

GPS 定轨中的太阳辐射压模型

陈俊平¹ 王解先^{1,2}

(1 同济大学测量系 上海 200092)

(2 现代工程测量国家测绘局重点实验室 上海 200092)

摘要 对于 GPS 这样的高轨卫星轨道的确定, 最大的误差源为太阳辐射压摄动. 近年来 IGS 各个数据处理中心提供的 GPS 星历精度越来越高, 其中很重要的一个因素就是太阳辐射压摄动模型的不断完善. 详细阐述了目前主要的 7 种太阳辐射压摄动模型后, 给出了各种光压摄动模型的计算模型, 并利用不同的摄动模型积分卫星轨道, 得到不同模型在 GPS 卫星轨道积分中的精度. 结果表明, Bern 大学提供的 3 种模型对太阳辐射压的模拟较为准确, 相对于其他 4 种模型, 由其得到的 GPS 轨道精度有将近一个量级的提高.

关键词 GPS, 太阳辐射压 (SRP), 卫星轨道

中图分类号: P 123; **文献标识码:** A

1 引言

GPS 卫星在运行过程中为了获得足够的能量, 在卫星的两侧各安装了太阳能翼板. 卫星通过太阳能翼板在获得能量的同时, 太阳辐射压 (SRP) 影响着 GPS 卫星的轨道, 成为轨道确定中影响最大的非保守力^[1-3]. 太阳辐射压对卫星产生的摄动加速度与太阳辐射强度、卫星受到的照射面积、照射面与太阳的几何关系以及照射面的反射和吸收特性有关^[4]. 由于卫星表面材料的老化、太阳能量随太阳活动的变化以及卫星姿态控制的误差等因素的影响, 使得太阳辐射压是 GPS 定轨中最难以精确模拟的摄动力. 近些年来各个数据处理中心通过大量的数据积累, 建立了一些太阳辐射压模型. 本文详细地介绍了目前比较常用的一些模型, 并且对各种太阳光压模型在 GPS 定轨中的精度进行了比较分析.

2 常用的太阳辐射压模型

GPS 开始全面运行时, 建议采用的太阳辐射压模型为 Block I、Block II 卫星制造商 Rockwell 组织所设计^[5]. 其中 Block I 采用的模型为 ROCK4, Block II 采用的模型为 ROCK42. ROCK 模型计算的摄动加速度误差在 $3 \times 10^{-9} \text{m/s}^2$ 左右, 这相当于 24 小时卫星轨道的中误差将达到 3 m^[6]. 鉴于 ROCK 模型本身的精度, 在 IGS 精密定轨中一般

2005-06-21 收到原稿, 2005-08-30 收到修改稿

是将其作为初始的先验值. 目前精密定轨中常用的太阳辐射压模型主要有 7 种, 分别是 SPHRC、SRDYZ、SRXYZ、SRDYB、BERNE、BERN1 以及 BERN2(ECOM) 模型.

太阳辐射压模型一般都认为太阳辐射压对卫星轨道在某几个方向影响最大. 因此, 可以将这几个方向定义为坐标轴. 不同模型所定义的坐标轴指向以及求解参数各不相同. 主要的坐标轴方向定义如下, e_x, e_y, e_z 为星固坐标系坐标轴的单位矢量, 其中 e_z 指向地球中心, 定义 e_D 为太阳至卫星方向的单位矢量, 并且有 $e_y = e_z \times e_D, e_x = e_y \times e_z$. 各种模型参数定义见表 1.

