



相位实时差分技术应用于飞行器交会对接研究

阳仁贵*, 袁运斌, 欧吉坤

中国科学院测量与地球物理研究所动力大地测量重点实验室, 武汉 430077

* E-mail: yangrg@asch.whigg.ac.cn

收稿日期: 2010-04-07; 接受日期: 2010-04-08

国家杰出青年科学基金(批准号: 40625013)、广东省中国科学院全面战略合作项目(编号: 2009B091300059)、国家自然科学基金(批准号: 40890160)和国家高技术研究发展计划(编号: 2007AA12Z311)资助项目

摘要 空间飞行器交会对接需要实时高精度地确定两飞行器的相对位置. 应用 GNSS 引导两飞行器交会对接, 是 GNSS 差分原理的一种特殊应用. 星载接收机提供的载波相位观测值是高精度定位的基础, 但是如何实时可靠地固定相位模糊度仍然是关键技术, 提出了一种有效的模糊度实时解算算法, 即在宽巷组合的基础上附加选权约束来固定两种不同波长的宽巷模糊度, 然后依据组合法直接求解 L1 和 L2 相位模糊度整数解. 实验结果显示, 应用该算法进行模糊度单历元实时解算时, 15 km 以内的短基线, 解算成功率大于 99%, 能满足实时交会对接定位精度的要求. 为了验证该算法在空间飞行器对接中的应用, 采用仿真的方法模拟了两飞行器逼近和离开的过程, 模拟并实时输出星载 GNSS 观测量. 进而应用新算法实时估计两飞行器间相对位置, 精度达到厘米级水平. 我们的研究不但能进一步完善 GNSS 相位模糊度解算理论与方法, 也可促进 GNSS 在航空飞行器编队飞行和交会对接等相关领域的应用.

关键词 交会对接, GNSS 精密定位, 相位模糊度, 选权拟合法

PACS: P228.4, P227, V526, V476

空间飞行器交会对接需要实现高精度高可靠性地相对定位和定速, 以便控制系统实时地获得两飞行器间相对位置和速度信息. 在交会对接过程中, 飞行器绝对位置只用导航解就能满足定位要求, 关键是要实时高精度测定飞行器间的相对位置、相对速度及飞行姿态等. 在用 GNSS 进行空间飞行器交会对接定位方面, 国内外学者做了许多的研究^[1,2]. 美国于 1996 年在 STS-80 的交会过程中采用 GPS 伪距差分进行了空间相对定位试验. 日本 ETS-VII 卫星组在自动自主交会对接实验中, 采用了 GPS 伪距差分进行相对定位, 并将 GNSS 技术作为其测量导航的主要手段. 欧盟 ESA 于 1994 年启动了 ATV 的自动自主交会预

研(ARP)项目, GPS 也是其相对定位测量的主要手段. 资料显示, GPS 在这些方面的试验和应用主要采用伪距观测量. 伪距观测量由于精度较低, 所以定位精度不高, 难以满足交会对接逼近段高精度定位定速的需要.

精密的载波相位观测值(1~2 mm 精度)可以实现长时间段静态定位精度毫米级以下精度水平, 动态定位厘米到毫米水平^[3,4]. 但是, 载波相位观测值定位存在模糊度未知的问题, 如果能实时固定正确的相位模糊度, 载波相位可以作为高精度的伪距值进行精密定位^[5~14]. 因此, 实时可靠解算相位模糊度是应用 GNSS 进行空间飞行器交会对接精密定位的关

键技术.

星载 GNSS 接收机是在高速运动状态下进行信号接收, 历元间电离层等影响变化大^[15], 极易发生卫星跟踪中断现象, 这对需要利用较长时间观测数据固定模糊度的算法增加了如周跳实时探测、修复和参数增减等难度. 如果能实现相位模糊度单历元快速固定, 则可方便处理整周跳变、卫星失锁或新星出现等各种异常情况, 方便 GNSS 在上述不利条件下的应用.

