ 为频率无关的系数矩阵, 则某历元根据式(6)有

$$\begin{aligned} \xi &= \mathbf{F}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{F} \\ &= \mathbf{B}^T (\mathbf{E} - \mathbf{J})^T \mathbf{D}^{-1} (\mathbf{E} - \mathbf{J}) \mathbf{B} \\ &= \mathbf{B}^T \boldsymbol{\eta} \mathbf{B}, \end{aligned} \quad (11)$$

式中,

$$\boldsymbol{\eta} = (\mathbf{E} - \mathbf{J})^T \mathbf{D}^{-1} (\mathbf{E} - \mathbf{J}) = \frac{2.5e5 \sin^2 \theta}{\lambda_1^4 + \lambda_2^4} \begin{bmatrix} \lambda_2^4 & -\lambda_1^2 \lambda_2^2 \\ -\lambda_1^2 \lambda_2^2 & \lambda_1^4 \end{bmatrix}$$

对任意一颗卫星, 双频观测的频率无关系数阵为 $\mathbf{B} = [\mathbf{H}; \mathbf{H}]$, $\mathbf{H} = [M \ 1 \ 1]$, 其中 M 为湿延迟映射函数, $\mathbf{1}$ 为1行3列的方向余弦向量; 则 $\xi = \kappa^{-2} \gamma_i$, $\gamma_i = 2.5e5 \sin^2 \theta_i \mathbf{H}_i^T \mathbf{H}_i$, 下标 i 为卫星标识, 其中 κ 定义为频率精度衰减因子(fre-

quency dilution of precision, FDOP):

$$\kappa = \left(\frac{\lambda_1^4 + \lambda_2^4}{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

将BDS的B1、B2双频信号以及GPS的L1、L2双频信号的波长分别带入式(12), 则有 $\xi_C = 2.90^{-2} \gamma_i$, $\xi_G = 2.97^{-2} \gamma_i$, 下标C表示BDS, G表示GPS.

对该历元观测到的 n 颗卫星进行法方程叠加, 则其协因数阵为

$$\mathbf{Q}_C = 2.90^2 \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i \right)^{-1} < \mathbf{Q}_G = 2.97^2 \left(\sum_{i=1}^n \gamma_i \right)^{-1}. \quad (13)$$

因此, 其他条件相同情况下(包括定权), BDS B1/B2双频信号比GPS L1/L2信号对频率无关参数(对流层湿延迟、接收机相对钟差、基线向量等)的估计精度更高, 显然定位精度也更高.

由式(12)可以得到波长与频率精度衰减因子 κ 的分布关系, 如图1所示, κ 是一个大于1的数, 频率越高、频差越大, κ 越小, 则定位精度越高. 由于微波辐射大气窗口的限制和水汽降雨对高频电磁波的吸收, 最高频率应限制在C波段, 因此, BDS和GPS频率最好横跨L、S和C波段. 若 κ 能接近1.0, 则其东北天DOP值约为当前频率定位DOP值的1/3, 因此, 在验后单位权中误差相同的条件下, 单历元位置参数的中误差约为当前频率定位中误差的1/3. 同时, S频段等高频导航信号作为卫星导航技术领域的新发展, 它的主要优势是可以解决L频段频率资源紧张的问题, 信号定位精度更高, 有利于导航与通信、搜救应用融合等(谭述森, 2016).

同理, 可计算三频的频率精度衰减因子为

$$\kappa = \left(\frac{\lambda_1^4 + \lambda_2^4 + \lambda_3^4}{(\lambda_1^2 - \lambda_2^2)^2 + (\lambda_2^2 - \lambda_3^2)^2 + (\lambda_3^2 - \lambda_1^2)^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

4.3 卫星观测轨迹、数目、分布对相对定位精度的影响

目前BDS2能为55°S~55°N, 70°~150°E(简称BDS2服务区)提供服务(China satellite navigation office, 2013), BDS3(包括30颗卫星)预计2020年可为全球提供服务. 因此, 除了分析GPS、BDS2, 进一步分析BDS3

图1 波长与频率精度衰减因子 κ 分布关系

及其多模融合系统的相对定位精度都具有现实意义, 而相对定位单天解、半小时解和单历元解分别应用于大地测量、工程控制测量和实时动态高精度位置服务领域, 也具有代表性. 不同系统和不同观测时长对应着不同的卫星观测轨迹、数目和分布, 因此本文主要分析GPS、BDS2和BDS3及其多模融合系统的单天解、半小时解和单历元解的全球时空可用性和定位精度.

