

Приложение 1. Оценка точности определения и прогнозирования орбит

Для примера расчеты проведены по КА «МЕТЕОР М1». В качестве исходных данных использовались TLE, взятые из Интернета по адресу “<http://www.space-track.org>”. Ниже приведены эти данные. Всего получен 41 набор элементов орбит. Последние элементы относятся к 12 октября 2009 г.

Space-Track - Object ID Query Results

Object ID Query Results

1	35865U	09049A	09260.72535468	-.00000045	00000-0	00000+0	0	19
2	35865	098.7998	310.8940	0003181	081.7658	278.3815	14.21921862	02
1	35865U	09049A	09260.86609852	.00000176	00000-0	10000-3	0	23
2	35865	098.8001	311.0403	0003574	080.8701	279.2896	14.21858330	20
1	35865U	09049A	09260.93646957	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00118
2	35865	098.8073	311.0962	0003522	107.5299	252.6413	14.21831829000036	
1	35865U	09049A	09261.85130047	.00000176	00000-0	10000-3	0	40
2	35865	098.8004	312.0250	0003601	080.8898	279.2547	14.21823900	165
1	35865U	09049A	09262.90688002	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00080
2	35865	098.8008	313.0781	0003592	078.1595	281.9966	14.21823599000318	
1	35865U	09049A	09263.18836766	.00000176	00000-0	10000-3	0	50
2	35865	098.8007	313.3591	0003564	077.3801	282.7795	14.21824067	353
1	35865U	09049A	09263.68096973	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00075
2	35865	098.8007	313.8501	0003584	074.1254	286.0304	14.21824264000428	
1	35865U	09049A	09264.66617459	.00000176	00000-0	10000-3	0	61
2	35865	098.8010	314.8326	0003553	071.4378	288.7185	14.21824773	567
1	35865U	09049A	09265.58100732	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00097
2	35865	098.8005	315.7444	0003490	068.8840	291.2717	14.21825238000697	
1	35865U	09049A	09266.00323756	.00000176	00000-0	10000-3	0	76
2	35865	098.8004	316.1656	0003476	067.7453	292.4070	14.21825238	750
1	35865U	09049A	09266.77732717	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00105
2	35865	098.8003	316.9374	0003459	066.1413	294.0126	14.21825459000861	
1	35865U	09049A	09267.76253122	.00000176	00000-0	10000-3	0	80
2	35865	098.8003	317.9196	0003392	063.6114	296.5400	14.21825734	1005
1	35865U	09049A	09268.74773547	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00111
2	35865	098.8001	318.9020	0003361	059.7753	300.3748	14.21826020001144	
1	35865U	09049A	09269.16996577	.00000176	00000-0	10000-3	0	95
2	35865	098.8001	319.3232	0003363	059.2873	300.8625	14.21826147	1200
1	35865U	09049A	09269.73293961	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00118
2	35865	098.8000	319.8845	0003341	057.1100	303.0398	14.21826338001282	
1	35865U	09049A	09270.64777175	.00000176	00000-0	10000-3	0	103
2	35865	098.7999	320.7967	0003335	054.0891	306.0582	14.21826594	1417
1	35865U	09049A	09270.71814367	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00117
2	35865	098.7999	320.8669	0003331	053.9950	306.1535	14.21826618001424	
1	35865U	09049A	09271.70334727	.00000176	00000-0	10000-3	0	114
2	35865	098.7999	321.8492	0003297	051.8181	308.3273	14.21826881	1563
1	35865U	09049A	09272.68855112	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00141
2	35865	098.7998	322.8315	0003244	049.1824	310.9608	14.21827113001709	
1	35865U	09049A	09273.11078140	.00000176	00000-0	10000-3	0	126
2	35865	098.7998	323.2526	0003240	050.3367	309.8063	14.21827182	1764
1	35865U	09049A	09273.67375518	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00148
2	35865	098.7998	323.8140	0003213	047.3155	312.8270	14.21827336001847	
1	35865U	09049A	09274.16635696	.00000176	00000-0	10000-3	0	138
2	35865	098.7998	324.3052	0003207	049.6494	310.4916	14.21827409	1919
1	35865U	09049A	09274.72933162	+.00000176	+00000-0	+10000-3	0	00151
2	35865	098.7997	324.8666	0003235	045.7514	314.3923	14.21827500001996	
1	35865U	09049A	09275.50342050	.00000176	00000-0	10000-3	0	147