本文总结作者及同行专家以往的研究经验^[11,16-20], 基于双频观测组合的方法, 提出了一种模糊度单历元可靠固定的有效方法: 采用附加选权约束的方法估计两个宽巷组合模糊度实数解, 然后固定其为整数, 再依据组合法求解原始单频相位模糊度整数解. 由于模糊度确定只用到单历元的观测数据, 不再需要进行初始化工作, 不需考虑周跳、卫星失锁和新卫星出现等问题, 也不像常规的 RTK 那样需要一台接收机保持静态观测, 因而适合无固定参考站实时相对定位. 多种地面静态实测数据计算结果显示, 利用该算法进行模糊度解算, 短基线(小于 15 km)单历元相位模糊度解算成功率达 99.5%以上, 错误的模糊度整数值也与真实值仅相差一周. 为了探讨空间交会对接 GNSS 精密实时定位的可行性, 本文还采用模拟的方法试验了两飞行器逼近和离开过程 GNSS 实时定位情况, 模糊度固定后, 单历元定位精度达到了厘米级水平.

1 空间飞行器交会对接GNSS实时定位基本原理

空间飞行器交会对接技术是载人航天的在轨基本技术, 主要研究两飞行器(追踪飞行器、目标飞行器)之间的相对运动, 实现追踪飞行器和目标飞行器的绝对定位定速和相对定位定速. 为了实现轨道交会, 首先要准确测定目标飞行器的轨道, 地面按照目标航天器轨道发射追踪飞行器, 等待与目标飞行器实现轨道交会. 空间交会对接按照追踪飞行器和目标飞行器之间的距离大致可分为以下几个阶段: 远程导引段、自动追寻段、接近和逼近段、对接段. 为完成所有这些阶段对飞船的控制和导航任务, 控制系统需要实时获得两飞行器的绝对位置、绝对速度、相

对位置、相对速度和时间等测量数据. 应用 GNSS 定位技术, 可以提供从远程导引到逼近段的定位信息. 对交会对接来说, 关键是需要实时地高精度地确定两飞行器间的相对位置、相对速度和姿态, 而对绝对位置精度要求不高, 一般的导航解(10 m 以内)就可满足定位要求. 为了实时获得飞行器高精度的相对位置信息, 采用星载 GNSS 接收机提供的载波相位进行差分定位, 是一种重要的定位手段.

由 GNSS 理论可知, 如果两接收机天线的距离在 15 km 以内, 高差不大, 电离层误差和对流层误差的影响可以忽略, 那么单历元码和相位双差方程为

$$P_{1,2,F}^{ij}(t) = \rho_{1,2}^{ij}(t) + \varepsilon_{1,2,F}^{ij}(t), \quad (1)$$

$$L_{1,2,F}^{ij}(t) = \rho_{1,2}^{ij}(t) + \lambda_F N(t) + e_{1,2,F}^{ij}(t), \quad (2)$$

式中 t 为观测历元; P 和 L 分别为码和相位观测值; ρ 为站星之间距离; N 为相位模糊度; λ 为载波波长; ε 和 e 分别为码和相位的观测噪声; 下标 1 和 2 表示测站号, F 表示载波频率号; 上标 i 和 j 表示卫星号.

上式进行泰劳级数展开, 并保留一次项, 可得线性化表达式为

$$Ax - l_p = V_p, \quad (3)$$

$$Ax + Ba - l_L = V_L, \quad (4)$$

式中 A 和 B 分别为基线分量和模糊度参数的系数阵; x 为 3 维基线分量改正数向量; a 为模糊度参数向量; l_p 和 l_L 分别为码与相位方程的 O-C 项; V_p 和 V_L 表示噪声.

在上述单历元码伪距观测方程, 未知参数个数为 3, 而相位方程的未知参数个数为 $m+2$, m 为两接收机共视卫星个数. 方程(3)显示, 单历元码伪距观测方程的求解只要观测的卫星数不少于 4. 而单历元的相位观测方程, 由于观测值个数小于未知的参数个数, 所以方程是秩亏的, 采用常规的估计方法不能求解. 由模糊度解算理论可知, 当模糊度整数解正确固定后时, 载波相位就相当于精密伪距观测, 这时单历元的定位精度能达到厘米级精度水平.

相位与码联合解算虽然能实时输出定位结果, 但由于码伪距观测值精度较低, 不利于模糊度整数解的固定, 而浮点解的精度为伪距定位精度, 不能满足高精度定位的要求. 因此, 需要探讨新的估计方法, 促进模糊度整数解单历元内可靠的固定.