GPS卫星轨道周期均为1个恒星日, 本文利用2016年11月20日(年积日325)的GPS广播星历, 以单天数据进行分析; BDS的MEO卫星轨道周期是7个恒星日, 本文利用2016年11月20~26日(年积日325~331)的广播星历数据分析BDS2全球相对定位精度; BDS3从2016年开始建设, 星座将由3颗GEO卫星、3颗IGSO卫星和24颗MEO卫星组成, 预计2020年建成, 本文仿真BDS3的7个恒星日的轨道, 利用其分析BDS3全球相对定位精度.

为简化分析, BDS和GPS均使用各自双频信号, 设定测站2的卫星高度截止角为13°, 假设高度截止角以上环视无遮挡, 基站1的卫星高度截止角无限制, 以测站2的观测卫星为准, 假设基站1也能观测到相同卫星.

4.3.1 全球单天解分析

以30s为采样间隔, 利用式(6)~(8)计算BDS和GPS

的全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格网点单天解的东北天三个分量的精度衰减因子(EDOP、NDOP和UDOP)。

图2显示了: (1) GPS相对定位单天解在全球范围相同纬度上精度较均衡; (2) 其EDOP分布在 $0.0001 \sim 0.00015$, 说明GPS相对定位东方向精度在中高纬度地区最高, 南北极地区次之, 在低纬度地区精度最低; (3) 其NDOP在 $0.0001 \sim 0.0002$, 显示了GPS相对定位北方向精度在低纬度地区最高, 南北极地区精度次之, 中高纬度地区精度最低; (4) 其UDOP分布在 $0.0009 \sim 0.0021$, 表明其垂向方向精度在低纬度地区最高, 中高纬度地区稍弱, 南北极地区精度最低; (5) 从全球平均值来看, 东方向精度最高, 北方向精度稍次, 垂向方向精度最低。

由于每天的观测是独立的, 因此单天解平均精度衰减因子为7天解的 $\sqrt{7}$ 倍。从图3可以看出: (1) 可定位区域边缘精度下降很快, 中心区域精度高, 精度分布不均匀(DOP值的分布范围很宽, 为了更好的表现中心区域的精度分布细节, 对DOP值取以10为底的对数);

(2) 图中BDS2可定位区域约占全球面积的42%; (3) BDS2服务区内EDOP、NDOP和UDOP分别在 $0.00005 \sim 0.0003$ 、 $0.00005 \sim 0.0003$ 和 $0.0003 \sim 0.0016$ 分布; (4) BDS2服务区的中心区域精度略高于GPS, 周边区域略低于GPS, 总体上两者精度一致, 从平均值来看, 东方向、北方向精度最高, 垂向方向精度最低。

目前的BDS2与GPS相比在服务范围上还有差距, 相对定位精度相当。当BDS3建成运行时, 其全球相对定位精度与GPS相比情况如何? BDS3设计的GEO卫星轨道高度为35786km, 3颗卫星分别定点于 80°E 、 110.5°E 和 140°E ; IGSO卫星轨道高度为35786km, 轨道倾角为 55° , 分布在3个轨道面内, 升交点赤经分别相差 120° , 3颗卫星的星下点轨迹重合, 交叉点经度为 118°E ; MEO卫星轨道高度为21528km, 轨道倾角 55° , 3个轨道面升交点赤经分布为 0° 、 120° 、 240° , 3个轨道面第1颗卫星升交距角依次为 0° 、 15° 、 30° (China Satellite Navigation Office, 2013; 中国卫星导航系统管理办公室, 2017; 杨元喜等, 2018), 设MEO轨道面内8颗