表 1 各种太阳辐射压模型参数
Table 1 Parameters of SRP models

SRP	Frame-axis	Number of parameter	SRP	Frame-axis	Number of parameter
SPHRC	e_D, e_y, e_z	3	BERNE	e_D, e_y, e_B	9
SRDYZ	e_D, e_y, e_z	3	BERN1	e_D, e_y, e_B	9
SRXYZ	e_x, e_y, e_z	3	BERN2	e_D, e_y, e_B	6
SRDYB	e_D, e_y, e_B	3			

2.1 SPHRC 模型

模型加速度计算公式为:

$$\ddot{r}_s = \frac{a_u^2}{|r_S - r|^2} \cdot D_0 \cdot (\lambda \cdot \text{SRP}(1) \cdot e_D + \text{SRP}(2) \cdot e_y + \text{SRP}(3) \cdot e_z), \quad (1)$$

其中, a_u 代表天文单位的长度, r_S 、 r 分别为惯性系中太阳和卫星的位置, λ 为地影因子, $\text{SRP}(i), (i = 1, 2, 3)$ 为三轴方向辐射压的系数, 作为待估参数. D_0 为 ROCK 模型计算出来的太阳辐射压产生的加速度的理论值, 单位为 10^{-5}m/s^2 , 其取值与卫星型号以及质量有关.

对于 Block I 卫星, $D_0 = 4.54/M$

对于 Block II, Block II A 卫星, $D_0 = 8.695/M$

对于 Block II R 卫星, $D_0 = 11.15/M$ 式中 M 为卫星质量, 单位为 kg.

2.2 SRDYZ 模型

模型加速度计算公式为:

$$\ddot{r}_s = \frac{a_u^2}{|r_S - r|^2} \cdot [D_0 \cdot (\lambda \cdot \text{SRP}(1) \cdot e_D + \text{SRP}(2) \cdot e_y + \text{SRP}(3) \cdot e_z) + \lambda \cdot (X(B) \cdot e_x + Z(B) \cdot e_z)], \quad (2)$$

其中, $X(B), Z(B)$ 为太阳辐射压在 e_x, e_z 方向上周期项, 其单位为 10^{-8}m/s^2 , 定义如下所示. 其他参数定义同上.

对于 Block I 卫星,

$$X(B) = (0.01 \sin(B) - 0.08 \sin(2B + 0.9) + 0.06 \cos(4B + 0.08) - 80)/M,$$

$$Z(B) = (-0.2 \sin(2B - 0.3) + 0.03 \sin(4B))/M,$$

对于 Block II, Block II A 卫星,

$$X(B) = (0.265 \sin(B) - 0.16 \sin(3B) - 0.1 \sin(5B) + 0.07 \sin(7B))/M,$$

$$Z(B) = -0.265 \cos(B)/M,$$

对于 Block II R 卫星,

$$X(B) = (-0.15 \sin(B) - 0.2 \sin(3B) - 0.2 \sin(5B))/M,$$

$$Z(B) = (0.15 \cos(B) - 0.1 \cos(3B) - 0.2 \cos(5B))/M,$$

式中 B 为从卫星上看地心与日心间的角距, M 为卫星质量.

2.3 SRXYZ 模型

模型加速度计算公式为:

$$\ddot{\mathbf{r}}_s = \frac{a_u^2}{|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|^2} \cdot (\lambda \cdot \text{SRP}(1) \cdot X(B) \cdot \mathbf{e}_x + \text{SRP}(2) \cdot D_0 \cdot \mathbf{e}_y + \lambda \cdot \text{SRP}(3) \cdot Z(B) \cdot \mathbf{e}_z), \quad (3)$$

其中, $X(B)$, $Z(B)$ 为太阳辐射压在 \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_z 方向上周期项, 其单位为 10^{-8}m/s^2 , 定义如下所示. 其他参数定义同上.