2 宽波相位法解算相位模糊度

双频相位观测值进行合适的组合, 可以生成具有不同特性的新相位观测值. 以周为单位的相位组合方式为

$$\Phi_{\alpha\beta} = \alpha\Phi_1 + \beta\Phi_2, \quad (5)$$

式中 α 和 β 为组合系数. 那么, 组合观测值对应的观测方程为

$$L_{1,2,\alpha\beta}^{ij}(t) = \rho_{1,2}^{ij}(t) + \lambda_{\alpha\beta} N_{\alpha\beta} + e_{1,2,\alpha\beta}^{ij}(t), \quad (6)$$

其中 $N_{\alpha\beta} = \alpha N_1 + \beta N_2$, $\lambda_{\alpha\beta} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\alpha \lambda_2 + \beta \lambda_1}$.

取 α 和 β 为合适的整数值, 不但使得宽波模糊度 $N_{\alpha\beta}$ 具有整数特性, 而且可使 $\lambda_{\alpha\beta}$ 的值远大于 λ_1 和 λ_2 . 这时, 固定 $N_{\alpha\beta}$ 为整数值比直接固定载波 L1 和 L2 的模糊度更容易.

表 1 给出了宽波组合观测量及噪声、电离层和多路径的影响. 由表 1 可以看出, 在宽波 EW 组合中, 虽然组合相位对应的波长为 1465.3 cm, 远远大于 L1 的波长, 有利于固定整周模糊度, 但因组合观测值的噪声误差也高达 L1 的 12.64 倍, 而且残余的双差电离层误差也扩大了约 4.55 倍, 所以又妨碍了模糊度整数解的解算.

不同宽波组合比较分析显示, 大于波长 λ_1 的 W1, W2, W3 和 W4 等组合, 都有利于固定模糊度, 但由于 WL 组合降低了电离层误差的影响, 因此该组合方法被广泛应用. 组合相位观测值 W1, W2, W3, W4 和 EW 的波长虽然依次增大, 但组合的同时也增大了噪声和电离层延迟等残余误差的影响, 较大的噪声和残余误差又将影响模糊度整数解的固定.

3 双宽巷组合法直接计算相位模糊度

宽波相位模糊度固定后, 虽然可以得到一个定位结果, 但因组合观测量增大了噪声和残余误差幅度, 定位结果精度不高. 因此, 还需要继续固定载波 L1 和 L2 相位双差模糊度, 以获得最佳的定位精度.

由(5)式可知, 当设置另一组组合系数 (γ, μ) 时, 可以得到另一个组合观测方程:

$$L_{1,2,\gamma\mu}^{ij}(t) = \rho_{1,2}^{ij}(t) + \lambda_{\gamma\mu} N_{\gamma\mu} + e_{1,2,\gamma\mu}^{ij}(t), \quad (7)$$

联合(6)和(7)式, 可同时求出两组宽波模糊度 $N_{\alpha\beta}$ 和 $N_{\gamma\mu}$. 再根据方程组(8), 可以直接计算出 L1 和 L2 的相位模糊度 N_1 和 N_2 .

$$\begin{pmatrix} N_{\alpha\beta} \\ N_{\gamma\mu} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \mu \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

当 $\alpha\mu - \gamma\beta \neq 0$ 时, 由(8)式反算的载波相位 L1 和 L2 的双差模糊度 N_1 和 N_2 也为整数, 而且只要宽波模糊度 $N_{\alpha\beta}$ 和 $N_{\gamma\mu}$ 固定正确, 由(8)式得到的 N_1 和 N_2 也必为正确的模糊度整数解.

4 附加选权约束解算单历元宽巷模糊度

单历元宽巷相位观测方程, 未知参数多于观测方程个数. 如果码观测值精度较好, 可与码联合解算. 当码观测值精度较低时, 可直接利用解秩亏方程的算法进行模糊度实数解有偏估计^[5,11,17-20].

由于宽波相位波长较长, 所以在线性化初始值满足合适精度的情况下, 通过选权拟合估计方法, 可以较可靠地解算相位模糊度实数解.

由方程(4), 设权阵为 W , 可得最小二乘法方程为

表 1 部分相位宽波组合特性

LC	α	β	λ_{LC} (cm)	λ_{LC}/λ_1	与 L1 比较/周		
					噪声	电离层	多路径
L1	1	0	19.0	1	1	1	0.25
L2	0	1	24.4	1.28	1.17	1.28	0.25
WL	1	-1	86.2	4.54	1.54	-0.28	0.50
W1	-1	2	34.1	1.79	2.54	1.57	0.75
W2	-2	3	56.4	2.97	4.04	1.85	1.25
W3	-3	4	162.8	8.57	5.56	2.13	1.75
W4	4	-5	183.2	9.64	7.08	-2.42	2.25
EW	-7	9	1465.3	77.12	12.64	4.55	4.00

$$\begin{pmatrix} A^T W A & A^T W B \\ B^T W A & B^T W B \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{a} \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{a} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} A^T W l_L \\ B^T W l_L \end{pmatrix}. \quad (9)$$

