

DOI:10.13203/j.whugis20160024



文章编号:1671-8860(2018)02-0194-07

Bernese ECOM 光压模型在 BDS 卫星 精密定轨中的应用

王 琰¹ 郭 睿² 张传定² 胡小工³ 唐成盼³ 李 冉³ 潘军洋³

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450051

2 北京卫星导航中心,北京,100094

3 上海天文台,上海,200030

摘 要: Bernese ECOM 光压模型是目前 GNSS 导航卫星精密定轨中应用最多的经验型光压模型^[1],但是其应用到北斗导航卫星(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)精密定轨中,不一定 9 个参数全部解算定轨效果最佳。收集了 MGEX 一年的 BDS 精密星历,采用几何轨道平滑的方式反演出 ECOM 模型的 9 个光压参数,研究参数周年变化规律发现 B_c 、 B_s 参数与 Y_c 、 Y_s 相关性较强, B_c 、 B_s 存在明显的周年特性而且量级较 Y_c 、 Y_s 大。通过 ECOM 回归模型整体显著性检验,确定出 B_c 、 B_s 的显著性水平明显高于 Y_c 、 Y_s 。最后通过 MGEX 监测站的实测数据定轨,轨道和钟差精度评估结果表明,只解算 D_0 、 Y_0 、 B_0 、 B_c 、 B_s 5 个参数 BDS 定轨精度最高,建议 BDS 定轨中使用 5 参数 ECOM 光压模型。

关键词: Bernese ECOM 光压模型;相关性分析;显著性检验;BDS;精密定轨

中图法分类号: P228

文献标志码: A

卫星精密轨道确定中光压建模一直是一个重要研究课题。GPS 卫星导航系统是目前力学机理模型较为清楚的导航系统,其定轨精度从最初的米级提高到现在的厘米级,很大一部分得益于光压模型的不断的精化^[2]。北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)是中国自主研发的卫星导航系统,与其他导航系统相比,中国的 BDS 系统由 GEO、IGSO、MEO 三类卫星组成,目前 BDS 卫星定轨精度尚没有达到 GPS 那样的定轨精度,一个很大的原因就是没有建立适合这三类卫星的光压模型,因此应该根据这三类卫星的轨道、姿态、物理特性建立不同的光压模型,以期提高这三类卫星定轨的精度。

回顾 GPS 光压模型建模的历程,一般分为分析型光压模型、经验型光压模型、半分析半经验型光压模型。分析型光压模型主要有 ROCK 模型^[3]、T10/T20/T30 模型^[4];经验型光压模型有 Colombo 模型^[5]、JPL 使用的 GSPM(GPS solar pressure model)模型^[6]、CODE 建立的 ECOM 模型、BERNE1、BERNE2^[2,7];半分析型半经验型光

压模型有 Adjustable box-wing 模型^[8]。Bernese ECOM 光压模型是 CODE 针对 GPS 卫星建立的经验型光压模型,该模型是目前 IGS 几大分析中心定轨软件中使用最多、定轨效果较好的光压模型。该模型认为太阳是引起轨道共振的激发源,因此与 Colombo 模型的 RTN 方向不同,ECOM 模型在 DYB 坐标轴下,采用 3 个相互正交方向上分别使用 3 组参数(共 9 个参数)来吸收残余摄动力影响,可使定轨精度达到厘米级。但是由于该模型吸收了其他一些未能建模的摄动力,其模型的意义已不再是单纯的光压摄动,更确切的是将物理机理不清楚的力学因素用 9 参数函数模型来表达,因参数的时效性有限,定轨时需分段逼近。但是该模型包含的估计参数较多,由于定轨参数间的相关性,并非解算全部 9 参数会得到最优解,故结合每个参数的贡献大小和显著性水平寻求最佳的参数组合,以期提高卫星定轨精度。对于 GPS 卫星定轨,目前普遍认为定轨效果比较好的办法是只解算 D 、 Y 、 B 轴上长期项 D_0 、 Y_0 、 B_0 和 B 轴上的周期项 B_c 、 B_s 共 5 个参数,武汉大学