对于 Block I 卫星,

$$X(B) = (-4.55 \sin(B) + 0.08 \sin(2B + 0.9) - 0.06 \cos(4B + 0.08) + 0.08)/M,$$

$$Z(B) = (-4.54 \cos(B) + 0.20 \sin(2B - 0.3) - 0.03 \sin(4B))/M;$$

对于 Block II, Block II A 卫星,

$$X(B) = (-8.96 \sin(B) + 0.16 \sin(3B) + 0.10 \sin(5B) - 0.07 \sin(7B))/M,$$

$$Z(B) = -8.43 \cos(B)/M;$$

对于 Block II R 卫星,

$$X(B) = (-11 \sin(B) + 0.2 \sin(3B) - 0.2 \sin(5B))/M,$$

$$Z(B) = (-11.3 \cos(B) - 0.10 \cos(3B) - 200 \cos(5B))/M;$$

式中 B 为从卫星上看地心与日心间的角距, M 为卫星质量. 可以看出, 对于 Block II 卫星, 该模型使用的周期项力模型即为 T10 太阳辐射压摄动力模型. 对于 Block II, Block II A 卫星, 周期项力模型为 T20 太阳辐射压摄动力模型.

2.4 SRDYG 模型

模型加速度计算公式为:

$$\ddot{\mathbf{r}}_s = \frac{a_u^2}{|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|^2} \cdot D_0 \cdot [\text{SRP}(1) \cdot \mathbf{e}_D + \text{SRP}(2) \cdot \mathbf{e}_y + \text{SRP}(3) \cdot \mathbf{e}_B], \quad (4)$$

其中, $\mathbf{e}_B = \mathbf{e}_D \times \mathbf{e}_y$, 其他参数定义同上.

2.5 BERNE 模型

BERNE 模型、BERN1 模型以及 BERN2 模型是由 Bern 大学基于欧洲定轨中心 (CODE)1992 年以来的数据建立的 [6]. 其中 BERNE 还认为其在 3 个轴方向上存在周期性的摄动. 估计的参数包括 3 个轴方向上的辐射压的系数以及 3 个轴方向的周期项摄动的系数.

模型加速度计算公式为:

$$\ddot{\mathbf{r}}_s = \frac{a_u^2}{|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|^2} \cdot [D(u) \cdot \mathbf{e}_D + Y(u) \cdot \mathbf{e}_y + B(u) \cdot \mathbf{e}_B], \quad (5)$$

其中,

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

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

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

式中, $\text{SRP}(i), (i = 1, 2 \dots 9)$ 为待估参数, u 定义为卫星在轨道平面上距升交点的角度, 其他参数定义同上.

2.6 BERN1 模型

BERN1 模型认为太阳辐射压在 $\mathbf{e}_D, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_B, \mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z$ 轴上存在着辐射压摄动周期项. 模型估计的参数包括 $\mathbf{e}_D, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_B$ 3 轴方向的太阳辐射压摄动的系数以及这 3 轴方向的周期项摄动的系数. $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z$ 轴上的周期摄动的系数不作为参数估计.

模型加速度计算公式为:

$$\ddot{\mathbf{r}}_s = \frac{a_u^2}{|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|^2} \cdot [D(u, \beta) \cdot \mathbf{e}_D + Y(u, \beta) \cdot \mathbf{e}_y + B(u, \beta) \cdot \mathbf{e}_B + (X_1(\beta) \cdot \sin(u - u_0) + X_3(\beta) \cdot \sin(3u - u_0)) \cdot \mathbf{e}_x + Z(\beta) \cdot \sin(u - u_0) \cdot \mathbf{e}_z], \quad (6)$$

其中,

$$D(u, \beta) = \lambda \cdot (\text{SRP}(1) \cdot D_0 + D_{C2} \cos(2\beta) + D_{C4} \cos(4\beta)) + (\text{SRP}(4) \cdot \cos(u) + \text{SRP}(5) \cdot \sin(u)) \cdot D_0,$$

$$Y(u, \beta) = \text{SRP}(2) \cdot D_0 + Y_C \cos(2\beta) + (\text{SRP}(6) \cdot \cos(u) + \text{SRP}(7) \cdot \sin(u)) \cdot D_0,$$

$$B(u, \beta) = \text{SRP}(3) \cdot D_0 + B_C \cos(2\beta) + (\text{SRP}(8) \cdot \cos(u) + \text{SRP}(9) \cdot \sin(u)) \cdot D_0,$$

$$X_1(\beta) = X_{10} + X_{1C} \cos(2\beta) + X_{1S} \sin(2\beta),$$

$$X_3(\beta) = X_{30} + X_{3C} \cos(2\beta) + X_{3S} \sin(2\beta),$$

$$Z(\beta) = Z_0 + Z_{C2} \cos(2\beta) + Z_{S2} \sin(2\beta) + Z_{C4} \cos(4\beta) + Z_{S4} \sin(4\beta),$$