2	35865	098.7994	325.6382	0003133	043.4994	316.6423	14.21827494	2107
1	35865U	09049A	09275.71453548	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00156	
2	35865	098.7994	325.8489	0003222	041.2417	318.8963	14.21827447002136	
1	35865U	09049A	09276.62936828	.00000176	00000-0	10000-3	0 154	
2	35865	098.7988	326.7607	0003204	036.8601	323.2764	14.21827496	2263
1	35865U	09049A	09276.91085537	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00169	
2	35865	098.7989	327.0415	0003204	035.7401	324.3972	14.21827547002306	
1	35865U	09049A	09277.75531651	.00000176	00000-0	10000-3	0 165	
2	35865	098.7985	327.8837	0003177	033.6125	326.5204	14.21827375	2421
1	35865U	09049A	09278.88126537	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00208	
2	35865	098.7984	329.0063	0002850	036.9325	323.2048	14.21827274002585	
1	35865U	09049A	09279.16275187	.00000176	00000-0	10000-3	0 172	
2	35865	098.7982	329.2871	0002653	041.9542	318.1796	14.21827152	2623
1	35865U	09049A	09279.72572576	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00198	
2	35865	098.7982	329.8484	0002804	034.8855	325.2456	14.21827199002707	
1	35865U	09049A	09280.42944343	.00000176	00000-0	10000-3	0 181	
2	35865	098.7979	330.5500	0002634	036.7103	323.4238	14.21827279	2807
1	35865U	09049A	09280.64055863	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00196	
2	35865	098.7977	330.7604	0002769	032.5468	327.5843	14.21827231002837	
1	35865U	09049A	09281.76650640	.00000176	00000-0	10000-3	0 194	
2	35865	098.7975	331.8829	0002899	027.2485	332.8774	14.21827137	2994
1	35865U	09049A	09282.75171110	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00228	
2	35865	098.7972	332.8650	0002964	022.9024	337.2232	14.21827175003135	
1	35865U	09049A	09283.10357027	.00000176	00000-0	10000-3	0 209	
2	35865	098.7972	333.2159	0002903	023.4149	336.7138	14.21827220	3186
1	35865U	09049A	09283.94803124	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00238	
2	35865	098.7971	334.0578	0003012	019.4902	340.6374	14.21827274003302	
1	35865U	09049A	09284.22951805	.00000176	00000-0	10000-3	0 218	
2	35865	098.7969	334.3383	0002920	020.3403	339.7864	14.21827243	3343
1	35865U	09049A	09284.86286414	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00237	
2	35865	098.7970	334.9699	0003006	018.0496	342.0763	14.21827135003438	
1	35865U	09049A	09285.42583840	.00000176	00000-0	10000-3	0 222	
2	35865	098.7967	335.5311	0002835	020.0781	340.0484	14.21826973	3517
1	35865U	09049A	09285.70732540	+0.00000176	+00000-0	+10000-3	0 00237	
2	35865	098.7967	335.8117	0002718	019.1738	340.9512	14.21826840003553	

Обработка этих данных производилась в два этапа:

1. Пересчет TLE в компоненты вектора (tRV) состояния в геоцентрической инерциальной системе координат (ГНСК) на момент «привязки» TLE. Этот пересчет осуществлялся путем обращения к модели движения SGP4, которая приспособлена к использованию TLE в качестве начальных условий.
2. Уточнение НУ путем обработки исходных данных в форме (tRV) с помощью МНК и выполнение прогнозов на «будущие» данные в этой форме. На мерном интервале обрабатывалось 7 наборов исходных данных. Прогноз выполнялся на 4 «будущих» набора данных в форме (tRV). Определялись погрешности прогноза по времени (трансверсали), радиусу и бинормали. Таким образом, последовательно обрабатывались все исходные данные. Число возможных уточнений и прогнозов составляет $42-7-4=31$.

Таблица 1. Исходные данные в форме (tRV)