收稿日期:2016-07-05

项目资助:国家自然科学基金(41374038, 41204022)。

第一作者:王琰,博士生,主要从事测量数据处理理论与方法研究。wanglyan.hi@163.com

通讯作者:张传定,博士,教授。13607665382@163.com

PANDA 软件中采用的就是这样的方式^[9-11],但是这只是经验上的设定,并没有文献通过理论上的分析去说明,甚至是否还有更优的参数解算方式,这都是值得研究的。另外,ECOM 模型是针对 GPS 卫星建立的,GPS 全部是由 MEO 卫星组成,该模型用到 BDS 上未必合适,比如 BDS 中 GEO 采用零偏航的姿态控制模式,这与 ECOM 模型的建立方式有偏差,因此也应该进行相关的研究。

文献[12]使用了 GPS 的 SP3 精密星历,对 GPS 卫星的 ECOM 光压模型参数进行了统计分析,对于 GPS 卫星定轨估计 8 个参数较为合理。文献[2]基于历史的 GPS 精密星历研究了光压参数的变化规律,并将其的一部分参数固定,形成了新的光压模型 CODE98,该模型特别适合 GPS 卫星快速定轨和预报。这两种方法为 BDS 光压模型的研究提供了思路,但也存在些问题,如文献[13]研究采用了轨道拟合的方式,而用实测 L 波段的载波和相位观测数据进行定轨时,定轨的观测方程与轨道拟合的观测方程形式不同,轨道拟合时的设计矩阵 A 和 B 实际为状态转移矩阵 Φ 和敏感矩阵 S ,而采用 L 波段的观测数据定轨时观测方程中的设计矩阵还需乘上测站至卫星方向的 3 个方向余弦,因此仅靠轨道拟合方式得到的光压参数组合在采用实测 L 波段数据定轨时并不一定是效果最佳的;而 CODE98 将一部分参数固定,实际定轨时这部分参数的不确定度很可能会被其他参数吸收,参数也失去了原来的意义。而且这两种方式都是针对 GPS 卫星的,因此本文借鉴这两种处理方式,分析 ECOM 模型在 BDS 定轨中参数最佳的组合方式。将一年的 BDS 精密星历作为观测量进行轨道拟合,对拟合得到的 9 个参数时间序列进行分析,研究参数的量级以及变化规律,结合参数相关性分析结果,构建线性回归参数显著性假设,最终确定出参数的最佳组合方式,最后利用 MGEX 实测数据进行定轨,轨道和钟差比较结果表明,只解算 D_0 、 Y_0 、 B_0 、 B_c 、 B_s 共 5 个参数定轨效果最佳。

1 ECOM 光压模型

ECOM 光压模型定义 e_D 、 e_y 、 e_B 作为 3 个基本坐标单位向量, e_D 为卫星至太阳方向单位向量,正向指向太阳, e_y 为卫星至地心方向的单位向量, e_B 为卫星太阳帆板轴向单位向量, e_x 、 e_y 、 e_z 为星固坐标系坐标轴的单位向量,有 $e_y = e_z \times$

$$e_D \cdot e_x = e_y \times e_z, e_B = e_D \times e_y^{[8]}。$$

ECOM 模型加速度计算公式如下:

$$a_s = \frac{a_u^2}{|r_s - r|^2} [D(u) \cdot e_D + Y(u) \cdot e_y + B(u) \cdot e_B] \quad (1)$$

其中

$$D(u) = D_0 [\lambda \text{SRP}(1) + \text{SRP}(4) \cdot \cos(u) + \text{SRP}(5) \cdot \sin(u)] \quad (2)$$

$$Y(u) = D_0 [\text{SRP}(2) + \text{SRP}(6) \cdot \cos(u) + \text{SRP}(7) \cdot \sin(u)] \quad (3)$$

$$B(u) = D_0 [\text{SRP}(3) + \text{SRP}(8) \cdot \cos(u) + \text{SRP}(9) \cdot \sin(u)] \quad (4)$$

式中,SRP(i)($i=1,2,\dots,9$)为待估参数; u 定义为卫星在轨道平面上距升交点的角度; λ 为阴影因子; α_u 代表天文单位的长度; r_s 、 r 分别为惯性系下太阳和卫星的位置; D_0 为与卫星型号有关的面质比参数,其取值与卫星型号以及质量有关。

