

УДК 004.89

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ НЕБЕСНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ПЗС-КАДРАХ

М. М. Безкровный

Старший преподаватель*

E-mail: bezkrovonii@gmail.com

В. Е. Саваневич

Доктор технических наук, профессор**

E-mail: vadyam@savanevych.com

Н. С. Соковикова

Аспирант**

E-mail: nataly.sokovikova@gmail.com

Я. С. Мовсесян

Аспирант**

E-mail: movsesian.yana@yandex.ua

А. В. Погорелов**

E-mail: pogartem@rambler.ru

А. Н. Дашкова

Аспирант*

E-mail: dashkova.an@gmail.com

Н. Ю. Дихтярь

Аспирант**

E-mail: mdihtyar@gmail.com

А. Б. Брюховецкий

Кандидат технических наук

ПАО "ХАРТРОН"

ул. Академика Проскуры, 1, г. Харьков, Украина, 61070

E-mail: izumsasha@gmail.com

Л. О. Михайлова*

E-mail: ne-luboff@yandex.ua

*Кафедра компьютерных систем и сетей

Запорожский институт экономики и информационных технологий

ул. Кияшка, 16-Б, г. Запорожье, Украина, 69015

**Кафедра электронно-вычислительных машин

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

У роботі проводиться аналіз точності оцінки екваторіальних координат небесних об'єктів. Проведено порівняльний аналіз статистичних властивостей оцінок об'єктів сонячної системи, отриманих за результатами тридцяти найпродуктивніших обсерваторій за кількістю спостережень астероїдів, з їх прогнозними значеннями, джерелом яких виступає сайт Центра малих планет. В якості критеріїв точності використані оцінки середньоквадратичного відхилення, значення і модулі похибок вимірювань

Ключові слова: об'єкти, оцінка місцезнаходження, цифрове зображення, астероїди, ПЗС-кадр, точність, телескоп, апертура

В работе анализируется точность оценки экваториальных координат небесных объектов. Проведен сравнительный анализ статистических свойств оценок объектов солнечной системы, полученных по результатам тридцати самых продуктивных обсерваторий по количеству наблюдений астероидов, с их прогнозными значениями, источником которых является сайт Центра малых планет. В качестве критериев точности использованы оценки среднеквадратического отклонения, значения и модули невязок измерений

Ключевые слова: объекты, оценка местоположения, цифровое изображение, астероиды, ПЗС-кадр, точность, телескоп, апертура

1. Введение

В наше время требования к точности астрономических наблюдений очень высоки. Необходимость высокой точности оценок параметров местоположения астрономических объектов обусловлена потребностью качественного обнаружения подвижных небесных тел, уточнения параметров их движения по малому количеству измерений [1]. Данные требования наиболее актуальны для завязки орбит астероидов и комет, которые могут представлять серьезную угрозу для нашей планеты [2]. Анализ статистических свойств получаемых оценок объектов солнечной системы может быть весьма эффективным для повы-

шения точности работы обсерваторий и выявления ошибок в работе астрономического программного обеспечения.

2. Литературный обзор

Источники [3–5] описывают методы оценки местоположения объектов, которые используются в программе CoLiTec. В [3] был предложен метод оценки координат астероида на дискретном изображении, а в [4] – метод оценки экваториальных координат астероида по оценкам его местоположения, полученным при помощи метода, предложенного в [5].

Данные работы содержат результаты ряда экспериментов по анализу точности оценки местоположения объектов, проведенных с использованием программного комплекса CoLiTec, но, в тоже время, методики получения представленных результатов не были подробно изложены. Как было отмечено в данных работах, наилучшей точности оценки местоположения объектов можно добиться, используя кубическую модель постоянных пластинки [4], а также учета фоновой составляющей изображения, как плоской наклонной помеховой подложки с параметрами, которые постоянны в пределах исследуемого строка [3].