设选权拟合约束矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} E_{3 \times 3} & 0_{3 \times (m-1)} \\ 0_{(m-1) \times 3} & 0_{(m-1) \times (m-1)} \end{pmatrix},$$

根据正则化的基本原理, 可得如下约束法矩阵:

$$M_R = M + \mu \cdot R = \begin{pmatrix} A^T W A + \mu E & A^T W B \\ B^T W A & B^T W B \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中 μ 为正则化参数, E 为约束矩阵. E 阵的设置方法见^[5,8,11].

于是, 可获得选权约束后的基线分量和模糊度浮点解为

$$\begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{a} \end{pmatrix} = M_R^{-1} \begin{pmatrix} A^T W l_L \\ B^T W l_L \end{pmatrix}. \quad (11)$$

设 $M_R^{-1} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$, 那么模糊度的误差阵为

$Q_a = \sigma_0^2 \cdot M_{22}$. 以实数解 $\hat{a}$ 和误差矩阵 Q_a 建立模糊度整数解固定准则, 采用合适的搜索算法, 可固定模糊度为整数值. 为了提高模糊度搜索效率, 可采用部分搜索的方法进行^[11].

选权拟合方法是挖掘先验信息选择构建拟合矩阵来约束法方程的病态问题, 要求初始的绝对位置和相对位置满足一定的精度要求, 而空间飞行器交会对接这种无固定参考站的相对定位, 因此需要预先采用一些方法提高初始位置计算精度^[16]. 初始相对位置一般由单历元的码观测值差分计算得到, 如果多路径误差能限制在一定的范围, 那么利用电离层误差组合的码观测值进行相对定位完全能满足此精度要求.

5 算例分析

(i) 静态观测数据单历元处理 为了验证上述方法的有效性, 选择 2006 年 6 月 12 日观测的一条长约 7.9 km 静态基线进行实验. 数据采样间隔为 1 s, 观测历元数为 6740, 共视卫星数均大于 4 颗. 为了确定单历元模糊度计算的正确性, 以全部数据计算的模糊度作为真值. 应用 Trimble 的 TGO 软件和中科院测地所开发的 GNSS 数据处理软件 GPSPRO 分别进行处理, 结果一致.

然后根据组合方程式, 设 $\alpha = 1$, $\beta = -1$, $\gamma = 4$, $\mu = -5$, 那么两宽波相位波长 $\lambda_{\alpha\beta}$ 和 $\lambda_{\gamma\mu}$ 分别约为 86.2 和 183.2 cm, 远大于 L1 和 L2 的波长(见表 1), 所以易于固定模糊度为整数. 然后从第一个历元开始, 依次计算单历元相位模糊度, 并与真值比较. 对应宽巷模糊度 $N_{\alpha\beta}$ 和 $N_{\gamma\mu}$ 的选权拟合法单历元解算结果如表 2.

表 2 显示, 附加选权约束的 WL 组合和 W4 组合单历元模糊度计算成功率均达到 100%, 因此应用(8)式反算 L1 和 L2 相位模糊度的成功率也为 100%. 当 L1 和 L2 相位模糊度正确求解后, 代入 L1 和 L2 双差观测方程, 即可获得厘米级精度的相对定位结果.

为了进一步验证上述单历元模糊度固定算法的效果, 下面用不同长度基线静态实测数据进行试验, 其结果表 3 所示.

在较长基线条件下应用单历元固定 N_{W4} 模糊度, 有极小部分历元与正确值有 1 周的偏差, 固定成功率大于 99.6%; 结合 WL 组合方程, 可以实现单历元 N1 和 N2 的模糊度成功率达到 99% 以上, 从而保证了相位实时相对定位的高可靠性和高精度的要求.