2 BDS 光压参数相关性分析

线性化后的定轨观测方程可写为:

$$AX + BY + \Delta = L \quad (5)$$

其中, X 为定轨基本参数,即系统参数; Y 为附加参数; Δ 为观测误差; L 为观测量。参数相关性分析时 X 为 6 个轨道根数,而 Y 为 ECOM 模型的 9 个光压参数。

对光压模型参数的相关性检核的具体方法如下:使用 2014 年的 GFZ 解算的 BDS 星历作为伪观测值,选择 6 个轨道根数及 9 个光压参数作为解算参数,形成观测方程并得到权逆阵,并按式(6)计算相关系数:

$$p_{ij} = q_{ij} / (\sqrt{q_i q_j}) \quad (6)$$

式中, q_{ij} 为权逆阵第 i 行第 j 列元素; q_i 、 q_j 为权逆阵对角线第 i 、 j 元素。统计每天每颗卫星解算的相关系数大于 0.80 的参数对,一年中超过 30 d 都相关的参数对情况如表 1。

以 C03 卫星为例,解算出来的相关系数一年的变化情况如图 1,其他卫星与此类似。

从表 1 中看出,所有卫星 D_0 参数与 D_c 和 D_s 强相关,而 Y_s 与 B_c 、 B_s 与 Y_c 强相关;除了 C01、C02、C04、C07 卫星外,其他卫星 Y_0 与 Y_s 强相关;而对于 GEO 和 MEO 卫星 Y_0 与 Y_c 参数强相关,对于 IGSO 卫星则相关性较弱。

其中, D_0 参数代表对日方向的加速度,所以 D_0 参数是必须解算的, D_c 、 D_s 参数就不需要解算,对于其他 4 个参数 Y_c 、 Y_s 、 B_c 、 B_s 是否解算,

需要进行参数的显著性检验,与文献[13]的处理方式不同,因为实测数据定轨时的法方程与轨道拟合的法方程不同,故本文除了通过统计检验的方式进行参数的显著性分析,还对这4个参数一年的时间序列进行分析,从参数的量级以及参数的年变化规律分析参数可解与参数不需要解算的情况。

的光压参数是不稳定的,剔除这两段时期的数据进行统计,可以看出 B_c 、 B_s 参数存在一个以年为单位的周期项,而且 B_c 、 B_s 参数的量级要比 Y_0 、 Y_c 、 Y_s 参数的大,这5个参数的均值 mean 和均方根 RMS 如表 2。

表 2 C01 卫星 5 参数的均值和均方根/($10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

Tab.2 The Mean and RMS of 5 Parameters of Satellite C01/($10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)

参数	Y_0	Y_c	Y_s	B_c	B_s
mean	-0.221	-0.157	-0.145	-0.448	-0.107
RMS	0.862	0.892	0.924	5.371	3.846

为了分析 B_c 、 B_s 参数的周期特性,下面采用快速傅里叶变换对 B_c 、 B_s 参数周期进行分析,详细步骤如下:

- 1)数据预处理,对剔除的粗差点进行插值处理,得到等间隔的参数时间序列;
- 2)利用谱分析方法对数据进行分析,得到频谱图;
- 3)选择最大周期,对光压序列进行拟合,拟合的结果与原始的序列如图 3、图 4。

3.2 参数的显著性检验

参数的显著性检验采用文献[13]的方式进行,通过不同类型参数定轨结果方差比的 F 检验方法来实现。

构造原始假设 $H_0: \sigma_0^2 = \sigma_1^2$

备选假设 $H_1: \sigma_0^2 < \sigma_1^2$

实际计算中 σ_0^2 取为 9 参数模型计算得到的单位权中误差,即 $\sigma_0^2 = \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} / t$, t 为多余观测数; \mathbf{V} 为采用 9 参数模型定轨得到的观测量验后残差; $\sigma_1^2 = (\mathbf{V}_1^T \mathbf{P} \mathbf{V}_1 - \mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}) / t_0$, 其中 t_0 为待检核的参数数量,比如仅仅要检核光压参数 $\text{SRP}(i)$, 则 $t_0 = 8$; \mathbf{V}_1 为不估计检核参数 $\text{SRP}(i)$ 得到的残差。若统计量 σ_1^2 / σ_0^2 大于由给定显著水平及子样容量确定的 F 分布积分上限,则说明这些参数是显著的,应该在模型中体现,否则说明该参数在定轨中可不估计。