К недостаткам исследования в обеих работах следует отнести то, что проведенные эксперименты были проведены на основе анализа невязок полученных наблюдений с каталожными звездами без сравнения точности оценки местоположения астероидов по внешним данным. В работе [6] проведен анализ точности оценок местоположения объектов, как по звездам, так и по астероидам, сближающимся с Землей. Наилучшая точность, как было установлено в [7], обеспечивается при использовании кубической модели постоянных пластинки. Одним из основных недостатков данной работы является то, что анализ основывается на сравнительно ярких объектах, относительно низкой скорости движения наблюдаемых небесных тел. Открываемые астероиды зачастую имеют более тусклый блеск (в среднем 20 звездная величина). Таким образом, для полного исследования точности оценки местоположения объектов требуется провести сравнительный анализ точности измерений по данным из нескольких внешних источников, которыми могут выступать обсерватории, ведущие независимые наблюдения.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является анализ точности определения местоположения небесных объектов ведущими обсерваториями мира.

В рамках работы исследуется точность измерений обсерваториями-партнерами CoLiTec на фоне самых продуктивных обсерваторий мира по данным Центра малых планет (MPC) [8]. По каждой обсерватории рассчитываются средние значения невязок по прямому восхождению и склонению, оценки среднеквадратического отклонения оценок положения объектов, средний модуль невязки измерений.

Точность измерений обсерваторий, использующих ПО CoLiTec [9], оценивается на основе набора серий кадров, полученных по наблюдениям обсерваторий на протяжении длительного периода времени. В процессе обработки измерений применялась субпиксельная модель изображения для объектов компактных групп [10] и объектов, смазанных собственным движением [11].

4. Исследование точности оценки координат небесных объектов

Для сравнительного анализа статистических свойств оценок применяемых в настоящее время методов, были использованы результаты тридцати самых продуктивных обсерваторий по количеству наблюде-

ний астероидов (табл. 1–3). Из рассмотрения, тем самым, были исключены обсерватории [12], которые, как правило, работают по одному единственному объекту в центре кадра в безветрие и в удобную фазу Луны. Обсерватории, использующие ПО CoLiTec, наблюдают во время порывов ветра и без них; работают в центре кадра и на его краях; формируют измерения по многим объектам на одном кадре.

В исследуемом временном интервале пользователями ПО CoLiTec были обсерватории: ISON-NM Observatory (H15), Andrushivka Astronomical Observatory (A50), ISON-Kislovodsk Observatory (D00). В рейтинге самых продуктивных обсерваторий мира по количеству измерений малых тел СС пользователи программы в 2012 году заняли 9, 13, 22 места. По суммарным итогам 2011–2012 года обсерватория ISON-NM (H15) заняла 7 место, как по числу измерений, так и по числу предварительных открытий.

В табл. 1–3 суммарное количество измерений, объектов и открытий астероидов приведено согласно циркулярам Центра малых планет (MPC) [8] за 2011–2013 гг. Анализ точности оценки местоположения астероидов был проведен путем сравнения полученных оценок с их прогнозными значениями, источником которых является сайт MPC [8].

По каждой обсерватории в табл. 1–3 также доступны: диаметр D собирающей линзы (главного зеркала) телескопа (размер апертуры телескопа), метры; – масштаб изображения S_{pix} пикселя, угловые секунды; средние значения $\bar{\Delta}_\alpha, \bar{\Delta}_\delta$ невязок по прямому восхождению α и склонению δ на заданное время; оценки среднеквадратического отклонения (СКО) $\sigma_\alpha, \sigma_\delta$ оценок положения объектов по прямому восхождению α и склонению δ на заданное время; оценка среднеквадратического отклонения σ оценок положения объектов, угловые секунды; σ_{pix} – оценка среднеквадратического отклонения оценок положения объектов, пиксели; средний модуль невязки измерений ARM (the average module of residual measurements).

Для расчета отдельных показателей приведенных таблиц использовались следующие выражения:

$$\sigma_{\cdot} = 0,5(\sigma_{\alpha} + \sigma_{\delta}), \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{pix}} = \frac{\sigma_{\cdot}}{S_{\text{pix}}}, \quad (2)$$

$$\text{ARM} = \sqrt{(\bar{\Delta}_{\alpha})^2 + (\bar{\Delta}_{\delta})^2}. \quad (3)$$

По среднему модулю невязок обсерватории-партнеры CoLiTec занимают лидирующие позиции в своем классе телескопов (рис. 1–3, а). Так в 2011 и 2012 гг. модуль средних невязок на обсерваториях H15 и A50 был равен 0,06".

