

几种卫星钟差预报模型预报效果的分析与比较

王宇谱¹ 吕志平¹ 官晓春¹ 周海涛¹ 王 宁¹

¹ 信息工程大学地理空间信息学院,郑州市科学大道 62 号,450001

摘 要:采用 GPS 精密钟差数据进行预报试验,对二次多项式模型、谱分析模型、GM(1,1)模型、ARIMA 模型以及 Kalman 滤波模型 5 种模型的钟差预报效果进行分析和比较,总结了各模型预报钟差的优点与不足,并对 GPS 系统目前运行的 6 种星载原子钟的预报特性进行简单分析。
关键词:卫星钟差预报;二次多项式模型;谱分析模型;GM(1,1)模型;ARIMA 模型;Kalman 滤波模型
中图分类号: P228 **文献标识码:** A

卫星导航系统中,星载原子钟的钟差预报有着重要的作用^[1-4]。钟差预报模型主要包括二次多项式(QP)模型^[4-5]、灰色模型(GM(1,1))^[5]、谱分析(SA)模型^[6-8]、时间序列(ARIMA)模型^[9,10]、Kalman 滤波(KF)模型^[2,11]及其改进模型^[12-14]等。本文使用 IGS 提供的精密钟差数据,从不同建模钟差数据量进行相同时间段钟差预报的角度,利用 5 种常用钟差模型对目前在轨运行的 6 种 GPS 卫星钟进行 1、15、60 d 的钟差预报,根据预报结果对各模型的预报效果进行分析和比较。

1 预报试验与结果分析

使用 GPS 系统 15 min 采样间隔的最终精密钟差产品进行预报试验。以 GPS Week 17 464~17 576(2013-06-27~2013-09-14)共 80 d 的钟差数据为例,同时考虑此时间段的星载原子钟包括 BLOCK II A 铯钟、BLOCK II A 铷钟、BLOCK II R 铷钟、BLOCK II R-M 铷钟、BLOCK II F 铯钟、BLOCK II F 铷钟 6 种类型,随机选取该时间段内不存在钟差跳变和间断、数据完整的每类钟的一颗卫星进行试验。文中选取 PRN01、PRN10、PRN22、PRN24、PRN29、PRN32 六颗卫星。预报试验中,以对应的 IGS 精密钟差数据作为参考真值,使用均方根误差(RMS)和极差(最大误差与最小误差之差的绝对值,记为 Range)作为统计量,分析各模型的预报效果。其中均方根误差的计算公式为:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (error_i)^2}, error_i = t_i - \hat{t}_i \quad (1)$$

式中,error_{*i*}为预报误差, \hat{t}_i 是*i*时刻 IGS 精密钟差值,*t_i*为*i*时刻钟差预报值。

对于 5 种常用钟差预报模型,有以下 3 点需要说明:

1)本文 SA 模型确定的过程为^[6]:首先,利用二次多项式对已知钟差数据进行拟合得到拟合残差;然后,使用 Daubechies 小波进行信号分解并对残差进行降噪处理;接下来,采用傅里叶变换将降噪后的信号从时域变换到频域中,则信号分解为多个简单的正弦和余弦信号的叠加;最后,根据最大功率谱的量级,确定周期函数的阶数及其功率谱对应的频率。

2)本文使用 ARIMA 模型进行钟差预报建模时,首先根据自相关函数和偏相关函数的截尾性初步确定模型和模型的阶数^[9]。在模型确定后,利用 AIC 准则准确地确定模型的阶数^[10],并通过最小二乘估计方法^[9]求解模型参数。

3)本文使用基于方差递推法来确定噪声矩阵的 KF 模型进行钟差预报^[4]。

最后,设计两种方案对各模型的钟差预报效果进行分析说明。方案一,使用 2013-07-03 的钟差数据进行建模,预报接下来 1 d(代表短期预报)、15 d(代表中期预报)、60 d(代表长期预报)。方案二,使用 2013-06-27~07-03 共 7 d 的钟差数据进行建模,预报接下来 1、15、60 d 的钟差。两方案中各卫星的钟差预报结果统计见表 1~6(单位:ns)。