采用上节 GFZ 解算的一年的精密星历作为伪观测量,每天一个弧段依次对 Y_c 、 Y_s 、 B_c 、 B_s 共 4 个参数进行显著性检验,给定显著性水平 0.05, 得到 $F_{0.05}(1, 270) = 3.880$, 则方差比超过该值就认为该参数是显著的,统计 4 个参数这一年中通过显著性检验的比率,见表 3。

从表 3 中看出, B_c 、 B_s 参数通过检验的比率明显大于 Y_c 、 Y_s 参数,而且 GEO 卫星更明显,这说明 Y_c 、 Y_s 的显著性较弱,为了检验不解算 Y_c 、

表 1 BDS 定轨中 ECOM 模型 9 参数相关性分析

Tab.1 Correlation Analysis of Nine Parameters of ECOM in BDS POD

卫星号	参数 1	参数 2
所有卫星 C01-C14	D_0	D_c
	D_0	D_s
	Y_s	B_c
	B_s	Y_c
C02, C03, C10, C11, C12, C13, C14	Y_0	Y_c
C03, C05, C06, C08, C09, C10, C11, C12, C13, C14	Y_0	Y_s

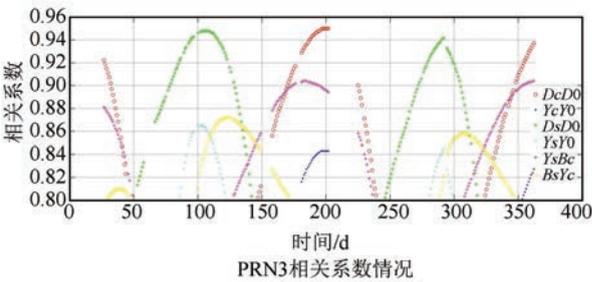


图 1 C03 卫星一年的相关系数变化情况

Fig.1 One Year's Correlation Coefficient of Satellite C03

3 光压参数的周年特性分析与显著性检验

3.1 参数周年特性分析

以 C01 卫星为例, Y_0 、 Y_c 、 Y_s 、 B_c 、 B_s 参数一周年的序列值如图 2。

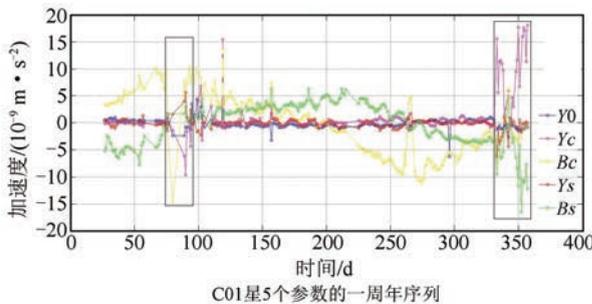


图 2 C01 卫星 Y_0 、 Y_c 、 Y_s 、 B_c 、 B_s 参数一周年的变化情况

Fig.2 One Year's Time Series of Y_0 、 Y_c 、 Y_s 、 B_c 、 B_s Parameters

图 2 中方框内的时期为地影期,这段时间内

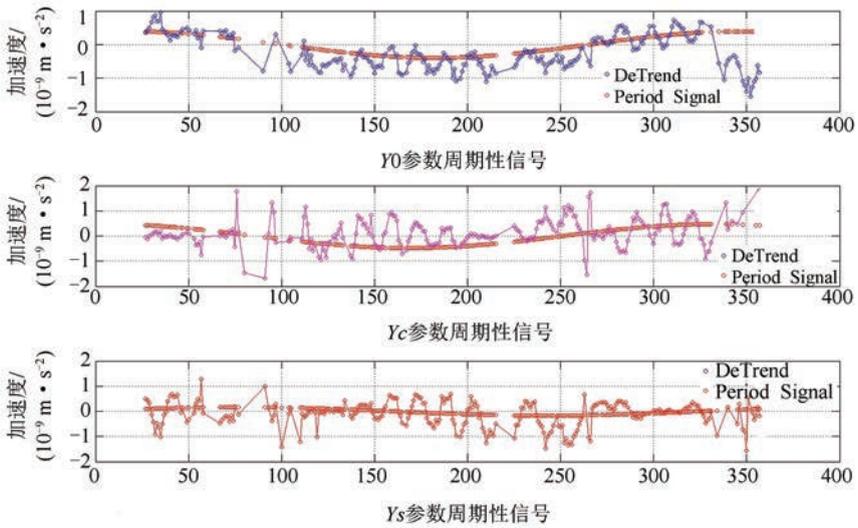


图 3 C01 卫星 Y 轴 3 个参数周期特性分析

Fig.3 Periodic Analysis Results of Three Parameters in Y Axis of Satellite C01

Ys 参数的定轨效果,与文献[12]的方式不同,本文采用 L 波段实测数据定轨来验证。

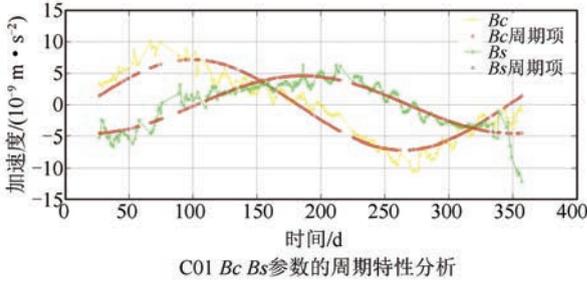


图 4 C01 卫星 Bc、Bs 参数周期特性分析