По СКО измерений, в угловых секундах, обсерватории-партнеры CoLiTec не входят в список лучших (рис. 1–3, в, г). В 2011 году значение СКО (угловые секунды) для указанных обсерваторий составляло 0,515" (H15) и 0,51" (A50), в 2012 году – 0,515" (H15), 0,49"(D00) и 0,48" (A50). Причиной тому, кроме размера апертуры телескопа, является масштаб пикселя используемой ПЗС-матрицы. В попытке учесть этот фактор был использован СКО в пикселях.

Таблица 1

Точность тридцати наиболее производительных по числу измерений астероидов обсерваторий 2011 года по данным MPC [8]

N	Obser-vas tory code	Measurts, objects	Discoveries	D, m	S _{pix}	$\bar{\Delta}_\alpha$	σ_α	σ_r	σ_{pix}	ARM
						$\bar{\Delta}_\delta$	σ_δ			
1	G96	2106367, 382737	21770	1.50	1,0	-0,01 -0,04	0,32 0,28	0,3	0,3	0,041
2	704	1956368, 279129	495	1.0	2,25	0,25 0,43	0,66 0,64	0,65	0,29	0,497
3	F51	1557902, 351923	13628	1.8	0,3	0,05 0,06	0,16 0,17	0,165	0,55	0,078
4	703	1512387, 259412	2995	0.68	2,6	-0,21 0,17	0,67 0,68	0,675	0,25	0,270
5	691	811571, 154495	8356	0.9	1,1	-0,16 0,10	0,33 0,30	0,315	0,28	0,189
6	E12	219903, 52808	327	0.5	1.8	-0,04 0,32	0,49 0,48	0,485	0,26	0,322
7	645	208656, 45961	7							
8	D29	185303, 43414	318	1.04	1,7					
9	C51	162900, 15412	23		6	0,0 -0,03	0,5 0,65	0,61	0,1	0,067
10	CoLiTec user H15	154970, 37495	768	0.45	2	-0,03 0,06	0,49 0,54	0,515	0,25	0,067
11	106	75340, 18093	73	0.6	2	0,04 -0,11	0,36 0,35	0,355	0,17	0,117
12	291	70355, 19028	646	1.8	0,6	-0,13 0,15	0,36 0,27	0,315	0,52	0,191
13	J75	48469, 13209	561	0.45		-0,04 -0,14	0,42 0,40	0,41		0,146
14	644	34164, 6255	954							
15	CoLiTec user A50	33386, 9755	72	0.6	2,06	-0,03 0,05	0,51 0,51	0,51	0,24	0,058
16	926	28578, 8460	171	0.810.41	0,87	0,15 0,27	0,38 0,39	0,385	0,44	0,309
17	461	28038, 6281	782	0.601.02	1,1	-0,03 0,14	0,27 0,27	0,27	0,24	0,143
18	A14	24354, 6448	115	0.50		0,08 -0,06	0,41 0,36	0,385		0,1
19	J04	23322, 6460	188	1.0	0,62	0,16 0,24	0,29 0,30	0,295	0,47	0,288
20	A77	21677, 5423	318			0,27 0,22	0,63 0,50	0,565		0,348
21	114	18352, 3203	174	0.3		0,03 -0,12	0,42 0,35	0,385		0,124
22	689	18013, 1287	0			0,00 -0,02	0,15 0,14	0,145		0,02
23	G92	17515, 4934	12			0,08 0,05	0,62 0,58	0,6		0,094
24	H21	16639, 3505	143	0.610.810.76	0,8	0,06 0,01	0,40 0,42	0,41	0,51	0,061
25	J43	12837, 3246	116	0.5		0,12 0,24	0,53 0,47	0,5		0,268
26	A24	10547, 1489	0	0.36	1,4	0,16 0,19	0,46 0,42	0,44	0,31	0,248
27	621	10201, 2379	233	0.6	1,2	0,08 -0,02	0,34 0,33	0,335	0,27	0,082
28	807	10144, 2406	4	0.41		0,05 0,12	0,83 0,63	1,73		0,13
29	140	8633, 134	3			0,02 -0,01	0,15 0,17	0,16		0,022
30	141	7393, 717	37			0,03 0,04	0,22 0,22	0,22		0,05