式中, β 定义为太阳相对于卫星轨道平面的高度角, 其他参数定义同上. 式中的系数与卫星型号有关, 表 2 列出了 Block II 和 Block II A 卫星各个系数的值.

表 2 光压模型中系数数值

Table 2 Parameter values of BERN1 model

Parameter	value(10^{-9}m/s^2)	Parameter	value(10^{-9}m/s^2)
D_{C2}	-0.813	Y_C	0.067
D_{C4}	0.517	B_C	-0.385
X_{10}	-0.015	$Z_0(\text{Block II})$	1.024
X_{1C}	-0.018	$Z_0(\text{Block II A})$	0.979
X_{1S}	-0.033	Z_{C2}	0.519
X_{30}	0.004	Z_{S2}	0.125
X_{3C}	-0.046	Z_{C4}	0.047
X_{3S}	-0.398	Z_{S4}	-0.045

2.7 BERN2 模型

BERN2 模型又被称为 ECOM 模型, 其认为太阳辐射压在 e_x, e_z 轴上存在周期项摄动.

模型加速度计算公式为:

$$\ddot{\mathbf{r}}_s = \frac{a_u^2}{|\mathbf{r}_S - \mathbf{r}|^2} \cdot [D(\beta) \cdot \mathbf{e}_D + Y(\beta) \cdot \mathbf{e}_y + B(\beta) \cdot \mathbf{e}_B + (X_1(\beta) \cdot \sin(u - u_0) + X_3(\beta) \cdot \sin(3u - u_0)) \cdot \mathbf{e}_x + Z(\beta) \cdot \sin(u - u_0) \cdot \mathbf{e}_z], \quad (7)$$

其中,

$$D(\beta) = \lambda \cdot (\text{SRP}(1) \cdot D_0 + D_{C2} \cos(2\beta) + D_{C4} \cos(4\beta)),$$

$$Y(\beta) = \text{SRP}(2) \cdot D_0 + Y_C \cos(2\beta),$$

$$B(\beta) = \text{SRP}(3) \cdot D_0 + B_C \cos(2\beta),$$

$$X_1(\beta) = \text{SRP}(4) \cdot D_0 + X_{10} + X_{1C} \cos(2\beta) + X_{1S} \sin(2\beta),$$

$$X_3(\beta) = \text{SRP}(5) \cdot D_0 + X_{30} + X_{3C} \cos(2\beta) + X_{3S} \sin(2\beta),$$

$$Z(\beta) = \text{SRP}(6) \cdot D_0 + Z_0 + Z_{C2} \cos(2\beta) + Z_{S2} \sin(2\beta) + Z_{C4} \cos(4\beta) + Z_{S4} \sin(4\beta),$$

式中各个参数定义同上. 其中的系数同 BERN1 模型.

3 数据处理

从以上的介绍可以看出, 各种模型定义了太阳辐射压在不同的方向上影响卫星的轨道, 其影响的参数定义以及参数个数各不相同. 为了分析不同太阳辐射压模型在 GPS 卫

星精密定轨中的精度, 本文收集了 2005 年年计日 062 的 IGS 精密 SP3 星历, 运用以上模型对该天的 GPS 轨道进行了数据处理与分析。

数据处理的方案为: 首先在给定的初始状态下对卫星进行轨道积分, 得到积分轨道, 然后把 IGS 精密 SP3 星历作为模拟的几何轨道, 对几何轨道进行动力平滑, 得到改正的初始状态, 对此初始状态重新进行轨道积分, 得到修正的卫星轨道. 利用上述 7 种太阳辐射压模型进行了上述数据处理. 处理过程中, 使用了相同的卫星初始状态以及相同的其他动力模型. 对于 24 小时的轨道, 每 15 分钟输出一个结果. 取 PRN9 卫星做为示例, 不同模型得出的结果见图 1 至图 7.

