

Параллельное априорное определение границ изменения параметров возможных орбит

Е.А. Трушкова,
ИПУ РАН, ОАО НПК «Системы прецизионного приборостроения»,
Москва;
Г.А. Матвеев,
ИПС имени А.К. Айламазяна РАН, Переславль-Залесский

1 Введение

Основным направлением развития и применения оптико-электронных средств наблюдения космического пространства является расширение их возможностей по наблюдению, сопровождению и каталогизации малоразмерных объектов космического мусора (ОКМ) [1–6]. Примерами успешно развиваемых ключевых разработок в этом направлении являются сокращение временного цикла обзора одной площадки, применение эффективных стратегий обзора, оперативное обнаружение и определение орбит некаталогизированных ОКМ во время проведения сеанса наблюдений [7–10]. Одновременно с основным режимом работы обзорного средства работает и комплекс программ обработки траекторных измерений (ОТИ), осуществляющий оперативную обработку измерений для идентификации с орбитами каталогизированных космических объектов (КО). При успешной идентификации измерений комплекс программ ОТИ производит уточнение орбит каталогизированных КО по полученным измерениям. Если полученные измерения не идентифицировались ни с одним каталогизированным объектом, то дополнительно решаются задачи обнаружения и сбора информации по некаталогизированному ОКМ непосредственно в процессе выполнения наблюдений.

При получении очередной серии неидентифицированных измерений запускается задача определения орбит новых КО. Обнаружение орбит новых КО заключается в поиске неидентифицированных измерений, относящихся к одному КО, построению и записи в каталог орбиты по этому КО. Один из подходов оперативного обнаружения и определения орбит некаталогизированных ОКМ [10] апробирован и успешно применяется на российских оптических широкопольных средствах. Однако, много времени тратится на операцию полного перебора коротких серий измерений

(треков) и выбор разнесенных во времени трех серий, предположительно относящихся к одному КО, используемых для последующего построения возможной орбиты. Данная статья посвящена вопросу сокращения перебора треков при помощи предварительного анализа полученных измерений с точки зрения параллельного априорного построения границ изменения параметров возможных орбит. Подобный подход был использован в работе [11] для решения задачи идентификации орбиты с помощью генерации множества возможных орбит, построенных в параллельном режиме по имеющимся угловым измерениям от оптических наземных средств. Так, для ускорения работы программы обнаружения и определения орбит некаталогизированных ОКМ предлагается использовать вспомогательный алгоритм построения для каждого трека границ параметров возможных орбит и последующего выбора троек треков, допустимые области изменений параметров возможных орбит которых имеют непустое пересечение.

2 Постановка задачи

Для каждого трека (группы последовательных измерений) T_i данной последовательности треков $\mathbf{T} = \{\mathbf{T}_i\}_{i=\overline{1, N}}$ определяются границы изменения параметров возможных эллиптических орбит: дальности $\rho_i \in [\rho_{i \min}, \rho_{i \max}]$, наклоны $I_i \in [I_{i \min}, I_{i \max}]$ и долготы восходящего узла $\Omega_i \in [\Omega_{i \min}, \Omega_{i \max}]$ в заданной области изменения эксцентриситета $e \in [e_{i \min}, e_{i \max}]$. Далее находятся все тройки треков $(T_{i_1}, T_{i_2}, T_{i_3}) \in \mathbf{T}$, такие, что

$$\begin{aligned} &([\rho_{i_1 \min}, \rho_{i_1 \max}] \times [I_{i_1 \min}, I_{i_1 \max}] \times [\Omega_{i_1 \min}, \Omega_{i_1 \max}]) \cap \\ &\cap ([\rho_{i_2 \min}, \rho_{i_2 \max}] \times [I_{i_2 \min}, I_{i_2 \max}] \times [\Omega_{i_2 \min}, \Omega_{i_2 \max}]) \cap \\ &\cap ([\rho_{i_3 \min}, \rho_{i_3 \max}] \times [I_{i_3 \min}, I_{i_3 \max}] \times [\Omega_{i_3 \min}, \Omega_{i_3 \max}]) \neq \emptyset, \end{aligned}$$

то есть границы изменения параметров возможных орбит для трех треков пересекаются.