图2 GPS全球相对定位单天解东北天精度衰减因子和卫星空间轨迹

图3 BDS2相对定位单天解全球东北天精度衰减因子和其卫星空间轨迹

卫星均匀分布, 相邻卫星之间的地心夹角为 45° 。本文以下部分均利用上述设计参数仿真BDS3星座进行分析。

单天解平均精度衰减因子约为7天解的 $\sqrt{7}$ 倍。从图4中可以看出: (1) 其EDOP大小在0.0001~0.0002, BDS3相对定位东方向精度在 $55^\circ\text{S}\sim 55^\circ\text{N}$ 、 $180^\circ\text{W}\sim 50^\circ\text{E}$ 区域精度最低, 其余范围的精度较高; (2) 其NDOP大小在0.0001~0.0002, 显示了北方向精度在 $45^\circ\text{S}\sim 45^\circ\text{N}$ 、 $50^\circ\text{E}\sim 180^\circ\text{E}$ 区域及南北极圈地区精度最高, 其余范围里精度较低; (3) 其UDOP分布在0.0007~0.002, 表明其垂向方向精度在南北极地区精度最低, 其余范围精度较高; (4) 从平均值来看, 全球东方向精度最高, 北方向精度稍次, 垂向方向精度最低。

为了对比BDS3和GPS的相对定位单天解全球定位精度, 对其精度衰减因子求互差如下。

以GPS为基准, 图5为BDS3和GPS相对定位单天解全球东北天精度衰减因子的互差图。可以看出: (1)

全球范围内, BDS3的东方向和北方向精度衰减因子互差数量级都在 10^{-5} 级、垂向互差数量级在 10^{-4} 级, 说明BDS3和GPS各分量精度一致; (2) 全球范围东北天3个分量中, BDS3定位精度比GPS较高的区域面积分别占全球面积的23.5%、29.5%、18.9%; (3) ΔEDOP 在 $-0.00003\sim 0.00004$, ΔNDOP 在 $-0.00004\sim 0.00004$, ΔUDOP 在 $-0.0003\sim 0.0004$; (4) 得益于亚太地区上空分布的IGSO和GEO卫星, BDS3在该区域各分量定位精度略高于GPS。

4.3.2 全球单历元解(瞬时解、RTK)分析

对比两系统单历元解的精度衰减因子对考察全球范围RTK的定位精度有指导意义。在单历元相对定位中, 理论上至少观测4颗卫星才能定位, 但实际观测中, 要做到接收机自主完整性监测以保障可用性至少观测6颗卫星, 因此以观测6颗卫星为可用下限。本文利用式(6)~(8)分别计算GPS在2016年11月20日(年积日325)的

图 4 BDS3相对定位单天解全球东北天精度衰减因子和其卫星仿真轨迹

图 5 相对定位单天解全球东北天精度衰减因子互差

每隔4min的单历元解、BDS2在年积日325~331的每隔4min的单历元解和BDS3仿真星座7个恒星日的每隔4min的单历元解,生成3个系统的全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 格网点单历元解的EDOP、NDOP和UDOP时间序列,以每个格网点在其可用时间内的精度衰减因子的上限值成图。

图6中,第一幅图显示了观测6颗卫星为可用下限时,全球范围的时间可用性分布情况,大部分地区时间可用性接近于1.0,中国区域时间可用性大于0.98,全球地区时间可用性大于0.973;其余三幅图显示了在可用时间内全球精度衰减因子的上限值(用以10为底的对数表示),其中EDOP、NDOP和UDOP上限分别为0.007~0.022、0.007~0.126和0.104~0.694;中国区域内上限为0.007~0.016、0.007~0.055和0.104~0.532。

图7中: (1) 第一幅图显示了观测6颗卫星为可用下限时,全球范围的时间可用性分布情况,其中BDS2服务区内时间可用性大于0.95,边缘地区逐渐降低直至不可用; (2) 其余三幅图显示了时间可用性大于0.9的区域内各分量精度衰减因子的上限值,其中EDOP、