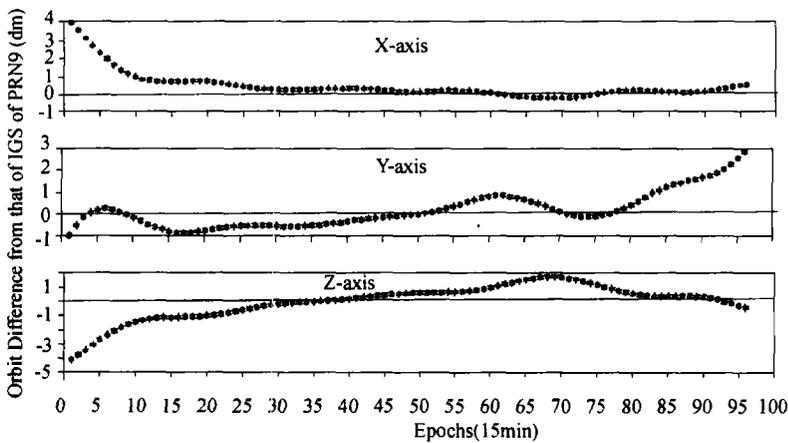


图 1 SPHRC 模型轨道与 IGS 结果的比较

Fig.1 Comparison of orbits between IGS results and SPHRC model results

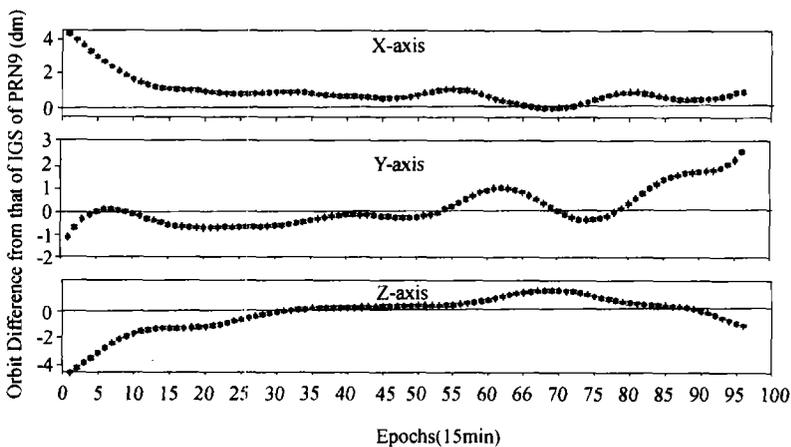


图 2 SRDYZ 模型轨道与 IGS 结果的比较

Fig.2 Comparison of orbits between IGS results and SRDYZ model results

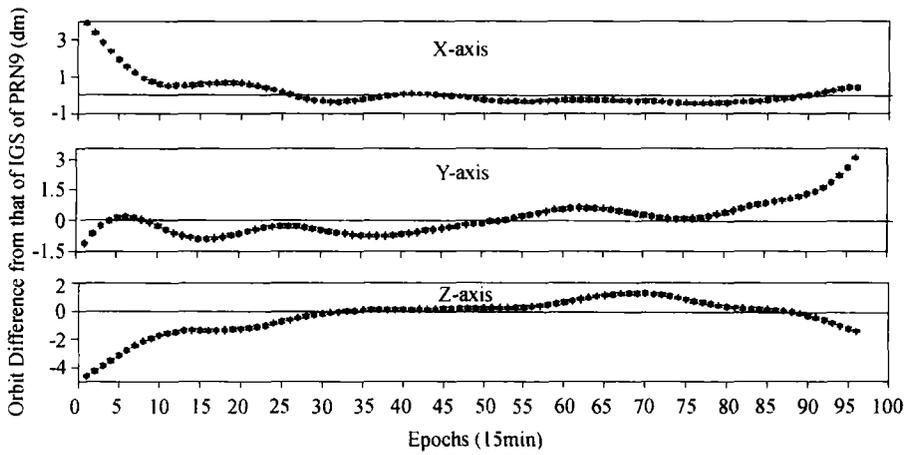


图 3 SRXYZ 模型轨道与 IGS 结果的比较

Fig. 3 Comparison of orbits between IGS results and SRXYZ model results