Это позволяет в последовательности треков, переданных на обнаружение, существенно сократить количество перебираемых троек. Так, в нижеследующем примере для входящей последовательности из 13 треков ($n = 13$) число полного перебора троек равно $C_{13}^3 = 286$, а проведенный

предварительный анализ треков позволил сократить число перебираемых треков до 13.

Основная задача состоит в нахождении по измерениям (время t , прямое восхождение α , склонение δ , координаты измерительной станции \mathbf{R}) одного трека $T_i = \left\{ t, \alpha, \dot{\alpha}, \delta, \dot{\delta}, \mathbf{R}, \dot{\mathbf{R}} \right\}_{j=1, n}$ границ параметров орбиты, которой может принадлежать трек, при заданных интервалах изменения большой полуоси $a \in [a_{min}, a_{max}]$ и эксцентриситета $e \in [e_{min}, e_{max}]$: границ возможного изменения дальности $\rho \in [\rho_{min}, \rho_{max}]$, наклона $I \in [I_{min}, I_{max}]$, долготы восходящего узла $\Omega \in [\Omega_{min}, \Omega_{max}]$. Подобная задача рассматривалась в работе [11] и может быть разбита на последовательное решение следующих выделенных вспомогательных задач.

3 Вспомогательные задачи

Задача 1. Выбор из измерений трека двух «хороших».

Для решения задачи 1, значения α_j и δ_j приближаются кривыми второго порядка $\alpha(t)$ и $\delta(t)$ по МНК. Из всех измерений данного трека выбираются два j_1, j_2 , для которых расстояние между точкой трека (α_j, δ_j) и ее аппроксимацией $(\alpha(t_j), \delta(t_j))$ наименьшее, при условии, что $|j_1 - j_2|$ не меньше половины общего количества измерений. Далее, формально полагая $j_1 = 1, j_2 = 2$, выбранные измерения будем обозначать через $\left(t_1, \alpha_1, \dot{\alpha}_1, \delta_1, \dot{\delta}_1, \mathbf{R}_1, \dot{\mathbf{R}}_1 \right), \left(t_2, \alpha_2, \dot{\alpha}_2, \delta_2, \dot{\delta}_2, \mathbf{R}_2, \dot{\mathbf{R}}_2 \right), t_1 < t_2$.

Задача 2. По данным $(\alpha, \delta, \mathbf{R}), [a_{min}, a_{max}], [e_{min}, e_{max}]$ построение начальных границ дальности $\rho \in [\rho_{0min}, \rho_{0max}]$.

Искомые границы получаются как решение системы неравенств относительно неизвестного ρ (интервал между минимально допустимым перигеем и максимально допустимым апогеем):

$$(a_{min}(1 - e_{max}))^2 \leq \|\mathbf{r}(\rho)\|^2 \leq (a_{max}(1 + e_{max}))^2, \quad \rho \geq 0,$$

где $\mathbf{r}(\rho) = \mathbf{R} + \rho \mathbf{u}$, $\mathbf{u} = (\cos \delta \cos \alpha, \cos \delta \sin \alpha, \sin \delta)^T$.

Задача 3. По данным $(\alpha, \dot{\alpha}, \delta, \dot{\delta}, \mathbf{R}, \dot{\mathbf{R}})$, a, ρ построение соответствующих $\dot{\rho}_{\pm}, e_{\pm}$.

Искомые значения $\dot{\rho}_{\pm}$ получаются как решение уравнения относительно $\dot{\rho}$ (энергия — первый интеграл движения по кеплеровой орбите):

$$\frac{\dot{\mathbf{r}}(\dot{\rho}) \cdot \dot{\mathbf{r}}(\dot{\rho})}{2} - \frac{\mu}{\|\mathbf{r}\|} = -\frac{\mu}{2a},$$

где $\mathbf{r} = \mathbf{R} + \rho \mathbf{u}$, $\mathbf{u} = (\cos \delta \cos \alpha, \cos \delta \sin \alpha, \sin \delta)^T$, $\dot{\mathbf{r}}(\dot{\rho}) = \dot{\mathbf{R}} + \rho \dot{\mathbf{u}} + \dot{\rho} \mathbf{u}$,
 $\dot{\mathbf{u}} = \dot{\delta}(-\sin \delta \cos \alpha, -\sin \delta \sin \alpha, \cos \delta)^T + \dot{\alpha}(-\cos \delta \sin \alpha, \cos \delta \cos \alpha, 0)^T$.