1)分析 6 个表中 QP 模型对应列的统计数据可以看出:①从表 1、4 可知,对于 1 d 以内的短期预报,QP 模型能够通过对历史钟差数据的有效拟合来反映钟差的变化规律,从而得到较好的预报结果:预报精度在亚 ns 到几个 ns 之间,预报稳定性对于铷钟在数个 ns 之内,而铯钟在几个 ns 到数十 ns 之间。而在中长期预报中,随着预报时间的增加,由于预报结果误差的不断累积,该模型预报结果的精度和稳定性迅速下降。因此,不宜

采用该模型进行钟差的中长期预报。②由各表中 6 颗卫星的预报结果统计值可知,QP 模型进行钟差预报时,其精度和稳定性随着星载原子钟种类的不同而变化。

2)分析 6 个表中 SA 模型对应列的统计数据可以看出:①由于 SA 模型较好地拟合了星载原子钟的周期项部分,因此,整体上使用 SA 模型进行钟差预报能够得到较 QP 模型更好的预报结果,预报精度和预报结果的稳定性均有一定程度

表 1 方案一中 5 种模型 1 d 预报结果的统计

Tab. 1 Statistics of prediction results for five models in 1 day on the case ones

卫星类型	统计量	QP	GM	SA	ARIMA	KF	平均值
PRN10(Ⅱ A Cs)	RMS	4.330	10.324	3.480	27.869	21.508	13.502
	Range	12.050	22.249	9.575	49.562	38.519	26.391
PRN24(Ⅱ F Cs)	RMS	18.050	1.170	16.715	13.196	24.053	14.637
	Range	35.260	5.592	32.516	26.860	48.902	29.826
铯钟的均值	RMS	11.190	5.747	10.098	20.533	22.781	14.070
	Range	23.655	13.921	21.046	38.211	43.711	28.109
PRN01(Ⅱ F Rb)	RMS	0.220	1.080	0.180	6.236	0.926	1.728
	Range	0.793	2.235	0.319	10.327	2.229	3.181
PRN22(Ⅱ R Rb)	RMS	7.105	0.468	4.782	7.188	9.709	5.850
	Range	13.601	2.311	10.339	9.312	19.314	10.975
PRN29(Ⅱ R-M Rb)	RMS	1.545	1.746	1.839	4.855	1.700	2.337
	Range	3.148	3.443	3.450	9.303	3.390	4.547
PRN32(Ⅱ A Rb)	RMS	5.325	2.936	3.042	1.063	6.407	3.755
	Range	10.255	5.379	4.631	4.551	13.232	7.610
铷钟的均值	RMS	3.549	1.558	2.461	4.836	4.686	3.418
	Range	6.949	3.342	4.685	8.373	9.541	6.578
总的平均值	RMS	6.096	2.954	5.006	10.068	10.717	6.968
	Range	12.518	6.868	10.138	18.319	20.931	13.755

注:表中铯钟的 RMS 均值是两颗铯钟 RMS 之和的平均值,Range 均值为两颗铯钟 Range 值之和的平均值;铷钟的 RMS 均值是 4 颗铷钟 RMS 之和的平均值,Range 的均值为 4 颗铷钟 Range 之和的平均值;总的平均值中 RMS 是 6 颗卫星 RMS 之和的平均值,Range 的均值为 6 颗卫星 Range 之和的平均值。表中横向的平均值为每颗卫星使用 5 种预报模型时 RMS 和 Range 的均值。表 2~6 同。

表 2 方案一中 5 种模型 15 d 预报结果的统计

Tab. 2 Statistics of prediction results for five models in 15 day on the case one

卫星类型	统计量	QP	GM	SA	ARIMA	KF	平均值
PRN10(Ⅱ A Cs)	RMS	562.752	76.372	1 003.199	1 023.180	4 418.580	1 416.817
	Range	1 291.628	122.651	2 253.513	1 749.581	9 848.623	3 053.199
PRN24(Ⅱ F Cs)	RMS	1 622.896	57.021	1 501.152	506.389	3 039.652	1 345.422
	Range	3 573.474	119.758	3 305.808	868.165	6 740.684	2 921.578
铯钟的均值	RMS	1 092.824	66.697	1 252.176	764.785	3 729.116	1 381.120
	Range	2 432.551	121.205	2 779.661	1 308.873	8 294.654	2 987.389
PRN01(Ⅱ F Rb)	RMS	39.043	137.012	12.880	3 679.026	191.492	811.891
	Range	89.025	308.233	31.502	6 008.774	429.059	1 373.319
PRN22(Ⅱ R Rb)	RMS	787.888	146.886	597.752	1 142.138	1 378.608	810.654
	Range	1 650.947	238.287	1 235.121	1 885.868	2 972.054	1 596.455
PRN29(Ⅱ R-M Rb)	RMS	70.604	90.422	251.229	2 418.327	89.916	584.100
	Range	112.590	156.569	591.957	3 976.924	155.720	998.752
PRN32(Ⅱ A Rb)	RMS	631.022	141.932	107.035	457.797	1 039.486	475.454
	Range	1 399.561	300.675	219.556	821.681	2 316.738	1 011.642
铷钟的均值	RMS	382.139	129.063	242.224	1 924.322	674.876	670.525
	Range	813.031	250.941	519.534	3 173.312	1 468.393	1 245.042
平均值	RMS	619.034	108.274	578.875	1 537.810	1 692.956	907.390
	Range	1 352.871	207.696	1 272.910	2 551.832	3 743.813	1 825.824