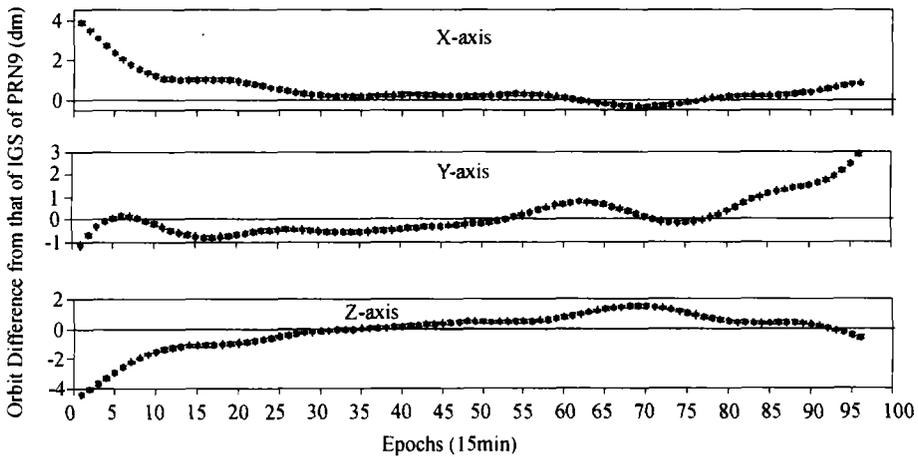


图 4 SRDYB 模型轨道与 IGS 结果的比较

Fig. 4 Comparison of orbits between IGS results and SRDYB model results

4 分析与结论

本文对其他卫星也进行了计算，计算的结果与 PRN9 卫星的情况一致。

从以上结果可以看出，BERNE、BERN1、BERN2 模型与精密星历的差值在各个方向上明显存在着周期性，这也验证了太阳辐射压对于卫星轨道的影响存在着周期项。另外，BERNE、BERN1、BERN2 模型要比其他 4 种模型的精度高出 1 个数量级，说明周期项的引入确实更好地描述了太阳光压对 GPS 轨道的影响。这 3 种模型积分得出的轨道与 IGS 精密星历的差别在厘米级，因此能够较好地应用于高精度的高轨卫星定轨。