Таблица 2

Точность тридцати наиболее производительных по числу измерений астероидов обсерваторий 2012 года по данным MPC [8]

N	Observatory code	Measurts, objects	Discoveries	D, m	S _{pix}	$\bar{\Delta}_\alpha$	σ_α	σ''	σ_{pix}	ARM
						$\bar{\Delta}_\delta$	σ_δ			
1	G96	2080033, 384204	17676	1.50	1,0	+0,02 +0,02	0,33 0,28	0,305	0,305	0,028
2	F51	1948353, 467091	13785	1.8	0.3	0,07 0,04	0,15 0,17	0,16	0,53	0,081
3	703	1723293, 282864	2278	0.68	2.6	-0,22 0,07	0,65 0,62	0,635	0,24	0,231
4	704	1681504, 262209	224	1.0	2.2	0,26 0,43	0,67 0,64	0,655	0,29	0,502
5	691	896972, 163714	7600	0.9	1.1	-0,16 0,10	0,32 0,29	0,305	0,27	0,189
6	E12	259295, 62621	430	0.5	1.8	-0,01 0,29	0,51 0,50	0,505	0,28	0,290
7	J43	102641, 22682	531	0.5	1.2	0,19 0,05	0,48 0,40	0,44	0,36	0,196
8	926	100161, 29986	454	0.81 0.41	0.87 1.3	0,02 0,05	0,37 0,35	0,36	0,41 0,27	0,54
9	CoLiTec user, H15	97878, 24170	338	0.45	2.0	-0,06 -0,01	0,50 0,53	0,515	0,25	0,061
10	106	72192, 17451	120	0.6	2.0	0,04 -0,12	0,36 0,34	0,35	0,17	0,126
11	A14	57243, 16239	159	0.50		0,06 -0,02	0,37 0,32	0,345		0,063
12	J04	43209, 10708	513	1.0	0.62	0,21 0,20	0,28 0,27	0,275	0,44	0,29
13	CoLiTec user, D00	31494, 7403	61	0.40	2.06	0,00 -0,06	0,57 0,41	0,49	0,23	0,06
14	291	24272, 6224	28	1.8	0.6	0,07 0,13	0,33 0,28	0,305	0,50	0,148
15	461	23847, 5615	170	0.60 1.02	1.1	0,00 0,15	0,27 0,27	0,27	0,24	0,15
16	644	22714, 4486	332	1.2	1					
17	H21	22672, 3870	181	0.61 0.81 0.76	0.8	0,03 0,01	0,34 0,36	0,35	0,43	0,032
18	I41	21245, 2392	1790	1.2	1.01	0,11 -0,03	0,23 0,23	0,23	0,22	0,114
19	A24	18940, 2412	0	0.36	1.4	0,14 0,24	0,37 0,33	0,35	0,25	0,278
20	645	18369, 5650	0	2.5	0.396					
21	807	12702, 2383	2	0.41		0,04 -0,01	0,29 0,24	0,265		0,041
22	CoLiTec user, A50	11559, 3725	13	0.6	2.07	0,25 -0,04	0,50 0,46	0,48	0,23	0,253
23	716	10669, 491	0			0,06 -0,01	0,33 0,23	0,28		0,061
24	D29	9918, 2927	38	1.04	1.7	0,09 -0,01	0,43 0,44	0,435	0,25	0,091
25	C41	8904, 3188	2	0.4	1.8	-0,16 0,09	0,85 0,72	0,785	0,43	0,184
26	621	6782, 1692	149	0.6	1.2	0,10 -0,01	0,35 0,35	0,35	0,29	0,101
27	H45	6414, 368	0	0.51		0,04 -0,05	0,33 0,31	0,32		0,064
28	D03	5489, 1396	121	0.4		-0,06 -0,05	0,64 0,45	0,545		0,078
29	950	5477, 800	123	2.5		0,09 0,11	0,28 0,24	0,26		0,142
30	71	5427, 329	0			0,01 0,12	0,63 0,43	0,53		0,120