表 2 两种宽巷模糊度单历元解算结果

卫星对	观测历元数	宽巷模糊度 $N_{\alpha\beta}$			宽巷模糊度 $N_{\gamma\mu}$		
		模糊度	正确历元数	成功率 (%)	模糊度	正确历元数	成功率 (%)
5-9	2976	-24	2976	100	-112	2976	100
5-14	6740	-13	6740	100	-54	6740	100
5-15	3506	-18	3506	100	-92	3506	100
5-18	6740	-24	6740	100	-114	6740	100
5-21	1111	-18	1111	100	-100	1111	100
5-22	6740	-17	6740	100	-75	6740	100
5-30	6739	27	6739	100	134	6739	100
5-1	1212	-51	1212	100	-207	1212	100

表 3 模糊度计算成功率(%)

基线长度(m)	历元数	WL	W4
35	450	100	100
3220	3605	100	100
6577	3541	100	100
9553	3422	100	99.9
12472	4226	99.9	99.6

取地面上—车载动态试验数据进行分析, 基站在 15 km 以内. WL 组合计算的模糊度成功率为 99.8%, 而 W4 组合的成功率为 99.5%, 所以该算法在动态条件下也有良好的效果.

(ii) 空间飞行器 GNSS 模拟观测数据处理 利用仿真的方法模拟了两空间飞行器接近和离开的 GNSS 观测数据, 模拟数据的历元间隔为 1 s. 两飞行器的空间三维飞行轨迹如图 1 和 2 所示. 两飞行器间相对位置和相对距离随时间的变化(时间以历元号表示)如图 3 和 4 所示.

利用本文算法实时固定相位模糊度, 并比较基于整周模糊度的两飞行器之间基线分量计算值与仿

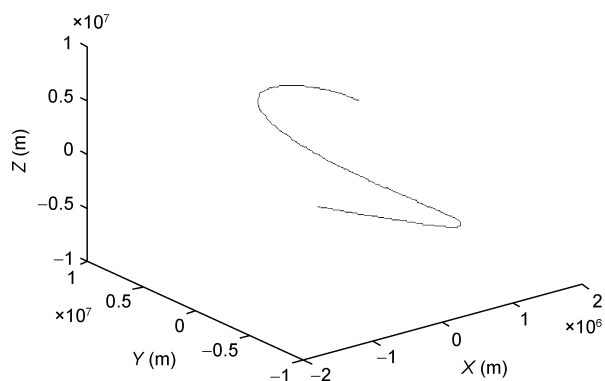


图 1 目标飞行器空间飞行轨迹

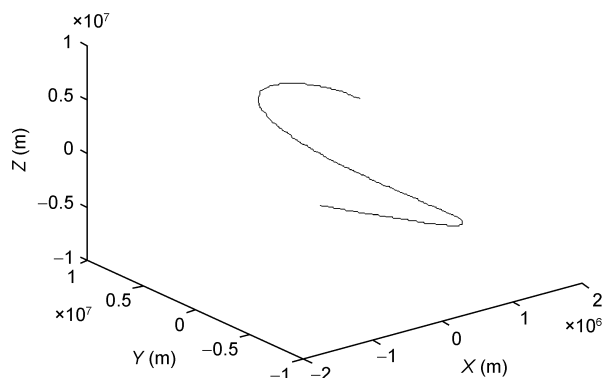


图 2 追踪飞行器运行轨迹

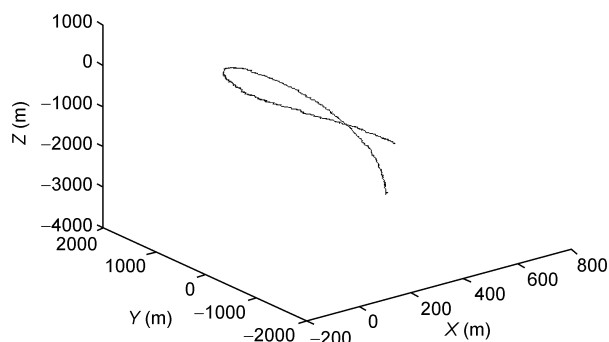


图 3 飞行器间相对位置变化图

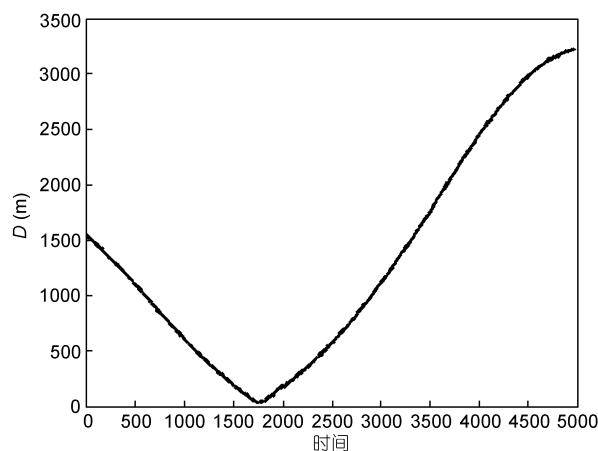


图 4 飞行器间相对距离变化图

真时的理论值作比较, 比较见图 5.