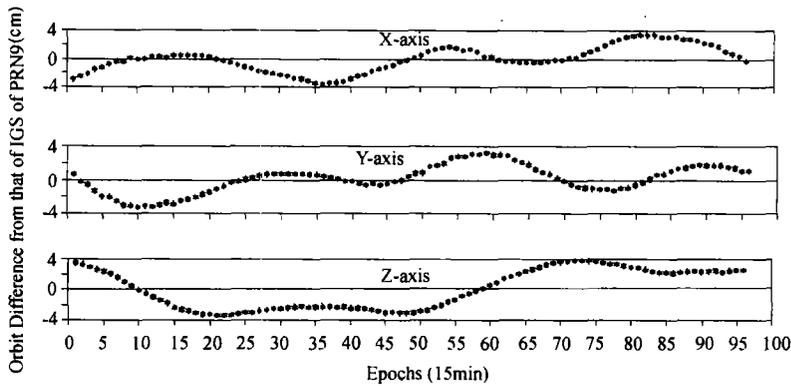


图 5 BERNE 模型轨道与 IGS 结果的比较

Fig.5 Comparison of orbits between IGS results and BERNE model results

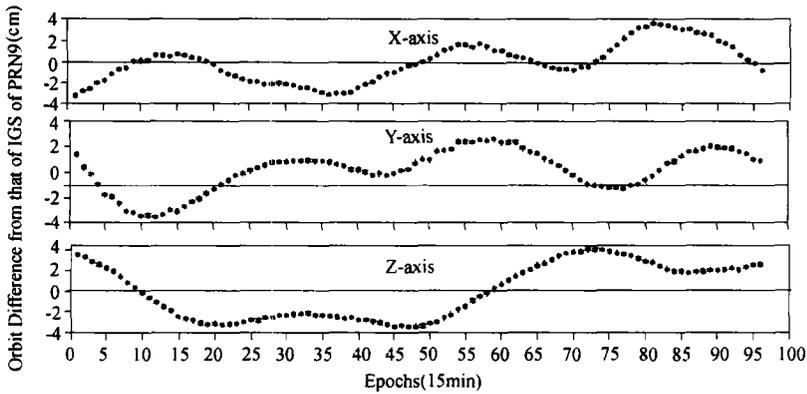


图 6 BERN1 模型轨道与 IGS 结果的比较

Fig.6 Comparison of orbits between IGS results and BERN1 model results

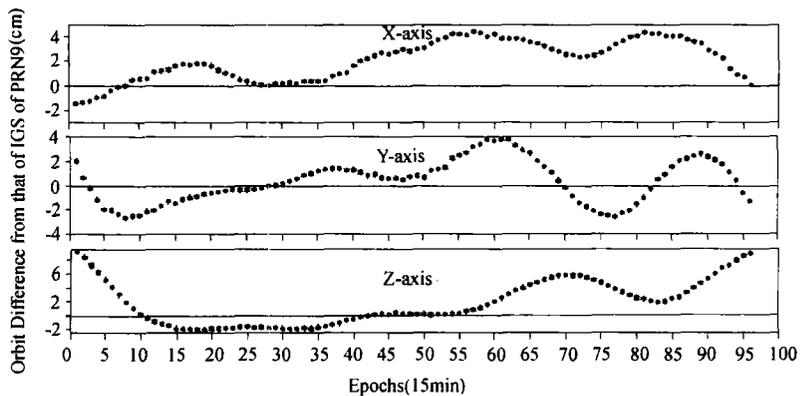


图 7 BERN2 模型轨道与 IGS 结果的比较

Fig.7 Comparison of orbits between IGS results and BERN2 model results

而其他 4 种模型结果与 IGS 实时精密轨道的差值在分米级，并且从图中可以看到，这 4 种方法的外推性不好，距离积分初始时刻的时间越远，轨道精度降低的速度越明显，相对于厘米级的 IGS 实时精密轨道来讲，这些模型不能满足要求。

对该天所有卫星的结果进行统计，得到各种模型定轨的系统偏差（与 IGS 精密轨道的差值）与中误差如下所示。其中，图 8 为各种模型结果与 IGS 精密轨道差值平均值的绝对值，表 3 给出了各种模型与 IGS 差值平均值以及差值的中误差。