Fig.4 Periodic Analysis Results of Bc、Bs Parameters of Satellite C01

表 3 14 颗卫星 4 个参数显著性检验通过的比率/%

Tab.3 Passing Rate of 4 Parameters Significance Test of 14 Satellites/%

	Yc	Ys	Bc	Bs
C01	20.14	24.73	43.11	47.35
C02	4.53	5.66	28.68	24.53
C03	7.43	11.52	29.74	29.74
C04	18.84	18.49	40.75	34.59
C05	9.84	8.85	30.16	30.16
C06	24.84	22.93	47.13	39.81
C07	22.68	24.28	40.58	52.40
C08	19.86	21.63	37.59	41.13
C09	27.94	30.79	47.62	43.81
C10	27.16	28.75	41.85	42.17
C11	24.48	23.22	62.15	60.25
C12	22.27	20.06	55.52	54.89
C13	26.10	23.66	65.85	58.54
C14	24.75	22.85	66.46	60.13

4 实测数据定轨结果分析

收集了 2014 年年积日 069-079 期间共 50 个 MGEX 监测站的数据进行定轨,测站分布如图 5,设计 3 种不同的参数解算方案:

方案 1 解算 D0、Dc、Ds、Y0、Yc、Ys、B0、Bc、Bs;

方案 2 仅解算 D0、Y0、Yc、Ys、B0、Bc、Bs;

方案 3 仅解算 D0、Y0、B0、Bc、Bs。

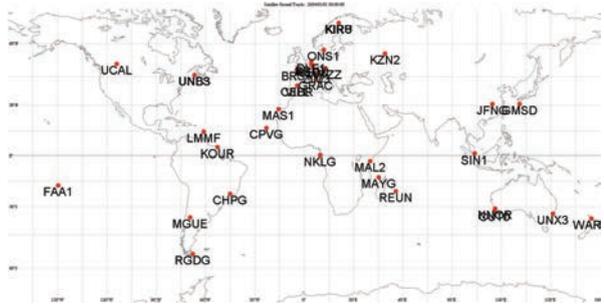


图 5 测站分布图

Fig.5 Distribution Diagram of Monitor Stations

定轨采用的模型和参数如下:观测量采用 B1、B2 频点无电离层组合伪距和相位非差观测量;解算弧段为 3 d,采样间隔为 300 s;截止高度角 7°;EOP 参数固定为 IERS C04 值;模糊度采用浮点解;跟踪站坐标固定为 GPS PPP 结果;测站潮汐改正考虑地球固体潮、固体极潮、海洋极潮、测站海潮;对流层采用 Saastamoinen + GMF 估计湿延迟参数。

在定轨解算过程中,考虑的摄动力模型包括以下几项:JPL DE405 太阳、行星摄动,EGM96 10×10 阶重力场模型,IERS-Conventions 2010 地球固体潮、海潮、地球极潮、海洋极潮,积分器采用的是 RKF6/7 起步、Adams 预报校正多步法。