NDOP和UDOP上限分别为0.007~0.166、0.009~0.36和0.06~0.832, BDS2服务区内EDOP、NDOP和UDOP上限分别为0.007~0.053、0.009~0.130和0.06~0.458。

图8中,第一幅图显示了观测6颗卫星为可用下限时, BDS3全球大部分区域时间可用性为1.0,在 $5^\circ\text{S} \sim 60^\circ\text{N}$, $170^\circ\text{W} \sim 30^\circ\text{E}$ 区域内,时间可用性为0.775~1.0;其余三幅图显示了在可用时间内全球精度衰减因子的上限值,其中EDOP、NDOP和UDOP上限分别为0.007~0.016、0.007~0.037和0.057~0.507,在BDS2服务区域内上限为0.007~0.012、0.007~0.016和0.057~0.250。

对比发现,在亚太区域, BDS3单历元解各分量精度均优于GPS,也优于BDS2; GPS的MEO卫星个数远多于BDS3,因此GPS单历元解全球时间可用性大于BDS3, BDS3时间可用性又大于BDS2。在全球范围内, BDS3存在时间可用性较低的区域,因此,要在全球开阔地区进行全天时可靠的单历元解算应考虑融合BDS和GPS。

图6 GPS单历元相对定位全球时空可用性及其单历元解全球东北天精度衰减因子上限

图7 BDS2单历元相对定位全球时空可用性及其单历元解全球东北天精度衰减因子上限

图8 BDS3单历元相对定位全球时空可用性及其单历元解全球东北天精度衰减因子上限

图9 BDS2+GPS单历元相对定位全球东北天精度衰减因子上限

图9中: (1) 观测6颗卫星为可用下限时, BDS2与GPS融合定位单历元解时间可用性在BDS2服务区内为1.0, 全球其他区域接近1.0, 因此未画出其时空可用性图; (2) 图中显示了BDS2与GPS融合定位单历元解全球精度衰减因子的上限值, 其中EDOP、NDOP和UDOP上限分别为0.006~0.020、0.006~0.12和0.041~0.654; 在BDS2服务区内上限为0.006~0.009、0.005~0.010和0.041~0.120。

图10中, BDS3与GPS融合定位全球时间可用性均为1.0, 因此未画出其时空可用性图。图10显示了BDS3与GPS融合定位全球精度衰减因子的上限值, 其中EDOP、NDOP和UDOP上限分别为0.005~0.009、0.005~0.013和0.043~0.205; 在BDS2服务区域内上限为0.005~0.007、0.005~0.008和0.043~0.118。对比发现, BDS3与GPS融合定位精度远高于单独系统。

4.3.3 全球半小时解分析

分析半小时解的精度衰减因子对考察全球范围快

速静态相对定位精度有意义, 对于修订中国GNSS测量规范和建立国际标准都有参考价值。以30s为采样间隔, 本文利用式(6)~(8)分别计算GPS在2016年11月20日(年积日325)和BDS3仿真的7日内的全球1°×1°格网点半小时解的EDOP、NDOP和UDOP时间序列, 以每个格网点的精度衰减因子的上限值成图。

图11显示了GPS半小时解全球精度衰减因子的上限值, 其中EDOP、NDOP和UDOP上限分别为0.0009~0.0019、0.0009~0.0028和0.009~0.034; 在中国区域内上限为0.0009~0.0017、0.0009~0.0025和0.009~0.030。

图12显示了EDOP、NDOP和UDOP上限分别为0.0009~0.0052、0.0009~0.0057和0.008~0.110; 在BDS2服务区域内上限为0.0009~0.0015、0.0009~0.0013和0.008~0.029。

图13显示了BDS3+GPS半小时融合解全球精度衰减因子的上限值, EDOP、NDOP和UDOP上限分别为0.0006~0.001、0.0006~0.0014和0.0048~0.0135; 在