表 3 方案一中 5 种模型 60 d 预报结果的统计

Tab. 3 Statistics of prediction results for five models in 60 day on the case one

卫星类型	统计量	QP	GM	SA	ARIMA	KF	平均值
PRN10(Ⅱ A Cs)	RMS	9 295.912	262.769	15 950.974	4 125.196	69 748.577	19 876.686
	Range	20 788.206	497.134	35 600.791	7 242.243	155 744.536	43 974.582
PRN24(Ⅱ F Cs)	RMS	24 859.603	460.663	23 033.478	2 074.109	47 561.066	19 597.784
	Range	55 396.614	1 001.249	51 331.661	3 607.876	106 154.833	43 498.447
铯钟的均值	RMS	17 077.758	361.716	19 492.226	3 099.653	58 654.822	19 737.235
	Range	38 092.92	749.192	43 466.226	5 425.060	130 949.685	43 736.617
PRN01(Ⅱ F Rb)	RMS	1 837.745	3 745.295	1 442.338	14 540.831	4 254.832	5 164.208
	Range	4 483.903	9 010.866	3 595.897	24 315.733	9 899.194	10 261.119
PRN22(Ⅱ R Rb)	RMS	10 099.924	426.904	7 277.870	4 073 784.297	19 556.771	822 229.153
	Range	22 261.721	671.864	15 985.306	51 597 159.898	43 405.919	10 335 896.942
PRN29(Ⅱ R-M Rb)	RMS	214.585	515.996	4 618.969	9 676.612	513.360	3 107.904
	Range	371.258	1 052.065	10 375.773	16 502.258	1 046.443	5 869.559
PRN32(Ⅱ A Rb)	RMS	9 487.584	2 161.669	1 573.178	135 421.960	16 135.898	32 956.058
	Range	21 045.965	4 892.053	3 570.500	1 944 921.043	35 926.650	402 071.242
铷钟的均值	RMS	5 409.960	1 712.466	3 728.089	1 058 355.925	10 115.215	215 864.331
	Range	12 040.712	3 906.712	8 381.869	13 395 724.733	22 569.552	2 688 524.716
平均值	RMS	9 299.226	1 262.216	8 982.801	706 603.834	26 295.084	150 488.632
	Range	20 724.611	2 854.205	20 076.655	8 932 291.509	58 696.263	1 806 928.649

表 4 方案二中 5 种模型 1 d 预报结果的统计

Tab. 4 Statistics of prediction results for five models in 1 day on the case two

卫星类型	统计量	QP	GM	SA	ARIMA	KF	平均值
PRN10(Ⅱ A Cs)	RMS	11.941	8.002	2.598	13.192	61.568	19.460
	Range	22.523	19.436	8.027	23.970	47.598	24.311
铷钟的均值	RMS	7.751	4.324	1.134	1.743	7.662	4.523
	Range	11.274	9.054	5.466	5.739	11.268	8.560
PRN24(Ⅱ F Cs)	RMS	9.846	6.163	1.866	7.467 5	34.615	11.992
	Range	16.898 5	14.245	6.746 5	14.854 5	29.433	16.436
铯钟的均值	RMS	0.391	14.532	0.366	0.432	0.245	3.193
	Range	0.662	9.470	0.637	0.892	0.749	2.482
PRN01(Ⅱ F Rb)	RMS	10.639	20.656	5.620	1.094	10.639	9.730
	Range	4.782	10.976	7.572	3.603	4.261	6.239
PRN22(Ⅱ R Rb)	RMS	1.586	6.003	0.640	2.472	9.055	3.951
	Range	2.678	1.502	2.485	4.639	4.722	3.205
PRN29(Ⅱ R-M Rb)	RMS	1.666	19.864	2.427	0.644	2.191	5.358
	Range	3.036	13.599	4.342	1.783	3.085	5.169
PRN32(Ⅱ A Rb)	RMS	3.570 5	15.263 75	2.263 25	1.160 5	5.532 5	5.558
	Range	2.789 5	8.886 75	3.759	2.729 25	3.204 25	4.274
总的平均值	RMS	5.662	12.230	2.131	3.263	15.227	7.703
	Range	7.493	10.673	4.755	6.771	11.947	8.328