采用内符和外符两种方式评估 3 种方案的定轨结果:①重叠弧段比较;②与 GFZ 结果进行比较。

4.1 重叠弧段比较结果

统计 3 种方案 10 d 定轨结果,采用 3 d 重叠 2 d 的方式评估 3 种方案的定轨精度,比如“069-070-071”和“071-072-073”两个 3 d 弧段,统计重叠 071 天的结果,10 d 共重叠第 7 d,给出 7 d 的平均值,分别采用径向和用户距离误差(user range error, URE)衡量 3 种方案的定轨精度。URE 是卫星轨道误差在全球范围内用户观测方向上投影的平均值,表征了导航卫星轨道误差对用户测距的影响^[15],计算公式为:

$$URE_{BDS(GEO,IGSO)} = \sqrt{(0.99\Delta R)^2 + \frac{1}{127}(\Delta T^2 + \Delta N^2)}$$

$$URE_{BDS(MEO)} = \sqrt{(0.98\Delta R)^2 + \frac{1}{54}(\Delta T^2 + \Delta N^2)}$$

式中,ΔR、ΔT、ΔN 分别为卫星轨道在 R、T、N 方向上的误差。

重叠弧段比较结果如图 6,可以看出:无论是径向还是 URE,方案 3 的定轨精度都是最佳,方案 3 相对方案 1 径向提高 72.9%, URE 提高 58.6%。

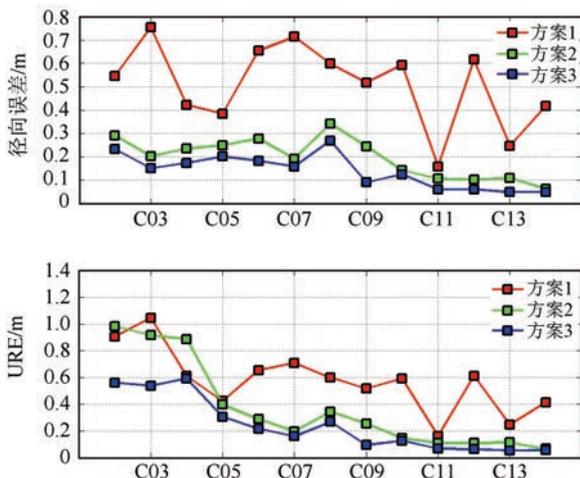


图 6 重叠弧段径向和 URE 比较结果

Fig.6 Radial Error and URE of Overlapped-arcs

4.2 与 GFZ 结果比较

统计 3 种方案 10 d 定轨结果,将结果与 GFZ 解算结果进行比较,GFZ 目前提供了多系统星历产品的解算策略^[15],10 d 的平均值结果如表 4。可以看出:对于 GEO 卫星,方案 3 中 R、N 两个方向精度明显高于方案 2,但是 T 方向的精度最差,这与文献[11]的结果一致,文献[11]采用切向经验力补偿了 GEO 卫星切向残余的摄动力,提高了 GEO 卫星定轨的切向精度^[11];对于 IGSO/MEO 卫星,在 R、T、N 方向上方案 3 的定轨结果都是最佳的,IGSO 卫星方案 3 相对于方案 1,3 个方向分别提高 82.92%、17.70%、31.86%,MEO 卫星方案 3 相对于方案 1,3 个方向分别提高 61.02%、15.30%、25.84%。

比较 3 种方案 10 d 定轨解算的钟差结果,比较时需要消除两家定轨结果中不同的钟差基准影响,通常采用所谓的“二次差”法^[13],本文选择 C01 卫星作为参考星,然后其他卫星计算的钟差结果相对 C01 卫星的钟差做一次差,并将消除了基准钟差影响的计算结果之间做二次差,统计其他卫星的 RMS 值,结果如图 7。

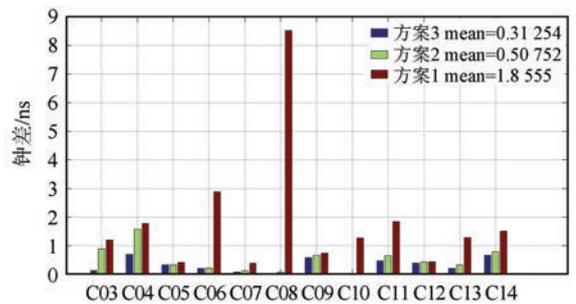


图 7 3 种方案钟差解算结果的比较

Fig.7 Clock Resolving Result of Different Scheme

从图 7 的结果可以看出,方案 3 的钟差之差的均值为 0.31 ns,方案 2 的钟差之差的均值为 0.51 ns,方案 1 的钟差之差的均值为 1.86 ns,方案 3 的结果最好,这与轨道的评估结果一致。