图 5 显示的是相位整数解固定后的基线分量计算值与理论值在三维方向和距离的差值. 由于在仿真时为了验证单历元模糊度固定算法的效果, 设置的相位噪声稍微偏大(1 cm), 所以虽然模糊度全部固定正确, 但是解算的基线分量与理论值仍然有厘米级的偏差. 另外利用飞机实测数据也验证了本文新方法的效果, 限于篇幅不在此作详细介绍.

6 结论

本文结合空间飞行器实时高精度相对定位的需要, 提出一种星载 GNSS 实时定位新算法. 算法分析和实验验证表明, 该算法不需探测和修复周跳, 也不需考虑新卫星出现和降落等问题, 仅利用单历元的双频码和相位观测数据就可以实时实现厘米级精度的精密相对定位.

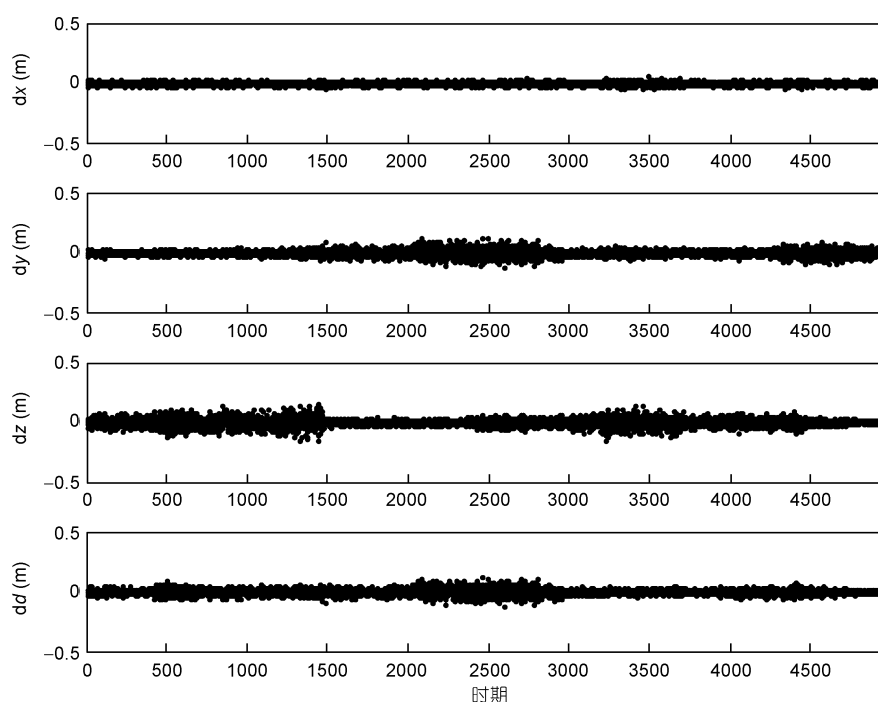


图5 两飞行器间基线分量计算值与仿真时的理论值比较

新算法具有如下特点:

(i) 不需要初始化过程: 无论是开始阶段, 还是运动过程出现卫星失锁或新卫星出现, 都能实时地进行处理。

(ii) 不同于常规的 RTK, 不需要静态观测数据, 不需要进行复杂的数据预处理, 不需要考虑相位是

否发生周跳。

(iii) 能实时确定和输出高精度(厘米级)的相对定位信息。

因此, 本文研究进一步完善了 GNSS 相位模糊度解算理论与方法, 有助于促进 GNSS 在空间飞行器编队飞行和交会对接等相关领域的应用。

参考文献

- 1 葛茂荣, 过静琚. GPS 相对导航在空间飞行器交会对接中的应用. 测绘通报, 1998, 5: 6—7
- 2 刘广军, 曾纪斌. GPS 动态相对导航用于空间飞行器交会对接的研究及其 OTF 解算方法. 飞行器测控学报, 2000, 19(2): 86—93
- 3 刘经南, 刘炎雄. GPS 定位技术进展. 全球定位系统, 2001, 25(2): 1—7
- 4 李征航, 何量华, 吴北平. 全球定位系统(GPS)技术的最新进展——第二讲网络 RTK. 测绘信息与工程, 2002, 27(2): 22—25, 32
- 5 阳仁贵, 欧吉坤. 提高 GPS 单频相位模糊度解算成功率的新方法. 南京航空航天大学学报, 2005, 37(3): 280—283
- 6 Yang Y X. Adaptively robust filtering for kinematic geodetic positioning. J Geodesy, 2001, 75(2-3): 109—116
- 7 Teunissen P J G. The success rate and precision of GPS ambiguities. J Geod, 2000, 74: 321—326
- 8 欧吉坤, 王振杰. 单频 GPS 快速定位中模糊度解算的一种新方法. 科学通报, 2003, 48(24): 2572—2575
- 9 Chansik P, Hsun K, Jang G L, et al. Efficient technique to fix GPS carrier phase integer ambiguity on-the-fly. IEE Proc-Radar Sonar Vavig, 1997, 144(3): 148—155
- 10 Wu J T. Processing mixed pseudo-range and carrier phase GPS data. Manuscr Geod, 1995, 20(1): 27—33
- 11 Yang R G, Ou J K, Yuan Y B, et al. Solving single-frequency phase ambiguity using parameter weights fitting and constrained equation ambiguity resolution methods. J Cent South Univ Technol, 2006, 13(1): 93—98
- 12 Huang D, Ding X, Chen Y. Ambiguity online estimation by combining dual-frequency phase and carrier smoothed code measurements: Performance on short baseline. Surv Rev, 2001, 36(283): 263—272

- 13 刘根友, 朱耀仲, 韩保明. GPS 单历元定位的阻尼 LAMBDA 算法. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(3): 195—197
- 14 喻国荣. 基于移动参考站的 GPS 动态相对定位算法研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2003. 60—69
- 15 袁运斌. 基于 GPS 的电离层监测及延迟改正理论与方法的研究. 博士学位论文. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2002
- 16 周江文, 黄幼才, 杨元喜, 等. 抗差最小二乘法. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997. 104—118
- 17 沈云中, 许厚泽. 不适定方程正则化算法的谱分解式. 大地测量与地球动力学, 2002, 22(3): 10—14
- 18 Xu P L, Cannon E, Lachapelle G. Stabilizing Ill-conditioned linear complementarity problems. J Geod, 1999, 73(2): 204—213
- 19 Luo X W, Ou J K, Yuan Y B. Regularization approach for fast integer ambiguity resolution of medium-long baseline GPS network RTK. Trans Nanjing Univ Aeronaut Astronaut. 2006, 23(3): 235—242
- 20 欧吉坤. 测量平差中不适定问题解的统一表达与选权拟合法. 测绘学报, 2004, 33(4): 283—288

Real-time GNSS carrier phase differential technique for spacecraft rendezvous and docking

YANG RenGui^{*}, YUAN YunBin & OU JiKun

Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

The spacecraft rendezvous and docking needs to determine the high precision real-time relative position and the relative velocity of the two aircraft in high precision real-time. Guiding two aircrafts with GNSS to dock is a special application of the GNSS differential principle. The GNSS carrier phase observables are the foundation for high precision positioning. However how to fix the real-time phase ambiguity are still the key technologies for the GNSS real-time application. This paper proposes an effective algorithm for single epoch ambiguity resolution: the fitting method by selection of parameter weights is used to resolve two kind wide lane ambiguities, and the L1 and L2 phase ambiguity are then resolved directly based on the combined wide lane ambiguities. Experimental results show that the success ratio of single epoch ambiguity resolution is larger than 99% for a baseline whose distance is less than 15 kilometer. Therefore this new algorithm can satisfy the demand of the real-time high precision positioning. In order to verify this algorithm in the application of the spacecraft rendezvous and docking, a simulation method is used to simulate the GNSS measurements and the process that two aircraft approach and leave. Then the new algorithm is applied to estimating the relative position between the two aircrafts using the simulation data, and it demonstrates that the relative position precision achieves the cm level. Therefore, this study will improve GNSS phase ambiguity resolution methods and advance GNSS applications in aviation aircraft formation flying and docking, and other related fields.

rendezvous and docking, GNSS precise positioning, phase ambiguity, fitting method by selection of parameter weights

PACS: P228.4, P227, V526, V448, V476