№	Дата	Виток	Время	x	y	z	Vx	Vy	Vz
1	17.09	1	18887.72535595	4713.2880522	-5442.3198163	-0.0002860	-0.8666811335	-0.7373685038	7.3550584594
2	17.09	3	18887.86609822	4727.2564888	-5430.3677712	0.0000520	-0.8650073663	-0.7393880079	7.3550253713
3	17.09	4	18887.93646664	4733.3812298	-5426.7038957	-0.0000511	-0.8647530838	-0.7408080397	7.3536393355
4	18.09	17	18888.85130320	4819.9579809	-5348.4103001	0.0000511	-0.8522081806	-0.7541495459	7.3549623310
5	19.09	32	18889.90688039	4917.3609222	-5258.8339983	-0.0001061	-0.8382345694	-0.7697547273	7.3550766032
6	20.08	36	18890.18836726	4943.0712786	-5234.6314676	0.0000576	-0.8344244195	-0.7738712463	7.3551099824
7	20.09	43	18890.68097000	4987.6468331	-5191.9745947	-0.0000834	-0.8277628287	-0.7810258651	7.3552586507
8	21.09	57	18891.66617459	5075.8628076	-5105.6099739	0.0000002	-0.8142469402	-0.7951857364	7.3553643669
9	22.09	70	18892.58100718	5156.4008170	-5024.1257133	0.0000114	-0.8013952278	-0.8080652004	7.3554678494
10	23.09	76	18893.00323800	5193.1645462	-4986.0544126	-0.0000844	-0.7954082512	-0.8139501955	7.3555133072
11	23.09	87	18893.77732718	5259.8117861	-4915.6088770	-0.0000516	-0.7843406949	-0.8246153089	7.3555764274
12	24.09	101	18894.76253144	5343.2428040	-4824.6712391	-0.0000622	-0.7700293963	-0.8380106454	7.3556565965
13	25.09	115	18895.74773564	5425.0771915	-4732.2630210	-0.0000558	-0.7554698351	-0.8511521222	7.3557965155
14	26.09	121	18896.16996597	5459.7043678	-4692.2416726	-0.0000560	-0.7491870842	-0.8566912293	7.3558156259
15	26.09	129	18896.73293962	5505.3557504	-4638.4860696	-0.0000511	-0.7407086705	-0.8640292189	7.355889681
16	27.09	142	18897.64777201	5578.4241467	-4550.1867692	0.0000014	-0.7268012280	-0.8757636375	7.3559956242
17	27.09	143	18897.71814368	5583.9937076	-4543.3475871	0.0000001	-0.7257241092	-0.8766566888	7.3559971913
18	28.09	157	18898.70334766	5661.0163258	-4446.9145234	0.0000061	-0.7105338009	-0.8890239070	7.3560563513
19	29.09	171	18899.68855163	5736.3725197	-4349.1750427	0.0000134	-0.6951053109	-0.9011330043	7.3561192125
20	30.09	177	18900.11078204	5768.2119342	-4306.9204129	0.0000125	-0.6884834309	-0.9061951622	7.3560807859
21	30.09	185	18900.67375562	5810.0704625	-4250.1490131	0.0000148	-0.6794993147	-0.9129657964	7.3561620639
22	01.10	192	18901.16635788	5846.3525482	-4200.2258803	0.0000190	-0.6716904557	-0.9187124843	7.3560873132
23	01.10	200	18901.72933172	5887.1196253	-4142.6660895	0.0000045	-0.6625838682	-0.9253103297	7.3562224168
24	02.10	211	18902.50342063	5942.3643851	-4063.0051796	0.0000061	-0.6499435529	-0.9341862968	7.3562394791
25	02.10	214	18902.71453626	5957.1762935	-4041.0646488	0.0000507	-0.6464933534	-0.9365977826	7.3563498171
26	03.10	227	18903.62936890	6020.6438027	-3945.6995535	0.0000516	-0.6313479552	-0.9467984335	7.3564652003
27	03.10	231	18903.91085572	6039.8863542	-3916.1312639	0.0000310	-0.6266779832	-0.9499159770	7.3564905424
28	04.10	243	18904.75531747	6096.7687839	-3826.9131884	0.0000895	-0.6125521747	-0.9590300992	7.3565313297
29	05.10	259	18905.88126537	6170.8019515	-3706.8685056	-0.0000511	-0.5935876968	-0.9708179110	7.3562625703
30	06.10	263	18906.16275269	6189.0838797	-3676.6939931	0.0000061	-0.5888310288	-0.9736401389	7.3560418648
31	0.10	271	18906.72572673	6224.6016623	-3615.7687409	0.0000474	-0.5791739972	-0.9794575160	7.3562824814
32	07.10	281	18907.42944375	6268.5277587	-3539.3445711	0.0000079	-0.5670887872	-0.9864345317	7.3561498356
33	07.10	284	18907.64055934	6281.3430544	-3516.2235033	0.0000380	-0.5634073607	-0.9885408385	7.3563173771
34	08.10	300	18908.76650776	6348.8668686	-3392.4145168	0.0001148	-0.5438280435	-0.9994469792	7.3564999488
35	09.10	314	18909.75171213	6405.9824124	-3283.0462025	0.0001071	-0.5264928304	-1.0086616327	7.3566184230
36	10.10	319	18910.10357070	6426.0112162	-3243.7738646	0.0000407	-0.5203022270	-1.0118603733	7.3565696417
37	10.10	331	18910.94803155	6472.8660305	-3148.9485283	0.0000363	-0.5052819986	-1.0194509695	7.3567006991
38	11.10	335	18911.22951856	6488.2704915	-3117.2537004	0.0000531	-0.5002757213	-1.0218756335	7.3566299435
39	11.10	344	18911.86286462	6522.1607039	-3045.5059236	0.0000571	-0.4889357257	-1.0273785300	7.3567161117
40	12.10	352	18912.42583885	6551.8059044	-2981.5361323	0.0000431	-0.4788526725	-1.0320499769	7.3565780608
41	12.10	356	18912.70732597	6566.3922649	-2949.4421187	0.0000470	-0.4737334182	-1.0343973413	7.3565075115