Таблица 3

Точность тридцати наиболее производительных по числу измерений астероидов обсерваторий 2013 года по данным MPC [8]

N	Observatory code	Measurts, objects	Discoveries	D, m	S _{pix}	$\bar{\Delta}_\alpha$	σ_α	σ''	σ_{pix}	ARM
						$\bar{\Delta}_\delta$	σ_δ			
1	F51	2279609, 506894	14168	1.8	0.3	+0,07 +0,06	0,13 0,14	0,135	0,45	0,092
2	G96	1950642, 343808	11908	1.50	1.0	+0,04 +0,05	0,32 0,28	0,3	0,30	0,064
3	703	1844330, 289086	1494	0.68	2.6	-0,14 +0,22	0,66 0,64	0,65	0,25	0,260
4	691	742001, 139225	5594	0.9	1.1	-0,16 +0,12	0,31 0,30	0,315	0,28	0,2
5	D29	551094, 136964	262	1.04	1.7	+0,03 -0,04	0,53 0,49	0,51	0,30	0,05
6	I41	440712, 52579	2270	1.2	1.01	+0,06 +0,02	0,18 0,17	0,175	0,17	0,063
7	E12	229747, 48026	204	0.5	1.8	-0,02 +0,28	0,50 0,46	0,48	0,26	0,280
8	926	179570, 53662	750	0.81 0.41	0.87 1.3	+0,15 +0,10	0,39 0,36	0,375	0,43 0,28	0,180
9	J43	151983, 27006	1006	0.5	1.2	+0,11 -0,03	0,31 0,29	0,3	0,25	0,114
10	W84	110213, 8518	4160	4	0.27	+0,13 +0,14	0,13 0,13	0,13	0,48	0,191
11	CoLiTec user, H15	107989, 25282	156	0.40	2.0	+0,09 +0,02	0,62 0,60	0,61	0,305	0,092
12	704	81054, 17833	4	1.0	2.2	+0,29 +0,38	0,64 0,63	0,635	0,28	0,478
13	J04	58307, 14670	576	1.0	0.62	+0,25 +0,23	0,30 0,28	0,29	0,46	0,340
14	CoLiTec user, D00	44658, 10850	34	0.40	2.06	+0,01 -0,12	0,72 0,54	0,63	0,305	0,120
15	G32	36416, 4654	654	0.4	1.13	+0,03 +0,05	0,35 0,32	0,335	0,29	0,058
16	106	18601, 4502	67	0.6	2.0	+0,04 -0,05	0,39 0,37	0,38	0,19	0,064
17	H21	16924, 2994	60	0.61 0.81 0.76	0.8	+0,04 -0,04	0,33 0,31	0,32	0,4	0,002
18	461	15688, 3787	110	0.60 1.02	1.1	-0,02 +0,17	0,24 0,27	0,255	0,23	0,171
19	644	15221, 3317	63	1.2	1					
20	291	15197, 4002	1	1.8	0.6	+0,02 +0,14	0,35 0,32	0,335	0,55	0,141
21	G36	12280, 1683	110	1.23		+0,06 +0,00	0,25 0,24	0,245		0,06
22	A24	12207, 2786	0	0.36	1.4	+0,13 +0,26	0,40 0,34	0,37	0,26	0,29
23	807	11525, 2341	1	0.41		0,00 -0,01	0,35 0,29	0,32		0,01
24	C41	10384, 3794	0	0.4	1.8	-0,01 +0,10	0,69 0,63	0,66	0,36	0,1
25	645	9631, 3161	0	2.5	0.396					
26	695	8354, 3118	600	4.0 3.5	0.26 0.11	+0,14 +0,17	0,22 0,19	0,205	0,78 1,86	0,220
27	A14	7553, 2505	9	0.50		+0,06+0,02	0,38 0,37	0,375		0,063
28	D03	6638, 1768	87	0.4		+0,03 -0,05	0,43 0,36	0,395		0,058
29	493	5539, 1820	82	1.23	0.3	+0,04 +0,10	0,22 0,24	0,23	0,76	0,108
30	C95	5411, 1152	62			+0,01 +0,00	0,56 0,51	0,535		0,01