После чего соответствующие значения e_{\pm} находятся по формуле (норма вектора Лапласа)

$$e_{\pm} = \left\| \frac{\dot{\mathbf{r}}(\rho_{\pm}) \times (\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}(\rho_{\pm}))}{\mu} - \frac{\mathbf{r}}{\|\mathbf{r}\|} \right\|.$$

4 Основная задача

При заданном значении точности ε для сетки узловых значений a в области $[a_{min}, a_{max}]$ при известных значениях

$$(t_1, \alpha_1, \dot{\alpha}_1, \delta_1, \dot{\delta}_1, \mathbf{R}_1, \dot{\mathbf{R}}_1, t_2, \alpha_2, \dot{\alpha}_2, \delta_2, \dot{\delta}_2, \mathbf{R}_2, \dot{\mathbf{R}}_2), \quad [e_{min}, e_{max}]$$

найти границы изменения параметров a , ρ , I , Ω возможных орбит.

Сначала решается **Задача 2** по данным $(\alpha_1, \delta_1, \mathbf{R}_1)$ и $(\alpha_2, \delta_2, \mathbf{R}_2)$ и определяется область изменения дальностей $[\rho_{1 min}, \rho_{1 max}] \times [\rho_{2 min}, \rho_{2 max}]$.

Далее осуществляется перебор узловых значений (a, ρ_1, ρ_2) по сетке в полученной области $[a_{min}, a_{max}] \times [\rho_{1 min}, \rho_{1 max}] \times [\rho_{2 min}, \rho_{2 max}]$.

А именно, для каждой тройки значений (a, ρ_1, ρ_2) :

1. Проверяется выполнение условий (наименьший возможный эксцентриситет e_0 и наименьшая возможная длина большой полуоси a_0 , а также теорема Эйлера о времени полета Δt_p между данными точками положения на параболической (с нулевой энергией) орбите)

$$e_0 = \frac{|\|\mathbf{r}_1\| - \|\mathbf{r}_2\||}{\|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1\|} \leq e_{max},$$

$$a_0 = \frac{1}{4} (\|\mathbf{r}_1\| + \|\mathbf{r}_2\| + \|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1\|) \leq a_{max},$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 > \Delta t_p = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{a_0^3}{\mu}} (1 - \lambda^3),$$

где $\mathbf{r}_1 = \mathbf{R}_1 + \rho_1 \mathbf{u}_1$, $\mathbf{r}_2 = \mathbf{R}_2 + \rho_2 \mathbf{u}_2$, $0 \leq \lambda^2 = \frac{\|\mathbf{r}_1\| + \|\mathbf{r}_2\| - \|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1\|}{\|\mathbf{r}_1\| + \|\mathbf{r}_2\| + \|\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1\|} \leq 1$.

2. Вычисляются значения $I = \arccos(\mathbf{n} \cdot \mathbf{k})$, $\Omega = \mathbf{i} \cdot \frac{\mathbf{k} \times \mathbf{n}}{\|\mathbf{k} \times \mathbf{n}\|}$, где $\mathbf{n} = \frac{\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2}{\|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2\|}$.

3. Решается **Задача 3** для наборов данных $(\alpha_1, \dot{\alpha}_1, \delta_1, \dot{\delta}_1, \mathbf{R}_1, \dot{\mathbf{R}}_1, \mathbf{a}, \rho_1)$, $(\alpha_2, \dot{\alpha}_2, \delta_2, \dot{\delta}_2, \mathbf{R}_2, \dot{\mathbf{R}}_2, \mathbf{a}, \rho_2)$. Получаются значения $\dot{\rho}_{1\pm}$, $e_{1\pm}$ и $\dot{\rho}_{2\pm}$, $e_{2\pm}$ и их средние величины $\dot{\rho}_{\pm} = \frac{1}{2}(\dot{\rho}_{1\pm} + \dot{\rho}_{2\pm})$, $e_{\pm} = \frac{1}{2}(e_{1\pm} + e_{2\pm})$. Вычисляются соответствующие им величины I_{\pm} , Ω_{\pm} из соотношений

$$I = \arccos\left(\frac{\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}}{\|\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}}\|} \cdot \mathbf{k}\right), \quad \Omega = \arccos\left(\mathbf{i} \cdot \frac{\mathbf{k} \times (\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}})}{\|\mathbf{k} \times (\mathbf{r} \times \dot{\mathbf{r}})\|}\right).$$