的提高。而从表 1~3 中 PRN10 和 PRN29 的预报结果统计发现,此时 QP 模型的预报效果均优于 SA 模型的预报效果,说明在建模钟差数据相对较少的情况下,该模型还存在周期确定不准而导致预报效果不如 QP 模型的现象。同时,在钟差的短期预报中,其预报结果的精度、稳定性与 QP 模型相当。长期预报中由于受到二次多项式主项的影响,随着预报时间的增加,模型的预报误差迅速增加,但预报效果优于 QP 模型。②由各表中 6 颗卫星的预报结果统计可知,该模型进行钟差预报时,其精度和稳定性随着星载原子钟的不同而变化。

3)分析 6 个表中 GM(1,1)模型对应列的统

计数据可以看出:①与其他 4 种模型相比,GM(1,1)模型较为显著的特点是整体上对于钟差的中长期预报其预报效果较好,随着预报时间的增加其预报误差的增长较为缓慢,但预报有时会出现较大的误差,例如表 3、6 中 PRN01 卫星的长期预报。同时可以看出,GM(1,1)模型在使用试验所给时间段的钟差数据时,其短期预报结果的精度和稳定性与 QP 模型和 SA 模型相当。所以,GM(1,1)模型不但可用于钟差的短期预报,而且比较适合用来进行钟差的中长期预报。②由各表中 6 颗卫星的预报结果统计可知,该模型进行钟差预报时,钟差预报结果的精度和稳定性随着星载原子钟的不同而不同。

表 5 方案二中 5 种模型 15 d 预报结果的统计

Tab.5 Statistics of prediction results for five models in 15 day on the case two

卫星类型	统计量	QP	GM	SA	ARIMA	KF	平均值
PRN10(Ⅱ A Cs)	RMS	115.126	50.173	94.166	817.737	2 427.157	700.872
	Range	206.705	79.368	222.035	1 124.092	5 218.013	1 370.043
PRN24(Ⅱ F Cs)	RMS	29.602	21.850	29.016	356.825	36.534	94.765
	Range	54.440	62.841	70.668	462.557	67.257	143.553
铯钟的均值	RMS	72.364	36.011 5	61.591	587.281	1 231.846	397.819
	Range	130.572 5	71.104 5	146.351 5	793.324 5	2 642.635	756.798
PRN01(Ⅱ F Rb)	RMS	3.077	215.107	3.122	2 744.463	70.866	607.327
	Range	5.426	436.253	5.421	3 433.019	161.737	808.371
PRN22(Ⅱ R Rb)	RMS	162.361	34.770	68.557	800.131	240.634	261.291
	Range	320.783	93.498	135.378	1 070.130	496.752	423.308
PRN29(Ⅱ R-M Rb)	RMS	115.741	52.463	76.649	1 776.034	84.154	421.008
	Range	223.115	98.734	142.046	2 247.078	194.131	581.021
PRN32(Ⅱ A Rb)	RMS	57.146	234.421	9.556	240.056	230.718	154.379
	Range	132.959	444.130	38.024	689.843	520.835	365.158
铷钟的均值	RMS	84.581 25	134.190 3	39.471	1 390.171	156.593	361.001
	Range	170.570 8	268.153 8	80.217 25	1 860.018	343.363 8	544.465
平均值	RMS	80.509	101.464	46.844	1 122.541	515.011	373.274
	Range	157.238	202.471	102.262	1 504.453	1 109.788	615.242