Таблица 2. Результаты уточнения параметров орбиты в форме (tRV)

N	Время	X	Y	z	Vx	Vy	Vz
76	18893.0032380	5193.3425300	-4986.0091752	-0.037096	-0.79541867044	-0.81396033230	7.35539987039
87	18893.7773272	5259.9849070	-4915.5273959	-0.031457	-0.78435273544	-0.82464472934	7.35548816945
101	18894.7625314	5343.4370204	-4824.5388444	-0.113148	-0.76998268772	-0.83808394522	7.35558595588
115	18895.7477356	5425.2937045	-4732.1508850	-0.108479	-0.75544461859	-0.85121712505	7.35568903739
121	18896.1699660	5459.8607472	-4692.1538740	-0.084579	-0.74915408292	-0.85675361432	7.35573865319
129	18896.7329396	5505.5176784	-4638.4130177	-0.122584	-0.74064594460	-0.86410545069	7.35579732652
142	18897.6477720	5578.6066619	-4550.1258179	-0.053942	-0.72678872072	-0.87579398845	7.35587710230
143	18897.7181437	5584.1229792	-4543.3088501	-0.037730	-0.72571454512	-0.87667822878	7.35590773489
157	18898.7033477	5661.1465993	-4446.8454764	-0.020741	-0.71052350281	-0.88903956128	7.35598471133
171	18899.6885516	5736.5068647	-4349.0800219	0.008911	-0.69512897918	-0.90112922831	7.35605765674
177	18900.1107820	5768.2752012	-4306.8122038	0.066297	-0.68851200228	-0.90619362117	7.35608532538
185	18900.6737556	5810.1642244	-4250.0662413	-0.001189	-0.67950082714	-0.91296955851	7.35612600314
192	18901.1663579	5846.3534838	-4200.1143179	0.126204	-0.67173410913	-0.91869919838	7.35614508227
200	18901.7293317	5887.1997023	-4142.6202390	0.134921	-0.66267464699	-0.92525563934	7.35617326185
211	18902.5034206	5942.4533213	-4062.9106775	0.060787	-0.65002757531	-0.93417721035	7.35620543444
214	18902.7145363	5957.2973936	-4041.0720501	0.178999	-0.64667466474	-0.93649580918	7.35623116192
227	18903.6293689	6020.8473786	-3945.6706072	0.113634	-0.63154284370	-0.94675234766	7.35628673270
231	18903.9108557	6040.0676742	-3916.1072835	-0.025822	-0.62673257187	-0.94992992477	7.35633275177
243	18904.7553175	6096.9068488	-3826.9232216	0.240016	-0.61285295952	-0.95892573189	7.35638629815
259	18905.8812654	6170.7263187	-3706.6768778	0.033822	-0.59364341890	-0.97090569440	7.35641198509
263	18906.1627527	6188.8248577	-3676.4572566	0.103437	-0.58891060282	-0.97374468574	7.35637555959
271	18906.7257267	6224.5509140	-3615.6469557	0.054125	-0.57923941820	-0.97950141514	7.35637577858
281	18907.4294437	6268.4118037	-3539.1375410	-0.207069	-0.56689674255	-0.98665471315	7.35634161034
284	18907.6405593	6281.3736597	-3516.1430656	0.003944	-0.56344099820	-0.98860529566	7.35631344784
300	18908.7665078	6349.0577450	-3392.4129837	0.184933	-0.54403160539	-0.99938825094	7.35631127490
314	18909.7517121	6406.2952451	-3283.0404544	-0.011909	-0.52654515536	-1.00868176785	7.35631730070
319	18910.1035707	6426.2408788	-3243.7484998	-0.072359	-0.52026128353	-1.01191773792	7.35635602222
331	18910.9480316	6473.1409847	-3148.9325704	-0.109099	-0.50520301365	-1.01950948256	7.35644060071

Как видно из приведенных выше TLE, в первые сутки после запуска было получено 3 набора элементов. Анализ показал, что эти данные имеют повышенный уровень погрешностей. В дальнейшем TLE приводятся с меньшей частотой: в среднем через каждые 15 часов. С учетом этих обстоятельств первые 3 набора исходных данных не использовались. Таким образом, выполнено $31-3=28$ уточнений и прогнозов. Средняя длительность мерного интервала составила $15*(7-1)=90$ часов (3.75 суток).