СКО, в пикселях, оценок положения объектов (рис. 1–3, б) используется для характеристики потенциальных возможностей вычислительного метода при абстрагировании от параметров используемых ПЗС-матрицы и другого используемого оборудования. По этому показателю обсерватории-партнеры CoLiTec имеют одни из лучших результатов среди телескопов с малой апертурой [13]. Обсерватории-партнеры CoLiTec за 2011 (2012) годы имеют практически одинаковые показатели СКО (в пикселях): H15 – 0,25 (0,25) pixel, A50 – 0,24 (0,23) pixel, D00 – (0,23) pixel.

Однако, СКО в пикселях оценок положения объектов является искусственным, недостаточно объективным показателем. В нем не учтено время экспозиции, оптическая схема телескопа, высота над уровнем моря и другие факторы. По этому критерию обсерватория Pan-STARRS 1 (F51) проиграла всем остальным, хотя имеет лучшую точность астрометрии среди всех астероидных обзоров. С другой стороны, может быть это свидетельствует о возможности дальнейшего повышения точности астрометрии F51 за счет использования методов оценки положения объектов на ПЗС-кадрах [14], максимально свободных от потерь измерительной информации, содержащейся на кадрах.

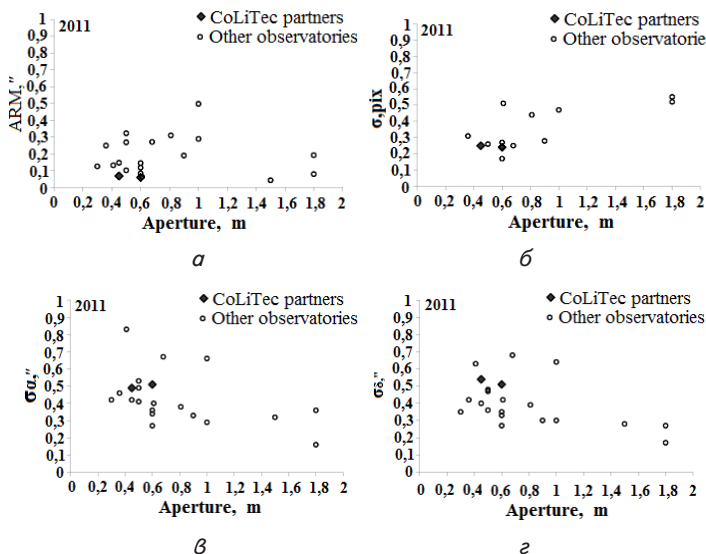


Рис. 1. Ведущие астероидные обзоры мира по данным 2011 года: а – модуль средних невязок измерений объектов; б – СКО оценок положения объектов, пиксели; в – СКО оценок прямого восхождения объектов, угловые секунды; г – СКО оценок склонения объектов, угловые секунды