4. Проверяется выполнение условий

$$|e_{1\pm} - e_{2\pm}| \leq \varepsilon(e_{max} - e_{min}),$$

$$|I - I_{\pm}| \leq 180\varepsilon,$$

$$|\Omega - \Omega_{\pm}| \leq 360\varepsilon.$$

5. Вычисляются границы изменения параметров a , ρ , I , Ω «хороших» орбит.

Дальнейшее уточнение полученных границ изменения возможных орбит может быть проведено итерационно для уменьшающегося на каждой итерации значения точности ε .

5 Вычислительные эксперименты

Входная последовательность включает 13 треков. После выбора в каждом треке двух измерений сформировалась следующая таблица необходимых данных для вычисления границ параметров орбит.

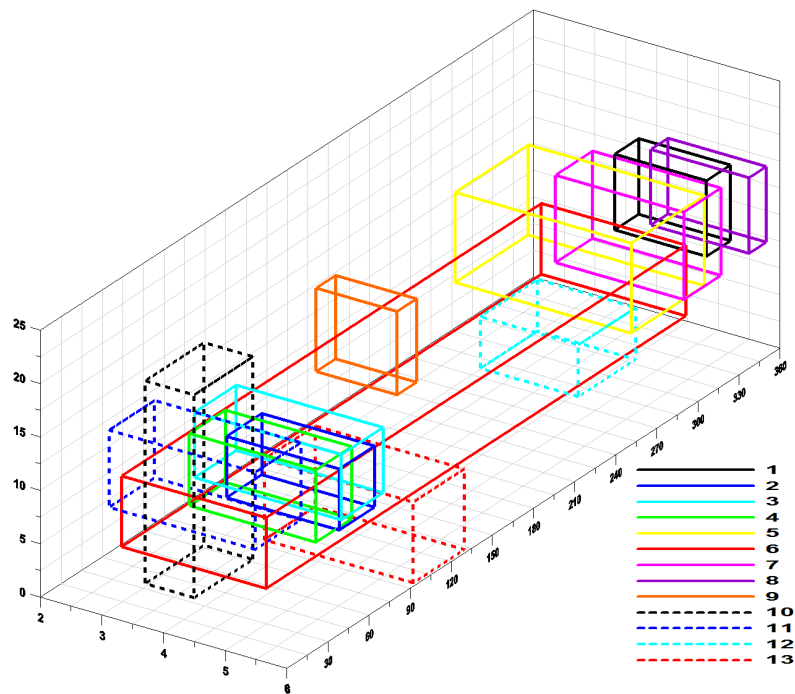
№	Δt , с	α , град	$\dot{\alpha}$, $10^3 \cdot \text{град/с}$	δ , град	$\dot{\delta}$, $10^3 \cdot \text{град/с}$	\mathbf{R} , км			$\dot{\mathbf{R}}$, км/с		
1	70	5.129	0.073	-0.370	0.008	-163.397	-4621.021	4381.470	0.336	-0.011	0
		5.134	0.071	-0.369	0.008	-139.807	-4621.795	4381.470	0.337	-0.010	0
2	254	3.908	0.071	-0.086	-0.012	435.094	-4603.393	4381.470	0.335	0.031	0
		3.926	0.071	-0.089	-0.012	520.278	-4594.545	4381.470	0.335	0.037	0
3	82	3.924	0.064	-0.091	-0.013	515.252	-4595.111	4381.470	0.335	-0.037	0
		3.929	0.063	-0.092	-0.012	542.720	-4591.948	4381.470	0.334	0.039	0
4	142	4.529	0.067	-0.260	-0.013	-37.999	-4623.753	4381.470	0.337	-0.002	0
		4.539	0.067	-0.262	-0.013	9.879	-4623.898	4381.470	0.337	0.000	0
5	344	5.027	0.075	-0.318	0.011	-728.199	-4566.208	4381.470	0.332	-0.053	0
		5.052	0.075	-0.314	0.011	-613.439	-4583.037	4381.470	0.334	-0.044	0
6	508	3.544	0.086	-0.257	-0.006	-2099.929	-4119.567	4381.470	0.300	-0.153	0
		3.588	0.086	-0.260	-0.006	-1945.918	-4194.512	4381.470	0.305	-0.141	0
7	494	5.015	0.083	-0.341	0.009	-434.892	-4603.412	4381.470	0.335	-0.031	0
		5.056	0.083	-0.336	0.010	-268.817	-4616.088	4381.470	0.336	-0.019	0
8	157	4.605	0.057	-0.408	0.000	-2628.813	-3803.929	4381.470	0.277	-0.191	0
		4.614	0.057	-0.408	0.000	-2585.092	-3833.775	4381.470	0.279	-0.188	0
9	224	4.530	0.095	-0.001	0.006	-2381.782	-3963.288	4381.470	0.289	-0.173	0
		4.551	0.094	0.000	0.005	-2316.729	-4001.662	4381.470	0.291	-0.168	0
10	538	4.012	0.055	-0.293	-0.012	-1431.269	-4396.817	4381.470	0.320	-0.104	0
		4.042	0.059	-0.300	-0.013	-1257.718	-4449.571	4381.470	0.324	-0.091	0
11	67	3.945	0.072	-0.287	-0.016	-1706.203	-4297.604	4381.470	0.313	-0.124	0
		3.950	0.072	-0.289	-0.016	-1685.186	-4305.889	4381.470	0.313	-0.122	0
12	426	4.622	0.071	-0.183	0.006	-3705.851	-2765.357	4381.470	0.201	-0.270	0
		4.653	0.072	-0.181	0.006	-3618.173	-2879.125	4381.470	0.209	-0.263	0
13	456	4.045	0.056	-0.080	-0.002	-3370.538	-3165.439	4381.470	0.230	-0.245	0
		4.071	0.055	-0.081	-0.002	-3263.437	-3275.746	4381.470	0.238	-0.237	0