В таблице 1 представлены результаты пересчета TLE в набор исходных данных в форме (tRV), а в таблице 2 представлены все результаты уточнения параметров орбиты (28 уточнений) в той же форме. При каждом из уточнений и для каждого их 6-ти мерных измерений рассчитывались остаточные невязки по каждому из компонентов вектора измерений. Эти невязки пересчитывались во временную погрешность и затем усреднялись по числу всех уточнений. Ниже в таблице 3 представлены СКО временных остаточных невязок каждого из 7-ми измерений, которые использовались на мерном интервале.

Таблица 3. СКО остаточных временных невязок, сек.

Номер измерения на мерном интервале						
1	2	3	4	5	6	7
0.0148	0.0139	0.0144	0.0158	0.0153	0.0127	0.0143

Из этих данных видно, что уровень остаточных невязок является достаточно низким. Он соответствует известным априорным данным о точности TLE. СКО находятся в диапазоне 0.014-0.015 сек, чему соответствует погрешность по положению ≈ 110 м. Среди 28 выполненных уточнений не было ни одного случая аномальных погрешностей.

В процессе уточнения параметров орбиты использовалась диагональная весовая матрица, в которой веса подбирались индивидуально для каждого из компонентов невязок по положению и по скорости. Эти компоненты проектировались на оси орбитальной системы координат (направления радиуса-вектора, трансверсали и бинормали). Веса подбирались таким образом, чтобы среднее отношение квадрата невязок к соответствующей дисперсии мало отличалось от 1. В таблице 4 приведены полученные оценки СКО погрешностей TLE.

Таблица 4. СКО погрешностей TLE в орбитальной системе (км, км/сек)

По положению			По скорости		
Радиус	Трансверсаль	бинормаль	радиус	трансверсаль	Бинормаль
0.102	0.105	0.091	1.04e-4	1.04e-4	0.36e-4

При выполнении прогнозов в «будущие» 4 точки интервалы прогноза принимали разные значения в связи с неравными интервалами времени между исходными орбитальными данными. Поэтому при усреднении погрешностей прогноза использовалась дискретная сетка интервалов прогноза с шагом 0.5 суток. При усреднении рассчитывались: среднее значение (М), корень квадратный из среднеквадратической ошибки (RMS) и СКО. Полученные результаты для временных погрешностей, а также погрешностей по радиусу представлены в таблице 5.

Таблица 5. Статистические характеристики погрешностей прогноза

Интервал Прогноза	По времени, сек			По радиусу, км			Число реализаций
	RMS	М	СКО	RMS	М	СКО	
0.0 – 0.5	0.023	0.000	0.023	0.1410	-0.0534	0.1305	28
0.5 - 1.0	0.026	0.009	0.024	0.1733	-0.0020	0.1733	12
1.0 - 1.5	0.036	-0.003	0.036	0.1716	-0.1174	0.1252	28
1.5 - 2.0	0.053	0.003	0.053	0.1897	-0.0334	0.1867	17
2.0 - 2.5	0.056	-0.009	0.055	0.1893	-0.1298	0.1378	24

Хотя число реализаций при статистической обработке результатов прогноза относительно невелико, данные таблицы дают достаточно объективное представление о погрешностях.

В таблице 6 приведены результаты уточнения параметров орбиты, отличающиеся от данных таблицы 2 тем, что они «привязаны» к экватору ($z=0$) и время (мировое) приведено в традиционной календарной форме.

Был проведен дополнительный анализ точности определения и прогнозирования параметров орбиты, заключающийся в сравнении приведенных результатов с результатами применения TLE в качестве начальных условий.