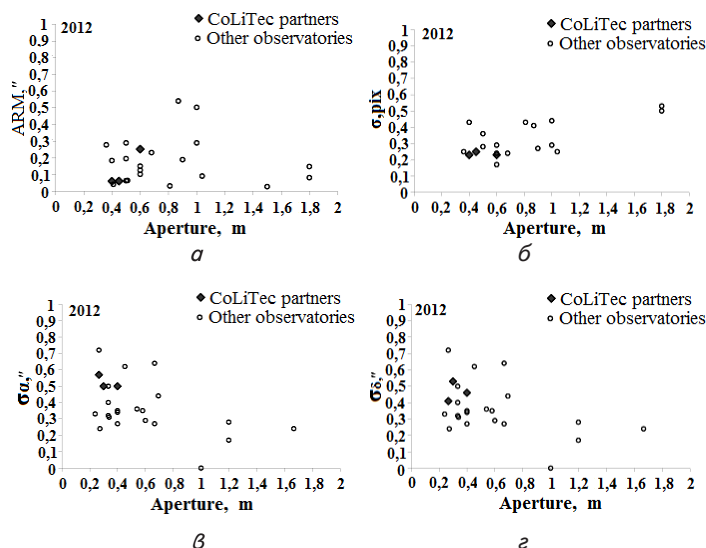


Рис. 2. Ведущие астероидные обзоры мира по данным 2012 года: а – модуль средних невязок измерений объектов; б – СКО оценок положения объектов, пиксели; в – СКО оценок прямого восхождения объектов, угловые секунды; г – СКО оценок склонения объектов, угловые секунды

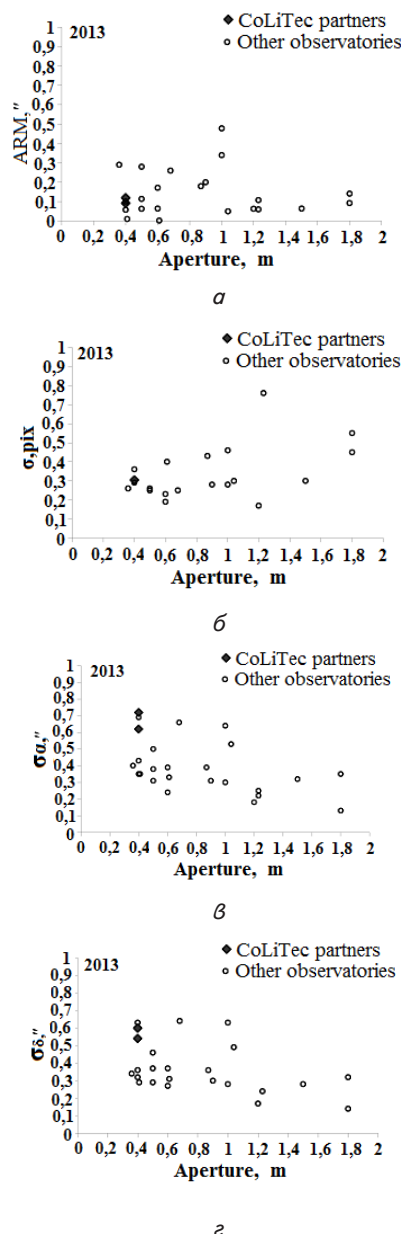


Рис. 3. Ведущие астероидные обзоры мира по данным 2013 года: а – модуль средних невязок измерений объектов; б – СКО оценок положения объектов, пиксели; в – СКО оценок прямого восхождения объектов, угловые секунды; г – СКО оценок склонения объектов, угловые секунды

Следует отметить, что в 2013 г. точность измерений обсерваторий-партнеров CoLiТес упала примерно на 20 % по всем показателям из-за ныне выявленной ошибки в программном обеспечении.

5. Выводы

В статье исследована точность оценок параметров небесных объектов, обнаруженных с помощью ПО CoLiТес. Данные, полученные от обсерваторий, использующих CoLiТес, сравнивались с результатами самых продуктивных обсерваторий мира. Статистические свойства измерений приведены из сайта MPC [8].

По каждой обсерватории были рассчитаны средние значения невязок по прямому восхождению и склонению, оценки среднеквадратического отклонения оценок положения объектов, средний модуль

невязки измерений. Результаты расчетов показали, что по среднему модулю невязок и СКО в пикселях, обсерватории, использующие ПО CoLiТес, занимают лидирующие позиции среди телескопов с малой апертурой. Высокие показатели программы CoLiТес по точности измерений за 2011÷2012 гг. были получены за счет использования субпиксельной гауссовой модели. Субпиксельная гауссова модель изображения объектов учитывает априорную форму изображения объекта, в результате чего она гибче адаптируется к любой форме реального изображения. Иными словами, несмотря на то, что фактическое распределение координат падения фотонов объекта в пикселе не известно, форма этого распределения известна априорно, а его параметры можно оценивать по реальному цифровому изображению объекта. В то время большинство других методов по умолчанию считают, что плотность падения фотонов внутри пикселя равномерна.