图 10 BDS3+GPS单历元相对定位全球东北天精度衰减因子上限

图 11 GPS相对定位半小时解全球东北天精度衰减因子上限

图 12 BDS3 相对定位半小时解全球时空可用性及东北天精度衰减因子上限

图 13 BDS3+GPS 相对定位半小时解全球东北天精度衰减因子上限

BDS2服务区内上限为0.0006~0.001、0.0006~0.001和0.0048~0.007。

5 实测结果分析

在实测过程中,有时低高度角卫星的模糊度无法得到固定,有时观测值会发生粗差而被剔除,有时某些卫星会被遮挡而发生数据间断,上述情况都会造成实际定位精度比理论分析精度低;另外,观测模型与实际观测量之间存在偏差,而理论分析假设前提是观测模型无偏差,这也会导致实际定位精度比理论分析精度低。本文将以实测数据进行验证。

通过自主研发的GNSS控制网解算软件(GCN, GNSS control network),软件通过迭代计算尽可能固定每颗卫星的模糊度,再利用本文方法及解算策略估计测站坐标。数据为西南交通大学CORS网中RENS和ZHJI站(基线长98.9km,位于成都平原,即31°N、104°E附近;使用扼流圈天线和基于Trimble BD970主

板的CORS接收机)的2016年10月26~28日的双星座数据和GPS、BDS2的精密星历。坐标初值使用GAMIT/GLOBK处理连续多天数据的结果,参考框架为ITRF08,参考历元为2016年1月。利用GCN进行单天解的计算(以30s为采样间隔,设定截止高度角为13°),投影至当地坐标系下的坐标改正数及其中误差如表1所示。

表1可以看出,其GPS和BDS2的单天解东、北方向精度为亚毫米级,垂向精度约为1mm;该基线位于BDS2服务区域中心(成都平原),因此通过表1和图3可看出实测精度比理论分析精度略低。从坐标改正数估值来看,GPS单天解一致性好,BDS2单天解一致性略差,说明GPS解偏差较小或具有很强的日周期性,BDS2单天解一致性较差可能是因为其MEO卫星轨道重复周期是7个恒星日所致。

为了实测两个系统RTK解的精度情况,以2016年1月22日11:00~14:00的香港CORS网(如图14所示)为数据源,利用自主研发的VENUS/ARSNet软件进行实时

表 1 RENS_ZHJI单天解

系统	DoY(天)	$\hat{E}$ (m)	$\hat{N}$ (m)	$\hat{U}$ (m)	$\sigma_{\hat{E}}$ (m)	$\sigma_{\hat{N}}$ (m)	$\sigma_{\hat{U}}$ (m)
GPS	300	0.0040	0.0111	-0.0121	0.0004	0.0007	0.0011
GPS	301	0.0038	0.0106	-0.0116	0.0004	0.0007	0.0011
GPS	302	0.0034	0.0100	-0.0151	0.0004	0.0008	0.0012
BDS2	300	0.0001	0.0059	-0.0115	0.0004	0.0007	0.0010
BDS2	301	0.0030	0.0143	-0.0137	0.0005	0.0007	0.0010
BDS2	302	0.0014	0.0116	-0.0106	0.0004	0.0007	0.0011

图 14 VENUS/ARSNet软件和香港CORS网

服务(黄丁发等, 2009). 该软件输入信息为各参考站的已知坐标、天线类型、天线高、接收机类型、实时观测数据流和星历(支持广播星历和精密星历)数据流的端口号以及协议格式; 采用单基线双差解算模型, 同时估计双差模糊度、双差电离层延迟和相对天顶对流层湿延迟; 采用降相关搜索方法固定模糊度; 通过球面Delaunay三角网确定大气内插单元; 利用虚拟参考站方式播发差分数据; 支持RTCM数据协议. RTK接收机为Leica GS15(保持静止), 在香港理工大学进行RTK定位实验, 结果如表2.