表 6 方案二中 5 种模型 60 d 预报结果的统计

Tab.6 Statistics of prediction results for five models in 60 day on the case two

卫星类型	统计量	QP	GM	SA	ARIMA	KF	平均值
PRN10(Ⅱ A Cs)	RMS	891.052	156.713	1 387.579	4 087.513	34 249.560	8 154.483
	Range	1 903.999	313.913	3 044.184	6 853.838	75 837.638	17 590.714
PRN01(Ⅱ F Rb)	RMS	289.991	290.292	267.951	2 005.602	413.259	653.419
	Range	609.504	680.629	596.105	3 178.176	886.234	1 190.130
PRN24(Ⅱ F Cs)	RMS	590.521 5	223.502 5	827.765	3 046.558	17 331.41	4 403.951
	Range	1 256.752	497.271	1 820.145	5 016.007	38 361.94	9 390.423
铯钟的均值	RMS	1 212.550	4 138.762	1 211.432	14 225.601	2 384.732	4 634.615
	Range	3 083.457	9 789.683	3 080.911	22 033.328	5 717.705	8 741.017
PRN22(Ⅱ R Rb)	RMS	1468.487	65.861	235.295	4 696.098	2 750.419	1 843.232
	Range	3 175.101	222.909	448.464	7 580.008	6 046.182	3 494.533
PRN29(Ⅱ R-M Rb)	RMS	1 080.818	373.632	585.431	9 467.979	1 517.738	2 605.120
	Range	2 341.643	808.786	1 249.316	14 770.054	3 379.256	4 509.811
PRN32(Ⅱ A Rb)	RMS	741.084	2 494.979	179.191	35 183.035	3 521.557	8 423.969
	Range	1 554.699	5 468.590	347.625	205 896.386	7 773.813	44 208.223
铷钟的均值	RMS	1 125.735	1 768.309	552.8373	15 893.18	2 543.612	4 376.735
	Range	2 538.725	4 072.492	1 281.579	62 569.94	5 729.239	15 238.395
平均值	RMS	947.330	1 253.373	644.480	11 610.971	7 472.878	4 385.806
	Range	2 111.401	2 880.752	1 461.101	43 385.298	16 606.805	13 289.071

4)分析 6 个表中 ARIMA(p,d,q)模型对应列的统计数据可以看出:①该模型在钟差的短期预报中能够得到与前面 3 种模型相当的预报结果;而在钟差的长期预报中,由于一次差分后的钟差数据并不是一个绝对平稳的时间序列,随着预报时间的增加,误差累积量急剧增加,所以这种方法并不适合钟差的长期预报。②由各表中 6 颗卫星的预报结果统计值可知,该模型进行钟差预报时,不同的卫星其钟差预报结果差异较大,这也说明了 ARIMA(p,d,q)模型由于模型识别和阶数确定较为困难,预报结果的稳定性不好。

5)分析 6 个表中 KF 模型对应列的统计数据可以看出:①从表 1、4 可知,KF 模型利用 1 d 的

钟差数据建模进行短期预报时,预报结果的精度和稳定性与前 4 种模型相当。对比表 1~3 和表 4~6 可知,该模型进行长期预报时,一方面由于历史数据对滤波预报值的影响较大,初始数据的误差会被放大得越来越严重;另一方面滤波引入的系统状态方程虽然能有效顾及拟合精度,但其确定整体模型的精度较差,从而使得 6 颗卫星预报结果的精度和稳定性都随着预报时间的增加而变差。②由各表中 6 颗卫星的预报结果统计可知,使用 KF 模型进行钟差预报时,其精度和稳定性随着星载原子钟的不同而变化。

6)分析 6 个表中铷钟钟差预报结果的平均值可看出,对于铷钟的短期预报,5 种常用预报模型

预报精度和稳定性基本相当,预报精度的平均值为 ns 量级。对比 6 个表中最后一列各颗卫星使用 5 种模型进行钟差预报时的统计结果平均值可知,相同预报条件下,不同种类的星载原子钟其钟差预报效果不同。同时,各模型预报效果随着原子钟类型的变化而不同。而对比各表最后一列中“铯钟的均值”与“铷钟的均值”可知,对于 GPS 系统卫星钟的预报,其星载铷原子钟的预报效果整体上优于铯原子钟。