Литература

- Harris, W. E. (1990). A comment on image detection and the definition of limiting magnitude [Text] / W. E. Harris // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. – 1990. – Vol. 102. – P. 949-953. doi: 10.1086/132720.
- Шустов, Б. М. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра [Текст] / Б. М. Шустов, Л. В. Рыхлова – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
- Саваневич, В. Е. Оценка координат астероида на дискретном изображении [Текст] / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков // Радиотехника. – 2010. – Вып. 162. – С. 78–86.
- Саваневич, В. Е. Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре [Текст] / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков // Системи обробки інформації: зб. Наук. Пр. – 2010. – Вип. 6 (87). – С. 172–179.
- Кожухов, А. М. Точность оценки местоположения объектов на цифровых изображениях программой COLITEC [Текст] / А. М. Кожухов, С. В. Хламов, Е. В. Строганов, Н. С. Сокови́кова, С. К. Степанян // Системи управління, навігації та зв'язку зб. Наук. Пр. – 2012. – Вип. 1 (21). – С. 12–17.
- Yanagisawa, T. Automatic Detection Algorithm for Small Moving Objects. [Text] / T. Yanagisawa, A. Nakajima, K.-I. Kadota, H. Kurosaki, T. Nakamura, F. Yoshida, B. Dermawan, et al. // Publications of the Astronomical Society of Japan. Oxford University Press (OUP), 2005. – April 57. – P. 399–408. doi: 10.1093/pasj/57.2.399
- Vereš, P. Improved Asteroid Astrometry and Photometry with Trail Fitting [Text] / P. Vereš, R. Jedicke, L. Denneau, R. Wainscoat, M. J. Holman, H.-W. Lin // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. University of Chicago Press. – 2012. – Vol. 124 (921). – P. 1197–1207. doi: 10.1086/668616
- IAU Minor Planet Center. Guide to Minor Body Astrometry [Electronic resource] / Available at : <http://www.minorplanetcenter.net/iau/info/Astrometry.html#quality>. – Title in screen.
- Саваневич, В. Е. Программа CoLiТес автоматизированного обнаружения небесных тел со слабым блеском [Текст] / В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков, В. П. Власенко // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18(1). – С. 39–46.
- Сокови́кова, Н. С. Подпиксельный метод оценки местоположения близких астероидов на дискретном изображении [Текст] / Н. С. Сокови́кова, В. Е. Саваневич, М. М. Безкровный, С. В. Хламов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 3(62). – С. 32–38.
- Безкровный, М. М. Подпиксельный метод оценки местоположения объектов с изображением, смазанным собственным движением [Текст] / М. М. Безкровный, С. В. Хламов, В. Е. Саваневич, Н. С. Сокови́кова // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – 2013. – № 3(12). – С. 128–131.
- Dell'Oro, A. Observations of asteroids on the Gaia astrometric focal plane [Text] / A. Dell'Oro, A. Cellino // Planetary and Space Science. – 2012. – Vol. 73, Issue 1. – P. 10–14. doi: 10.1016/j.pss.2011.10.012
- Izmailov, I. S. Astrometric CCD observations of visual double stars at the Pulkovo Observatory [Text] / I. S. Izmailov, M. L. Khovrichева, M. Y. Khovrichев, O. V. Kiyayeva, E. V. Khrutskaya, L. G. Romanenko, E. A. Grosheva et al. // Astronomy Letters. – 2010. – Vol. 36 (5) – P. 349–354. doi: 10.1134/S1063773710050051
- Lafrenière, D. A New Algorithm for Point-Spread Function Subtraction in High-Contrast Imaging: A Demonstration with Angular Differential Imaging [Text] / D. Lafreniere, C. Marois, R. Doyon, D. Nadeau, E. Artigau // The Astrophysical Journal. – 2007. – Vol. 660 (1). – P. 770–780. doi: 10.1086/513180