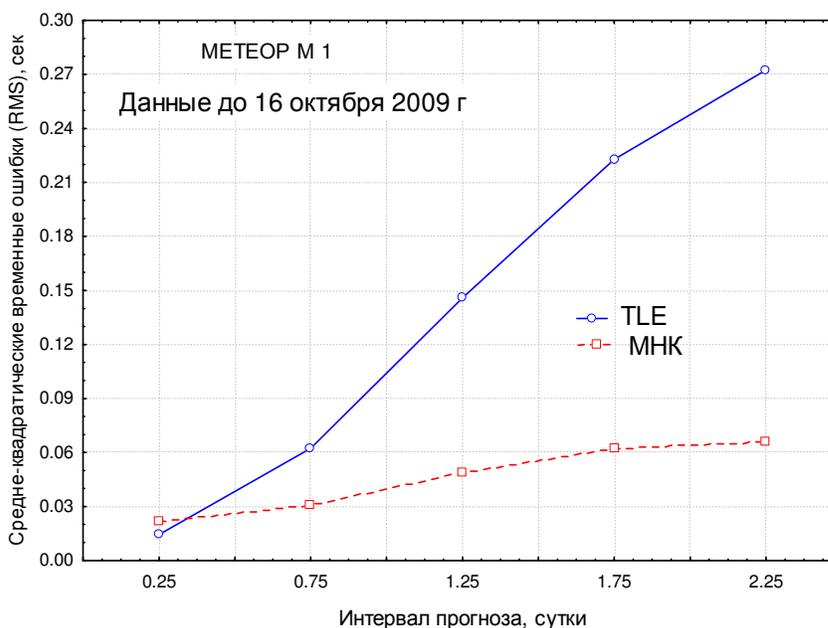


Рисунок 1. Зависимость погрешностей от интервала прогноза

Таблица 6. Результаты уточнения параметров орбиты в форме (tRV) на экваторе

N	D	m	год	H	M	S	x	y	z	Vx	Vy	Vz
76	23	9	2009	0	4	39.768	5193.3385789	-4986.0133382	0.0	-0.79544668172	-0.81393342064	7.35539978342
87	23	9	2009	18	39	21.071	5259.9816131	-4915.5309792	0.0	-0.78437679508	-0.82462222703	7.35548808333
101	24	9	2009	18	18	2.731	5343.4252346	-4824.5517891	0.0	-0.77007060747	-0.83800454585	7.35558587362
115	25	9	2009	17	56	44.376	5425.2826218	-4732.1634891	0.0	-0.75553020500	-0.85114245642	7.35568895672
121	26	9	2009	4	4	45.071	5459.8521900	-4692.1637742	0.0	-0.74922123839	-0.85669588542	7.35573857498
129	26	9	2009	17	35	26.000	5505.5053914	-4638.4274646	0.0	-0.74074408933	-0.86402274779	7.35579725072
142	27	9	2009	15	32	47.510	5578.6013886	-4550.1322862	0.0	-0.72683248361	-0.87575827859	7.35587702659
143	27	9	2009	17	14	7.618	5584.1193121	-4543.3133913	0.0	-0.72574518291	-0.87665328678	7.35590766106
157	28	9	2009	16	52	49.240	5661.1446505	-4446.8480257	0.0	-0.71054057733	-0.88902613509	7.35598463963
171	29	9	2009	16	31	30.861	5736.5077601	-4349.0789707	0.0	-0.69512154507	-0.90113485100	7.35605758767
177	30	9	2009	2	39	31.559	5768.2814581	-4306.8040753	0.0	-0.68845638315	-0.90623513560	7.35608525930
185	30	9	2009	16	10	12.485	5810.1641650	-4250.0664260	0.0	-0.67950183220	-0.91296881101	7.35612593891
192	1	10	2009	3	59	33.302	5846.3650565	-4200.0985911	0.0	-0.67162679722	-0.91877628106	7.35614502243
200	1	10	2009	17	30	14.244	5887.2119027	-4142.6033016	0.0	-0.66255912217	-0.92533691883	7.35617320486
211	2	10	2009	12	4	55.534	5942.4587373	-4062.9029889	0.0	-0.64997503880	-0.93421311960	7.35620537940
214	2	10	2009	17	8	55.909	5957.3131689	-4041.0492892	0.0	-0.64651956893	-0.93660100675	7.35623111311
227	3	10	2009	15	6	17.458	6020.8571722	-3945.6560076	0.0	-0.63144333474	-0.94681755009	7.35628668495
231	3	10	2009	21	51	37.939	6040.0655111	-3916.1106418	0.0	-0.62675525698	-0.94991520811	7.35633270480
243	4	10	2009	18	7	39.397	6096.9268747	-3826.8919538	0.0	-0.61264011645	-0.95905932112	7.35638625961
259	5	10	2009	21	9	1.323	6170.7290819	-3706.6724340	0.0	-0.59361306309	-0.97092392128	7.35641194394
263	6	10	2009	3	54	21.819	6188.8331718	-3676.4435846	0.0	-0.58881749271	-0.97379999020	7.35637552037
271	6	10	2009	17	25	2.781	6224.5552109	-3615.6397695	0.0	-0.57919041725	-0.97952987084	7.35637573767
281	7	10	2009	10	18	23.968	6268.3958810	-3539.1653334	0.0	-0.56708553155	-0.98654811500	7.35634157030
284	7	10	2009	15	22	24.327	6281.3740002	-3516.1425572	0.0	-0.56343739484	-0.98860730489	7.35631340367
300	8	10	2009	18	23	46.246	6349.0714593	-3392.3878800	0.0	-0.54386083340	-0.99947948887	7.35631123172
314	9	10	2009	18	2	27.929	6406.2944319	-3283.0421071	0.0	-0.52655625273	-1.00867607275	7.35631725451
319	10	10	2009	2	29	8.519	6426.2358012	-3243.7584734	0.0	-0.52032891723	-1.01188359046	7.35635597510
331	10	10	2009	22	45	9.941	6473.1335322	-3148.9477094	0.0	-0.50530573286	-1.01945950541	7.35644055430
335	11	10	2009	5	30	30.414	6488.4292398	-3117.2118467	0.0	-0.50027341940	-1.02191900879	7.35648730078
344	11	10	2009	20	42	31.485	6522.3220651	-3045.4931194	0.0	-0.48891128754	-1.02739677963	7.35656157014
352	12	10	2009	10	13	12.446	6551.8109905	-2981.4529544	0.0	-0.47877801212	-1.03214251697	7.35659462781
356	12	10	2009	16	58	32.943	6566.3293613	-2949.3421068	0.0	-0.47369729478	-1.03446779925	7.35659645532
368	13	10	2009	13	14	34.378	6608.9935505	-2852.5427813	0.0	-0.45838725109	-1.04132394965	7.35656299296
373	13	10	2009	21	41	14.973	6626.3516959	-2812.0462909	0.0	-0.45198323818	-1.04409929645	7.35654072489
385	14	10	2009	17	57	16.392	6667.0126788	-2714.3962210	0.0	-0.43653554229	-1.05062901880	7.35648082733
404	16	10	2009	2	2	38.644	6728.4208826	-2558.5650141	0.0	-0.41187771724	-1.06051904757	7.35641809470