7)对比表 1、4、2、5 和 3、6 可以看出,在钟差建模数据充足的条件下,由于 SA 模型的周期函数根据较长的钟差序列得到了更可靠的确定,因此,其预报效果较 QP 模型有了改善;而该条件下这两种模型的预报效果优于 GM(1,1)模型。根据 6 个表中的统计结果可知,5 种模型在两种数据方案下,GM(1,1)模型的预报结果最为稳定,ARIMA 模型的预报结果随着建模钟差数据量及预报条件的不同而变化较大,QP、SA、ARIMA、KF 4 种模型能够通过增加建模钟差数据量来改善模型的预报性能,特别是对于前 3 种模型的中长期预报。对于 GM(1,1)模型,增加钟差建模数据使得短期预报结果的精度和稳定性均变差,也不能明显改善中长期预报效果。造成该现象的主要原因是对于 GPS 卫星钟差短期预报,该模型的指数系数是只与历元个数有关的函数,不同的建模钟差数据量会产生差异较大的预报结果。

2 结 语

1)QP 模型具有建模简单、物理意义明确、短期预报效果好等优点,存在的不足是预报精度随着预报时间的增加而迅速变差。

2)SA 模型能够一定程度上顾及钟差的周期性变化部分,得到更为精确的钟差预报值;但该模型的周期函数要根据较长的钟差序列才能更可靠地确定,同时该模型的建立较 QP 模型更复杂。

3)GM(1,1)模型不但短期预报效果好且比较适合进行钟差的长期预报,存在的不足是模型的指数系数是与历元个数有关的函数,不同的建模钟差数据量会产生差异较大的预报结果;同时,还存在有时会出现较大预报误差的现象。

4)ARIMA 模型在钟差的短期预报中能取得较好的预报结果,但不适合钟差的长期预报;同时,该模型的预报效果会随着星载原子钟类型的不同和预报条件的变化而产生较大差异。

5)KF 模型的优点是不仅能够预报钟差值还能实时求解出钟差、钟速和钟漂 3 个表征星钟特

性的物理参数;但该模型的预报效果与先验信息认知程度等密切相关,通常难以较好地获取这些信息。该模型钟差短期预报效果较好,特别是在建模数据充足的条件下;但其钟差长期预报的效果较差,因此,不适合用来进行钟差的长期预报。

6)对于 GPS 系统,其星载铷钟的预报效果整体上优于星载铯钟。同时,在 5 种常用钟差预报模型中,QP 模型和 GM(1,1)模型较为简单,而且具有较好的预报效果。

参考文献

[1] 刘基余. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 北京:科学出版社,2008(Liu Jiyu. Theories and Methods of GPS Satellite Navigation and Positioning[M]. Beijing: Science Press, 2008)

[2] 朱祥维,肖华,雍少为,等. 卫星钟差预报的 Kalman 算法及其性能分析[J]. 宇航学报,2008, 29(3): 966-970 (Zhu Xiangwei, Xiao Hua, Yong Shaowei, et al. The Kalman Algorithm Used for Satellite Clock Offset Prediction and Its Performance Analysis[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(3):966-970)

[3] 王宇谱,吕志平,陈正生,等. 卫星钟差预报的小波神经网络算法研究[J]. 测绘学报,2013, 42(3):20-28(Wang Yupu, Lü Zhiping, Chen Zhengsheng, et al. Research the Algorithm of Wavelet Neural Network to Predict Satellite Clock Bias[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2013,42(3):323-330)

[4] 王继刚. 基于 GPS 精密单点定位的时间比对与钟差预报研究[D]. 北京:中国科学院研究生院,2010(Wang Jigang. Research on Time Comparison Based on GPS Precise Point Positioning and Atomic Clock Prediction[D]. Beijing: Graduate School of CAS, 2007)

[5] 崔先强,焦文海. 灰色系统模型在卫星钟差预报中的应用[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2005,30(5):447-450(Cui Xianqiang, Jiao Wenhai. Grey System Model for the Satellite Clock Error Predicting[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005,30(5):447-450)

[6] 郑作亚,党亚民,卢秀山,等. 附有周期项的预报模型及其在 GPS 卫星钟差预报中的应用研究[J]. 天文学报,2010, 51(1):95-102 (Zheng Zuoya, Dang Yamin, Lu Xiushan, et al. Prediction Model With Periodic Item and Its Application to the Prediction of GPS Satellite Clock Bias[J]. Acta Astronomica Sinica, 2010, 51(1):95-102)