5 结 语

BDS 卫星精密定轨中应用最多的经验型光压模型是 ECOM 模型,但是该模型解算参数较多,不一定解算全部参数定轨效果最佳,因此本文针对 ECOM 模型在 BDS 定轨中的应用特性,分析参数的特性,寻求最佳的参数组合方式,以期提高 BDS 卫星精密定轨的精度,主要结论如下。

表 4 3 种方案定轨精度比较结果/m

Tab.4 POD Accuracy Comparison of Different Schemes/m

	方案 1			方案 2			方案 3		
	R	T	N	R	T	N	R	T	N
C01	0.505	5.260	0.516	0.348	7.634	0.457	0.266	8.798	0.301
C03	1.030	5.084	0.324	0.205	5.831	0.246	0.161	5.427	0.153
C04	0.644	1.813	0.396	0.630	2.931	0.389	0.466	2.588	0.145
C05	0.739	3.573	0.374	0.263	4.160	0.236	0.191	4.095	0.198
mean	0.730	3.933	0.403	0.362	5.139	0.332	0.271	5.227	0.199
C06	0.892	0.634	0.340	0.217	0.635	0.303	0.141	0.575	0.275
C07	0.564	0.512	0.379	0.173	0.462	0.337	0.107	0.367	0.222
C08	1.791	0.509	0.379	0.395	0.468	0.364	0.235	0.490	0.255
C09	0.861	0.592	0.285	0.270	0.669	0.248	0.196	0.587	0.190
C10	0.782	0.492	0.311	0.234	0.275	0.257	0.154	0.238	0.212
mean	0.978	0.548	0.339	0.258	0.502	0.302	0.167	0.451	0.231
C11	0.294	0.284	0.241	0.112	0.278	0.212	0.098	0.302	0.213
C12	0.259	0.348	0.219	0.125	0.310	0.169	0.100	0.283	0.193
C13	0.211	0.294	0.340	0.132	0.276	0.304	0.104	0.248	0.204
C14	0.253	0.330	0.268	0.112	0.261	0.244	0.094	0.231	0.180
mean	0.254	0.314	0.267	0.120	0.281	0.232	0.099	0.266	0.198

1) 将 2014 年 GFZ 解算的 BDS 星历作为伪观测值, 采用几何轨道平滑的方式, 解算出 ECOM 模型的 9 个光压参数, 统计了这 9 参数一年的相关性、量级及周期特性, 发现 B_c 、 B_s 参数存在明显的周年特性, 而 Y_c 、 Y_s 则不明显, 且 B_c 、 B_s 的量级较 Y_c 、 Y_s 高, 参数显著性检验也证明 B_c 、 B_s 参数的显著性水平明显高于 Y_c 、 Y_s ;

2) 采用 MGEX 实测数据进行定轨, 根据以上分析的参数不同的组合方式, 选择了 3 种不同的方案, 分别采用内符合和外符合两种方式评估 3 种方案定轨精度, 结果表明: 只解算 D_0 、 Y_0 、 B_0 、 B_c 、 B_s 5 个参数定轨效果最佳, 因此建议 BDS 定轨中使用 5 参数的 ECOM 经验型光压模型。

参 考 文 献

[1] Beutler G, Brockmann E, Gurtner W, et al. Extended Orbit Modelling Techniques at the CODE Processing Center of the International GPS Service for Geodynamics(IGS): Theory and Initial Results [J]. *Manuscr Geod*, 1994, 19:367-386

[2] Springer T A, Beutler G, Rothacher M. A New Solar Radiation Pressure Model for the GPS Satellites [J]. *GPS solutions Berne*, 1999, 2(3):50-62

[3] Fliegel H F, Gallini T E. Global positioning System Radiation Force Model for Geodetic Application[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B1): 559-568