Полученные границы орбит приведены в следующей таблице (выделены четыре области изменения эксцентриситета: $e_{area} = 1$ соответствует области $0 \leq e \leq 0.1$, $e_{area} = 2 - 0.1 \leq e \leq 0.3$, $e_{area} = 3 - 0.3 \leq e \leq 0.6$ и $e_{area} = 4 - 0.6 \leq e \leq 0.9$).

№	e_{area}	ρ_{min} , КМ	ρ_{max} , КМ	I_{min} , град	I_{max} , град	Ω_{min} , град	Ω_{max} , град
1	1	33613.956	52381.905	11.502	18.826	350.083	360.000
	2	37868.200	41224.697	10.231	19.778	345.737	360.000
	3	30605.722	39128.835	10.962	17.196	346.360	359.714
	4	24032.107	33537.704	9.053	16.140	339.655	357.212
2	1	32916.409	52214.004	6.921	11.529	42.424	69.222
	2	36198.715	41244.384	7.475	12.124	50.406	64.303
	3	30538.450	39042.829	7.495	12.485	52.543	71.444
	4	24070.227	35733.542	7.607	13.340	56.040	81.844
3	1	36364.279	52228.56	8.139	12.881	42.021	62.960
	2	37752.279	39863.02	8.835	13.376	50.425	61.222
	3	32145.486	39050.28	8.848	13.590	51.042	67.056
	4	21110.193	36293.45	8.917	15.029	53.626	84.111
4	1	33787.297	51468.022	9.517	16.023	33.918	50.967
	2	37197.046	40519.339	10.113	15.026	38.298	49.517
	3	31951.552	40190.632	9.350	14.987	38.466	53.257
	4	22301.983	35387.762	7.603	14.367	41.413	67.728
5	1	31468.991	52125.664	9.679	17.121	329.863	347.046
	2	34632.070	37979.655	8.254	17.785	326.070	346.162
	3	30503.026	38997.540	9.740	15.683	327.086	342.204
	4	15239.623	33442.988	6.360	14.798	285.263	338.688
6	1	27860.800	52359.886	4.044	12.366	314.438	338.537
	2	31750.087	35105.842	5.250	10.349	325.057	337.961
	3	31736.272	35244.535	5.267	10.372	324.922	337.844
	4	16663.041	31619.544	3.095	9.725	31.747	338.143
7	1	28584.758	52123.370	8.786	17.226	338.882	356.068
	2	34630.436	37977.939	3.657	22.206	327.380	360.000
	3	26641.080	35135.337	8.488	14.975	333.942	350.078
	4	20402.859	33672.775	6.507	14.687	322.075	349.218
8	1	43013.267	52653.863	14.005	19.739	344.786	354.426
	3	36213.131	41545.179	12.793	18.259	342.141	352.266
	4	27876.113	38045.739	10.566	17.645	338.940	351.567
	3	23984.972	50481.738	3.250	11.393	181.259	207.403
9	3	22950.351	29930.643	3.490	14.151	178.859	200.918
	4	15946.175	24319.452	7.071	14.881	178.828	193.045
	1	41193.199	51916.879	12.488	18.126	3.457	15.718
	4	22780.690	27843.065	3.408	22.390	5.815	48.807
11	1	32196.152	51851.370	11.273	18.164	1.241	18.866
	3	30392.904	37333.259	9.044	19.052	3.055	26.256
	4	18451.387	33571.305	9.068	16.299	9.988	43.265
	1	33167.207	52421.258	2.966	9.382	286.612	315.303
12	3	30621.479	38488.098	1.283	10.806	271.593	304.872
	4	22945.746	33089.442	3.329	8.176	249.252	291.019
	1	40476.340	50585.775	0.000	4.534	56.637	93.813
	3	33664.725	41986.343	0.000	7.469	78.203	117.547
13	4	22659.360	38082.958	0.170	7.722	93.530	130.877