表2显示了内符合精度平均值和外符合精度(外符合参考值是使用2016年1月22日11: 00~17: 00的6h数据与香港CORS站点HKLM的7km单基线静态后处理的结果), 可以看出: GPS RTK解精度高于BDS2的RTK解, BDS2与GPS 的融合解精度高于单个系统的解. BDS2 RTK解的东方向精度低于北方向精度是由于观测时段内BDS2卫星分布所致.

6 结论及建议

综上所述, 可以得到如下结论:

(1) 使用频率精度衰减因子可以表示各频率组合对定位精度的影响. 在其他条件相同的情况下, 频率精度衰减因子显示BDS2 B1/B2双频比GPS L1/L2双频定位精度高.

(2) 对比GPS、BDS2和BDS3的单天解: GPS和BDS3全球空间可用性为100%; 由于可见卫星基本分布在亚太区域, 因此BDS2的全球空间可用性为42%; 在BDS2服务中心区域, BDS2定位精度略高于GPS, 其他区域定位精度低于GPS; BDS3与GPS的定位精度一致, 在亚太地区定位精度略高于GPS, 定位精度为亚毫米至毫米级.

(3) 对比GPS、BDS2和BDS3的单历元解: 在观测卫星大于等于6颗的情况下, GPS全球时间可用性大于

0.973, 东、北方向定位精度上限为厘米级, 垂向为分米级; BDS2在BDS服务区内时间可用性大于0.95, 三分量定位精度上限都在分米级, 边缘地区迅速降低直至不可用; BDS3全球时间可用性大于0.775, 东、北方向定位精度上限在亚厘米级, 垂向为分米级, 在BDS2服务区内, 东、北分量定位精度上限为毫米级, 垂向为厘米级; 在BDS2服务区内, BDS2单历元解定位精度略低于GPS, BDS3单历元解定位精度略高于GPS.

(4) 对比GPS和BDS3的半小时解: 以单位权中误差0.3为经验值, GPS东北天三分量定位精度分别优于0.0006、0.0009和0.010m, 全球时间可用性为1.0; BDS3三分量全球定位精度分别优于0.0016、0.0017和0.033m, 全球时间可用性为1.0; BDS3在BDS2服务区域内东北天三分量定位精度分别优于0.0005、0.0004和0.010m, 定位精度略高于GPS.

(5) 对比单系统定位和BDS3/GPS融合定位: BDS3/GPS融合定位单历元解全球时间可用性为1.0, BDS3/GPS融合定位单历元解东北天三分量精度分别优于0.0027、0.0039和0.0615m; BDS3/GPS融合定位半小时解东北天三分量精度分别优于0.0003、0.0004和0.0041m; BDS3/GPS融合后的定位精度和时空可用性远高于单一系统.

(6) 利用自主知识产权的软件对实测数据进行处理, 其单天解和RTK解的结果表明BDS2定位精度弱于GPS; 同时, RTK解表明BDS2/GPS融合的RTK定位精度高于单系统的RTK定位精度; 实测数据结果与分析一致.

(7) 若以单位权中误差0.3为经验值, 分析显示各系统的基线单天解东、北方向均可达到亚毫米级精度, 但目前基线的单天解外符合精度均是毫米级, 原因是观测模型不完善(忽略多路径应、低高度角对流层延迟映射函数有偏)致使位置估值有偏差, 单历元解和半小时解也存在有偏的情况, 导致定位准确度与定位精度不符(外符合定位精度低于内符合精度). 因此,

表2 RTK解

系统	$\sigma_{\hat{E}}$ (m)	$\sigma_{\hat{N}}$ (m)	$\sigma_{\hat{U}}$ (m)	RMS $_{\hat{E}}$ (m)	RMS $_{\hat{N}}$ (m)	RMS $_{\hat{U}}$ (m)
BDS	0.019	0.007	0.051	0.020	0.007	0.054
GPS	0.005	0.005	0.014	0.005	0.009	0.022
BDS+GPS	0.003	0.003	0.011	0.003	0.005	0.016

BDS3和GPS的卫星数目和分布已经足够好,要突破瓶颈,应该从精化观测模型着手,尽可能地减小偏差。

根据上述分析和结论,本文提出以下建议:

(1) 根据频率精度衰减因子,建议在新一代卫星中对观测信号频率进行优化:第一频率越高、与其他频率频差越大,则频率精度衰减因子越小,定位精度越高。由于微波辐射大气窗口的限制和水汽降雨对高频电磁波的吸收,最高频率应限制在C波段,因此,BDS或GPS频率最好横跨L、S和C波段。如果频率精度衰减因子接近1.0,则其单历元定位的东北天精度衰减因子约为当前频率的东北天定位精度衰减因子的1/3。

(2) 以单位权中误差0.3为经验值,GPS半小时解在中国区域任何时段内东北天方向精度优于0.0005、0.0008和0.009m。在环境开阔地区,半小时解的多路径效应偏差典型值为亚厘米级(袁林果等,2004),故在中国区域GPS半小时解定位精度能满足《全球定位系统(GPS)测量规范(GB/T 18314-2009)》中C和D级网的要求,而依该规范C和D级网的观测时间则要分别大于240和60min,并要求观测多个时段,因此,在目前GPS卫星数增加和多系统融合的情况下,该规范中的观测时间过于保守;在环视遮挡较严重地区,应该依照实际观测实时计算定位精度直到其满足要求为止,不宜设定观测时间。

致谢 杨元喜院士指出了原文中的错误并提出了大量建设性意见,谭述森院士为本文提出了许多指导性意见,同时审稿人和编委为本文的完善也提出了大量宝贵意见,在此作者表示诚挚感谢。

参考文献

黄丁发,周乐韬,李成钢,熊永良. 2009. 增强参考站网络RTK算法模

- 型及其实验研究. 武汉大学学报(信息科学版), 34: 1344-1348
- 施闯,赵齐乐,李敏,唐卫明,胡志刚,楼益栋,章红平,牛小骥,刘经南. 2012. 北斗卫星导航系统的精密定轨与定位研究. 中国科学: 地球科学, 42: 854-861
- 谭述森. 2016. 世界卫星导航信号新发展——S频段信号应用前景设想. 长沙: 第七届中国卫星导航学术年会
- 许国昌,钱志瀚. 1986. 越组约化平差方法在VLBI数据处理中的应用. 地壳形变与地震, (4): 90-93
- 杨元喜,李金龙,徐君毅,汤静,郭海荣,何海波. 2011. 中国北斗卫星导航系统对全球PNT用户的贡献. 科学通报, 56: 1734-1740
- 杨元喜,李金龙,王爱兵,徐君毅,何海波,郭海荣,申俊飞,戴弦. 2014. 北斗区域卫星导航系统基本导航定位性能初步评估. 中国科学: 地球科学, 44: 72-81
- 杨元喜,许扬胤,李金龙,杨诚. 2018. 北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析. 中国科学: 地球科学, 48: 584-594
- 袁林果,黄丁发,丁晓利,熊永良,钟萍,李成钢. 2004. GPS载波相位测量中的信号多路径效应影响研究. 测绘学报, (3): 210-215
- 中国卫星导航系统管理办公室. 2013. 北斗卫星导航系统公开服务性能规范(1.0版)
- 中国卫星导航系统管理办公室. 2016. 发射记录. <http://www.beidou.gov.cn/xtjs.html>
- 中国卫星导航系统管理办公室. 2017. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件(公开服务信号B1C、B2a(测试版))
- 周江文. 1979. 误差理论. 北京: 测绘出版社
- Boehm J, Niell A, Tregoning P, Schuh H. 2006. Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. *Geophys Res Lett*, 33: 107304
- Davis J L, Herring T A, Shapiro I I, Rogers A E E, Elgered G. 1985. Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Sci*, 20: 1593-1607
- Kleusberg A, Teunissen P J G. 1998. GPS for Geodesy. Heidelberg: Springer-Verlag
- Yang Y, Li J, Xu J, Tang J. 2011. Generalised DOPs with consideration of the influence function of signal-in-space errors. *J Navigation*, 64: S3-S18

(责任编辑: 杨元喜)