При использовании TLE прогноз выполнялся путем обращения к модели движения SGP4, которая наилучшим образом приспособлена к использованию TLE. На рисунке 1 для двух рассматриваемых методик представлены среднеквадратические (RMS) временные погрешности в функции интервала прогноза.

Из этих данных видно, что непосредственное использование TLE в качестве НУ приводит к существенно большим погрешностям прогноза по сравнению с применением результатов их обработки с помощью МНК на некотором предшествующем мерном интервале. При прогнозе на 2 суток ошибки прогноза при непосредственном использовании TLE в качестве НУ оказались в 4 раза больше. Этот эффект объясняется рядом причин. Одна из них - это применение численной модели движения в процессе обработки TLE с помощью МНК и при прогнозе орбиты. Другая причина – лучшая точность результатов применения МНК по сравнению с точностью TLE. Данные об этом приведены ниже.

Данные рисунка 2 являются дополнением к изложенным выше оценками. На нем представлены *все* погрешности прогнозирования, полученные на основе исходного массива данных.

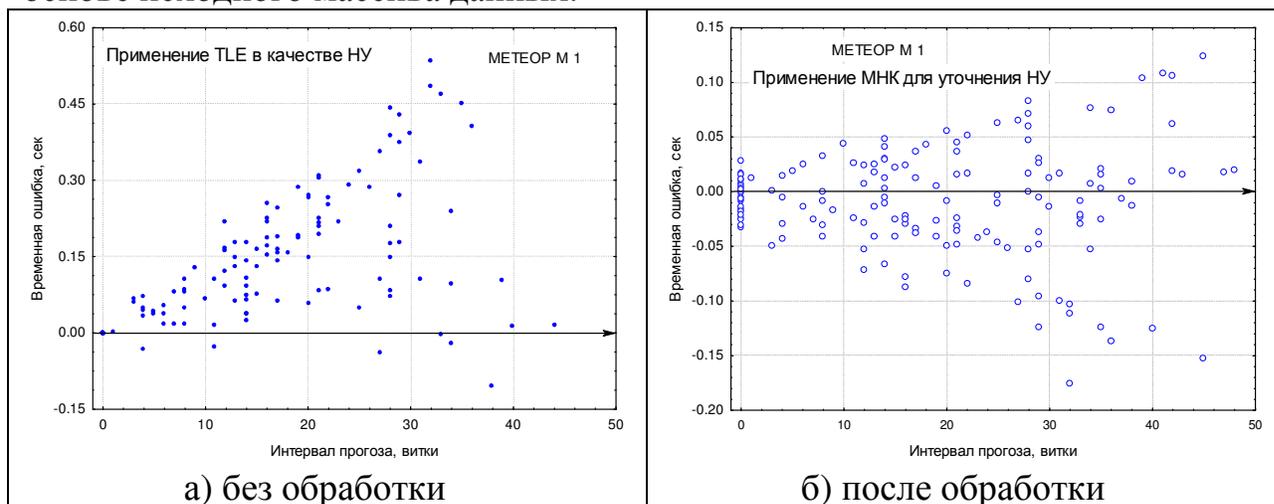


Рисунок 2. Погрешности прогноза при непосредственном использовании TLE и при их обработке с помощью МНК

Из этих данных видно, что при непосредственном использовании TLE в качестве НУ погрешности имеют значительное смещение их среднего значения от 0 и существенно больший разброс относительно среднего значения.