На рисунке в виде параллелепипедов представлены полученные границы орбит для каждого из треков в четвертой области изменения эксцентриситета ($e_{area} = 4$, т. е. $0.6 \leq e \leq 0.9$), т. к. именно эта область порождает максимальное количество допустимых троек треков.

После анализа пересечений границ параметров возможных орбит по 13 трекам сформировалась последовательность всего из 13 троек треков: 1-5-7, 1-7-8, 2-3-4, 2-3-6, 2-4-6, 3-4-6, 4-6-10, 4-6-11, 4-10-11, 5-6-7, 5-6-12,



5-7-8, 6-10-11.

Вычислительные эксперименты, проводимые в рамках исследования вышеизложенной прикладной задачи априорной оценки параметров возможных орбит, направлены на уменьшение средней скорости обработки одного трека при увеличении точности полученной оценки. Скорость обработки одного трека естественным образом ограничена, т. к., являясь частью общей программы ОТИ, построение оценки параметров возможных орбит для каждого трека не должно сильно влиять на общее время цикла обработки измерений. Предложено для четырех подобластей изменения эксцентриситета параллельно решать задачу для каждого трека. При этом для каждой подобласти и каждого трека число итераций, необходимых для достижения требуемой точности, заранее неизвестно. Следовательно, при дальнейшей программной реализации алгоритма заранее неизвестно как будут загружены отдельные узлы вычислительной установки. Поэтому динамические программы предпочтительнее любых других типов. Динамическое распараллеливание имеет ряд преимуществ не только для случая, когда вопросы организации параллельного

счета решаются во время исполнения программы, но и для выравнивания нагрузки в гетерогенных и/или меняющихся со временем параллельных вычислительных системах, а также для задач, обладающих гранулами различной тяжести. При этом, использование неявных конструкций распараллеливания вычислений позволяет легко переносить программы между различными платформами параллельных вычислений — многопроцессорными системами, вычислительными кластерами, метакластерными системами и т. п.

T-система (OpenTS) — система параллельного программирования, реализующая концепцию автоматического динамического распараллеливания программ. Это оригинальная российская разработка, которая ведётся в Институте программных систем им. А.К. Айламазяна РАН [12,13], представляющая систему параллельного программирования, реализующую концепцию автоматического динамического распараллеливания программ. То есть многие аспекты организации параллельного счёта (распределение задач по узлам кластера, синхронизация процессов, организация пересылки данных) выполняются не программистом, а самой системой. Во многих случаях T-системе удастся удачно организовать все эти виды работ и получить хороший уровень распараллеливания программ.