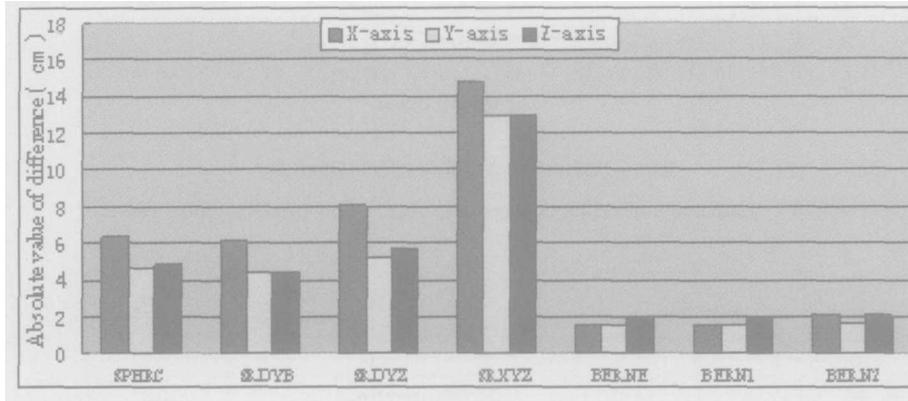


图 8 各种模型轨道与 IGS 结果的比较 (差值的绝对值)

Fig. 8 Comparison of orbits by different models (absolute value of the difference)

表 3 各种模型定轨的精度

Table 3 Performance-evaluation of different models

Model	SPHRC	SRDYB	SRDYZ	SRXYZ	BERNE	BERN1	BERN2	
Average value of difference(cm)	X	1.61	1.47	3.99	-5.23	-0.05	-0.04	1.26
	Y	0.65	0.66	0.01	2.32	0.00	0.04	-0.15
	Z	-0.35	-0.32	-1.04	-0.41	-0.02	-0.02	-0.26
Standard error of difference (cm)	X	9.96	10.04	10.73	25.34	1.91	1.89	2.39
	Y	7.19	6.98	7.86	23.25	1.84	1.82	2.20
	Z	7.35	6.88	8.32	23.25	2.34	2.33	2.67

从上面的统计结果可以看出

(1) BERNE、BERN1、BERN2 3 种模型能够很好地应用于卫星的精密定轨，其定轨的均方差在 1-2 个厘米左右；

(2) SPHRC、SRDYB、SRDYZ、SRXYZ 4 种模型定轨的精度比较低，并且模型的外推性不好，距离积分初始时刻越远，轨道精度下降很明显。

(3) 在 BERNE、BERN1 两种模型结果中，每一个坐标分量差值的均值非常小 (10^{-2} cm 量级)，表明模型对各个方向辐射压的模拟比较吻合。

(4) 其他几种模型对于 X 方向的差值均有一定的偏差，表明这 4 种模型存在着较大的模型误差。

参 考 文 献

- 1 王解先. GPS 精密定轨定位. 上海: 同济大学出版社, 1997
- 2 Marek Ziebart. Analytical SRP Model for GLONASS: Initial Results. In International GLONASS Experiment - IGEX-98 Proceedings, 2000, 315
- 3 Fliegel H F, Gallini T E, Swift E R. Journal of Geophysical Research, Issue B1, 97: 559
- 4 李毓麟, 葛茂荣. 关于太阳光压模型. 见: 叶叔华总编. 现代地壳运动的空间测量技术和数据处理方法研究. 上海: 上海科学技术出版社, 2001, 101
- 5 Ivan Georgiev, GPS orbit determination by SLR data, Central Laboratory for Geodesy satellite geodesy SLR, 1998
- 6 Springer T A, Beutler G, Rothacher M. A new Solar Radiation Pressure Model for the GPS Satellites, in CODE IGS Analysis Center Technical Report, 1999, 673

Solar Radiation Pressure Models for the GPS Satellites

CHEN Jun-ping¹ WANG Jie-xian^{1,2}

(1 Department of Surveying and Geomatics, Tongji University, Shanghai 200092)

(2 Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 200092)

ABSTRACT The largest error in currently used for GPS orbit models is due to the effect of solar radiation pressure (SRP). Over the last a few years many improvement were made in modeling the orbits of GPS satellites within the IGS. One of the most important factors for the improvement is the perfect of SRP models. The main SRP models currently used for GPS satellites is presented. Using different models, it can get the performance of the models in satellite orbit determining. The results show that new models developed by Bern University gain almost an order of magnitude better than that of the other traditional models.

Key words GPS, sun radiation pressure, satellite orbit