В заключение раздела приведем сравнение СКО погрешностей НУ при непосредственном использовании TLE и при их обработке с помощью МНК. СКО погрешностей TLE были определены по методике, изложенной в примечаниях к таблице 4. СКО погрешностей компонентов вектора

состояния, уточненных в результате применения МНК, определены на основе соответствующих компонентов расчетной корреляционной матрицы погрешностей. Приемлемая достоверность этих оценок обеспечивается настройкой компонентов весовой матрицы, о чем упоминалось выше. Все эти данные представлены в таблице 7.

Таблица 7. СКО погрешностей НУ в орбитальной системе (км, км/сек)

Исх. Данные	По положению			По скорости		
	радиус	трансверсаль	бинормаль	Радиус	Трансверсаль	Бинормаль
TLE	0.102	0.105	0.091	1.04e-4	1.04e-4	0.36e-4
МНК	0.029	0.052	0.033	0.637e-4	0.303e-4	0.140e-4
Статья	0.101	0.300	0.174	-	-	-
	0.105	0.370	0.186	-	-	-
	0.097	0.299	0.131	-	-	-
	0.110	2.852	0.240	-	-	-
	0.118	0.310	0.101	-	-	-

Кроме того в последних строках приведены оценки СКО погрешностей TLE из статьи “Improving ESA's Collision Risk Estimates by an Assessment of the TLE Orbit Errors of the US SSN Catalogue”, *T. Flohrer, H. Krag, H. Klinkrad et al. Fifth European Conference on Space Debris, 30 March – 2 April 2009, ESOC, Darmstadt, Germany.* В упомянутой статье такого рода оценки «привязаны» к орбитам конкретных КА. Ниже на рисунке 3 приведена «вырезка» из статьи с полученными оценками СКО. В ней выделены те объекты, которые по своим орбитальным характеристикам близки к КА «МОНИТОР М 1».

Satellite (km)	Source (-)	<i>a</i> (km)	<i>e</i>	<i>i</i>	σ_U	σ_V	σ_W
65032A	CPF	7492	0.025	41.2	0.077	0.215	0.265
75010A	CPF	7339	0.020	49.8	0.153	0.416	0.319
76039A	CPF	12273	0.004	109.9	0.075	0.302	0.174
86061A	CPF	7864	0.002	50.0	0.101	0.300	0.186
92070B	CPF	12159	0.014	52.6	0.178	0.443	0.437
93061B	CPF	7169	0.001	98.4	0.105	0.370	0.135
95021A	CPF	7154	0.001	98.6	0.097	0.299	0.131
00039B	CPF	6706	0.001	87.2	0.219	0.909	0.104
01055A	CPF	7715	0.001	66.0	0.141	0.412	0.189
01056A	CPF	7388	0.003	99.4	0.110	2.852	0.240
02009A	CPF	7159	0.001	98.5	0.118	0.311	0.101
02012A	CPF	6834	0.004	89.0	0.249	0.760	0.133
02012B	CPF	6833	0.004	89.0	0.248	0.720	0.145
03042G	CPF	7060	0.002	98.0	0.113	0.275	0.088
06055F	CPF	6677	0.002	51.7	0.240	1.463	0.173
07026A	CPF	6892	0.002	97.4	0.136	0.550	0.128
71114B	Radar	7143	0.002	74.0	0.295	0.864	0.409
78105A	Radar	7160	0.003	74.1	0.443	1.285	0.474
82051A	Radar	7158	0.002	74.0	0.317	0.783	0.316
83063B	Radar	7146	0.004	82.1	0.202	0.833	0.270
83079A	Radar	7157	0.002	74.0	0.380	0.912	0.438
85006A	Radar	7154	0.002	74.0	0.350	0.894	0.318
85006B	Radar	7150	0.003	74.1	0.317	0.816	0.214
94083B	Radar	7159	0.001	74.0	0.312	0.891	0.511
98053H	Radar	7175	0.001	45.0	0.231	0.682	0.595

Рисунок 3. «Вырезка» из статьи

Из данных таблицы 7 видно следующее:

- СКО результатов уточнения НУ с помощью МНК в 2-3 раза меньше «оптимистических» значений СКО погрешностей TLE.
- По данным упомянутой статьи СКО погрешностей TLE не меньше соответствующих наших оценок, представленных в таблицах 4 и 7. Для отклонений по радиусу оценки СКО согласуются хорошо, а для остальных компонентов оценки по данным статьи – в несколько раз больше.

А.И. Назаренко

Октябрь 2009 г