Язык T++ является входным языком T-системы (OpenTS). Синтаксически язык T++ максимально приближен к языку C++. В языке T++ поддерживается функциональный подход к написанию программ: все данные T-функция («чистая» функция в языке T++) может получать только через входные аргументы, а результаты своей работы возвращать только через выходные аргументы. T-функция не должна иметь побочных эффектов. Таким образом, T-функция является гранулой параллелизма: при вызове данной функции всю информацию она получает через свои аргументы, поэтому её можно отдать на выполнение другому процессору.

Описанный выше алгоритм решения задачи априорного определения границ изменения параметров возможных орбит реализован в T-системе (язык программирования T++). Результаты исследования эффективности параллельной версии программы для обработки 100 треков представлены в следующей таблице.

Число ядер	Время, с	Среднее время обработки одного трека, с
1	195.178	1.95
2	146.233	1.46
4	86.399	0.86
8	55.220	0.55
16	53.346	0.53

Видно, что параллельная программная реализация алгоритма позволила сократить среднее время обработки одного трека с 1.95 секунд на одном ядре до 0.53 секунд на 16 ядрах суперкомпьютера, расположенного в Институте программных систем имени А.К. Айламазяна РАН.

Литература

1. Gorchakovsky, S.N., Grishin, E.A. Inshin, P.P., Novikov, S.B., Simonov, G.V., Shargorodsky, V.D. New Equipment for High-Accuracy Observations for Space Objects: First Measurement Results and Perspectives of Altay Optical/Laser Center Development An International Journal of Electromagnetic Waves and Electronic Systems. V. 12, June 2007.
2. Konoplev, A.O., Novikov, S.B. Astrometrical Software of Space Objects Angular Measurements for Wide-Field Systems of Cosmic Space Survey. An International Journal of Electromagnetic Waves and Electronic Systems. V. 12, June 2007.
3. Alby, F., Boer, M., Deguine, B., Escane, I., Newland, F., Portman, C. Status of CNES Optical Observations of Space Debris in Geostationary Orbit. COSPAR02-A-00319.
4. Earl, Michael A., Racey, Thomas J. The Canadian Automatic Small Telescope for Orbital Research (Castor) - A Raven System in Canada.
5. Klinkrad, H. Monitoring Space – Efforts Made by European Countries.
6. Flury, W., Massart, A., Schildknecht, T., Hugentobler, U., Kuusela, J., Sodnik, Z. Searching for Small Debris in the Geostationary Ring – Discoveries with the Zeiss 1-metre Telescope. ESA bulletin 104 – November 2000.
7. Payne, P. Timothy. New Deep Space Optical Search Strategies. Proceedings of the Fifth US/Russian Space Surveillance Workshop. St. Petersburg, 2003.
8. Schildknecht, T., Musci R., Ploner M., Flury, W., Kuusela, J., J. de Leon Cruz, L. de Fatima Dominguez Palmero. An Optical Search for Small-size Debris in GEO and GTO. Proceedings of the Fifth US/Russian Space Surveillance Workshop. St. Petersburg, 2003.

9. Flohrer, T., Schildknecht T., Musci, R. Proposed Strategies for Optical Observations in a Future European Space Surveillance Network, Journal Advances in Space Research, in print.
10. Yurasov V.S., Vygon V.G., Schargorodskiy, Technique for Operative Detection and Orbit Determination of Uncatalogued Space Objects, Proceedings of the Seventh U.S./Russian Space Surveillance Workshop, Monterey, California, 2007. Pp
11. Roscoe C. W. T., Schumacher Jr P. W., Wilkins M. P. Parallel Track Initiation for Optical Space Surveillance using Range and Range-Rate Bounds //Advances in the Astronautical Sciences. – 2014. – Т. 150. – С. 989-1008.
12. Абрамов С. М., Кузнецов А. А., Роганов В. А. Кроссплатформенная версия Т-системы с открытой архитектурой // Тр. Межд. науч. конф. «Параллельные вычислительные технологии (ПаВТ'2007)». 2007г. Челябинск: изд. ЮУрГУ. Т. 1. С. 115–121.
13. Кузнецов А. А. , Роганов В. А. Экспериментальная реализация отказоустойчивой версии системы OPENTS для платформы WINDOWS CCS. // Тр. Второй Межд. науч. конф. «Суперкомпьютерные системы и их применение (SSA'2008)». Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2008. С. 65–70. ISBN 978-985-6744-46-7