[4] Fliegel H, Gallini T. Solar Force Modeling of Block IIR Global Positioning System Satellites[J]. *Spacecraft Rockets*, 1996, 33(6):863-866

[5] Marek Z. High Precision Analytical Solar Radiation

Pressure Modeling for GNSS Spacecraft[D]. London: University College London, 2001

[6] Bar-Sever Y, Kuang D. New Empirically Derived Solar Radiation Pressure Model for GPS Satellites [C]. *Interplanetary Network Progress Report*, California, USA, 2004

[7] Chen Junping, Wang Jiexian. The Solar Radiation Pressure Model in the GPS Orbit Determination [J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, 47(3): 310-319(陈俊平, 王解先. GPS 定轨中的太阳辐射压模型[J]. *天文学报*, 2006, 47(3):310-319

[8] Rodriguez-Solano C J, Hugentobler U, Steigenberger P. Adjustable Box-wing Model for Solar Radiation Pressure Impacting GPS Satellites [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49:1 113-1 128

[9] Shi C, Zhao Q, Li M, et al. Precise Orbit Determination of BeiDou Satellites with Precise Positioning [J]. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55(7):1079-1086

[10] He L, Ge M, Wang J, et al. Experimental Study on the Precise Orbit Determination of the BeiDou Navigation Satellite System[J]. *Sensors*, 2013, 13(3): 2 911-2 928

[11] Zhao Q, Guo J, Li M, et al. Initial Results of Precise Orbit and Clock Determination for COMPASS Navigation Satellite System[J]. *J Geod*, 2013, 87(5):475-486

[12] Song Xiaoyong, Mao Yue, Jia Xiaolin. Analysis of the Parameter of BERNESE Radiation Force Model by Statistic Method[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(3):25-27(宋小勇, 毛悦, 贾小林. BERNESE 光压模型参数的统计分析[J]. *测绘科学*, 2009, 34(3):25-27)

[13] Lou Yidong. Research on Real-Time Precise GPS

Orbit and Clock Offset Determination [D]. Wuhan: Wuhan University, 2008(楼益栋. 导航卫星实时精密轨道与钟差确定 [D]. 武汉: 武汉大学, 2008)

[14] Chen G, Hu Z G, Wang G X, et al. Assessment of BDS Signal-in-Space Accuracy and Standard Positioning Performance During 2013 and 2014 [C]. Pro-

ceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2015, Xi'an, China, 2015

[15] Maik Uhlemann, Gerd Gendt, Markus Ramatschi, et al. GFZ Global Multi-GNSS Network and Data Processing Results [C]. IAG Scientific Assembly Potsdam; September, 2013

The Application of Bernese ECOM Solar Radiation Pressure Model in BDS Precise Orbit Determination

WANG Yan¹ GUO Rui² ZHANG Chuanding² HU Xiaogong³
TANG Chengpan² LI Ran³ PAN Junyang³

1 Institute of Geographic Space Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450051, China

2 Beijing Global Information Application and Development Center, Beijing 100094, China

3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: The Bernese ECOM solar radiation pressure model is widely used in precise orbit determination (POD) for GNSS navigation satellites^[1]. But when used for BeiDou POD, the accuracy may not be the best when all the nine parameters are solved. The MGEX precise ephemerides of one year were collected. A one-year time series of the nine parameters were analyzed by orbit fitting. The results show that there are strong correlations between B_c/B_s parameters and Y_c/Y_s parameters. At the same time, the B_c/B_s parameters have a one year cycle and are an order of magnitude larger than Y_c/Y_s parameters. Significance testing of the ECOM regression model results show that the significance level of B_c/B_s parameters is higher than Y_c/Y_s parameters. Experiments on orbit determination using different schemes with data from MGEX monitoring stations were carried out. The results show that only the five parameters that $D_0/Y_0/B_0/B_c/B_s$ yielded the highest precision of orbit determination, thus the five parameter ECOM model is better for BeiDou POD.

Key words: ECOM solar radiation pressure model; correlation analysis; significance test; BeiDou navigation satellite system; precise orbit determination (POD)

First author: WANG Yan, PhD, specializes in the theories and methods of measurement data processing. E-mail: wang1yan.hi@163.com

Corresponding author: ZHANG Chuanding, PhD, professor. E-mail: 13607665382@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41374038, 41204022.