[7] Heo Y J, Cho J, Heo M B. Improving Prediction Accuracy of GPS Satellite Clocks with Periodic Variation Behavior [J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(7): 3 001-3 008

[8] Senior K L, Ray J R, Beard R L. Characterization of Periodic Variations in the GPS Satellite Clocks[J]. GPS Solution, 2008, 12(3):211-225

[9] 徐君毅,曾安敏. ARIMA(0,2,q)模型在卫星钟差预报中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(5): 116-120 (Xu Junyi, Zeng Anmin. Application of ARIMA(0,2,q) Model to Prediction of Satellite Clock Error[J]. Journal of

Geodesy and Geodynamics, 2009, 29(5): 116-120)

[10] 赵亮, 兰孝奇, 盛建岳. ARIMA 模型在卫星钟差预报中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 135-137 (Zhao Liang, Lan Xiaoqi, Sheng Jianyue. Application of ARIMA Model in Satellite Clock Error Forecasting[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2012, 10(1): 135-137)

[11] Davis J, Bhattarai S, Ziebart M. Development of a Kalman Filter Based GPS Satellite Clock Time-Offset Prediction Algorithm [C]. European Frequency and Time Forum (EFTF), 2012

[12] 郑作亚, 陈永奇, 卢秀山. 灰色模型修正及其在实时 GPS 卫星钟差预报中的应用研究[J]. 天文学报, 2008, 49(3): 306-320 (Zheng Zuoya, Chen Yongqi, Lu Xiushan. An Improved Grey Model for the Prediction of Real-time GPS Satellite Clock Bias[J]. Acta Astronomica Sinica, 2008, 49(3): 306-320)

[13] Wang J G, Hu Y H, He Z M, et al. Prediction of Clock Errors of Atomic Clocks Based on Modified Linear Combination Model[J]. Chinese Astronomy and Astrophysics, 2011, 35: 318-326

[14] 王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 一种新的导航卫星钟差预报与内插方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(4): 112-116 (Wang Yupu, Lü Zhiping, Chen Zhengsheng, et al. A New Method of Navigation Satellite Clock Bias Prediction and Interpolation[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(4): 112-116)

Analysing and Comparing the Prediction Performance of Several Satellite Clock Bias Prediction Models

WANG Yupu¹ LÜ Zhiping¹ GONG Xiaochun¹ ZHOU Haitao¹ WANG Ning

1 Shool of Geography Spatial Information, Information Engineering University, 62 Kexue Road, Zhengzhou 450001, China

Abstract: We study the prediction performance of several frequently-used methods used for navigation satellite clock bias prediction, including the quadratic polynomial model, the spectral analysis model, the grey model (GM (1,1)), the ARIMA model and the Kalman filtering model. By using the precise SCB data of GPS, the prediction tests are carried out to analyze their prediction results. The advantages and disadvantages of these methods are then compared. In addition, the prediction characters of six-type GPS sapceborne clocks in orbit are roughly analyzed.

Key words: satellite clock bias prediction; quadratic polynomial model; spectral analysis model; GM (1,1) model; ARIMA model; Kalman filtering model

中国地震局地震研究所高效开展 尼泊尔 Ms8.1 地震 GPS 应急观测

2015 年 4 月 25 日, 尼泊尔发生 Ms8.1 地震, 震中距我国国境线直线距离约 50 km, 我国西藏自治区日喀则市吉隆县、聂拉木县等地震感强烈, 拉萨等地震感明显。地震发生后, 中国地震局地震研究所联合中国地质大学(武汉)迅速开展 GPS 应急观测, 共派出 4 个 GPS 野外观测小组, 对震源区 300 km 范围内的 2 000 个网点和陆态网络区域站, 以及国家高等级三角测量控制点开展地震应急 GPS 观测。

野外观测人员冒着强余震的危险, 克服高原反应和生活艰苦等困难, 在日喀则市的吉隆、定日及聂拉木等地加紧开展野外应急观测。目前, 观测工作进展顺利。观测结果显示, 此次尼泊尔地震造成我国西藏日喀则市的吉隆、聂拉木等地向南水平运动 60 cm 左右, 藏南的水平同震影响由南向北逐渐减小; 吉隆垂直形变不明显, 聂拉木垂直下降 10 cm 左右, 聂拉木和吉隆以北的 5 个点位垂直上升 1~6 cm。