

УДК 629.396

В.Е. САВАНЕВИЧ, О.Г. СИМОНОВА

*Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Украина***ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИЙ ГРУППЫ БЛИЗКИХ ОБЪЕКТОВ**

В статье приводятся результаты статистического моделирования оценивания точностных характеристик параметров известного числа линейных траекторий по смешанной выборке. На основании полученных оценок сделаны выводы об условиях возможного и предпочтительного применения различных методов расщепления отметок и оценки параметров траекторий.

обработка локационной информации, линейные траектории с зависимыми параметрами, параллельные и расходящиеся траектории, методы оценки параметров траектории

Введение

В настоящее время для снижения стоимости выведения космических аппаратов (КА) одной ракетой-носителем выводят несколько КА. После выведения данных КА наблюдательными средствами (НС) оцениваются параметры их траекторий. Данные оценки должны получаться по смешанным (неклассифицированным) выборкам, так как вновь запускаемые космические объекты (ВЗКО) долгое время после запуска движутся по близким траекториям.

Проведенные исследования показывают, что в модифицированной орбитальной системе координат (МОСК) [1] вновь запускаемые космические объекты (КО) движутся по линейным траекториям с зависимыми параметрами [2].

Задача оценки параметров линейных траекторий на основании классифицированной выборки равноточных и равнодискретных измерений известна и решается процедурой МНК-оценки параметров линейных траекторий [3].

В работе [4] разработана процедура МНК-оценки зависимых (параллельных и расходящихся) линейных траекторий.

Для оценки параметров траекторий нескольких объектов по смешанной (неклассифицированной)

выборке измерений разработан метод расщепления отметок и оценки параметров траекторий (РООПТ). Данный метод может использовать поотметочное (ПОР) [5] и совместное (СПО) расщепление отметок [6]. В работе [7] метод расщепления отметок и оценки параметров траекторий с поотметочным расщеплением был применен для оценки параметров зависимых (параллельных и расходящихся) линейных траекторий. В работе [8] данный метод был использован при классификации измерений в модифицированной орбитальной системе координат, введенной в работе [1].

1. Постановка задачи

В МОСК траектории невязок по времени привязки измерений являются линейными: $y = y_0 + Vt$, где y_0 – начальное значение невязки по времени привязки измерения, V – скорость изменения невязки по времени привязки измерения, t – текущее время. Поэтому для моделирования были выбраны две характерные модели взаимного расположения близких КО (рис. 1).

Для параллельных траекторий (ПТ) начальное положение второго объекта $y_{02} = y_{01} + Z \cdot \sigma_{II}$. Для расходящихся траекторий (РТ) скорость расхождения объектов $\Delta V = V_2 - V_1$.

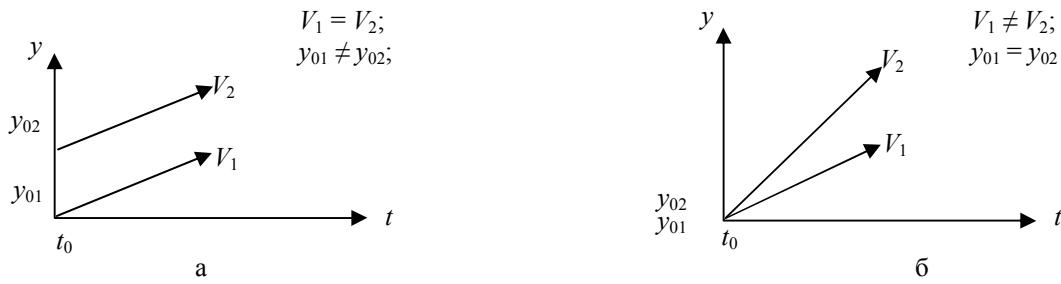


Рис. 1. Модели движения двух близких объектов:

- а – ПТ: объекты движутся с одинаковой скоростью и имеют разное начальное положение;
- б – РТ: два близких объекта движутся с разной скоростью и имеют одинаковое начальное положение

Предполагается, что число объектов Q известно, случай однокоординатный, ошибки координат целевых измерений распределены по нормальному закону с нулевым средним и известными дисперсиями по каждой независимой координате; известны и постоянны от порции к порции вероятности D_j того, что измерение от j -го объекта сформировано и присутствует во входной совокупности; количество измерений от фоновых объектов распределено по закону Пуассона с интенсивностью μ ; координаты измерений от фоновых объектов распределены равномерно и взаимно независимы; измерения, сформированные на различных обзорах, независимы как внутри, так и между порциями.

Расстояние между измерениями от объектов не должно быть менее среднеквадратического отклонения (СКО) ошибок измерения σ_{II} по каждой независимой координате. В противном случае по двум объектам должно быть сформировано одно измере-

ние. Время между формированием порций измерений $\Delta t = 10$ сек.

Необходимо оценить СКО оценок параметров линейных траекторий по совокупности измерений, представляющих смешанную выборку, для различного числа порций измерений N .

2. Результаты моделирования

Для ПТ оценивалось СКО оценок методов РООПТ с СРО, РООПТ с ПОР с (ПТ) и без (О) использования сведений о том, что траектории параллельные. Для РТ оценивалось СКО оценок методов РООПТ с СРО, РООПТ с ПОР с (РТ) и без (О) использования сведений о том, что траектории расходящиеся.

Отдельные графики, отражающие результаты моделирования, приведены на рис. 2 – 8. Также результаты моделирования отражены в табл. 1 – 6.

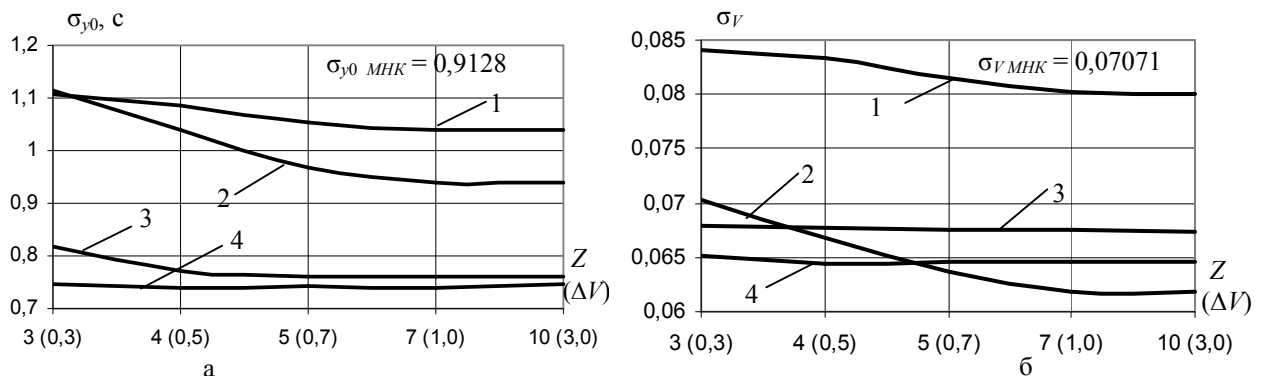


Рис. 2. СКО оценок параметров траекторий методом РООПТ с ПОР при наличии в них измерений от фоновых КО ($N = 3$): а – СКО оценок начального положения; б – СКО оценок скорости;

- 1 – ПТ, РООПТ с ПОР (О);
- 2 – ПТ, РООПТ с ПОР (ПТ);
- 3 – РТ, РООПТ с ПОР (О);
- 4 – РТ, РООПТ с ПОР (РТ)

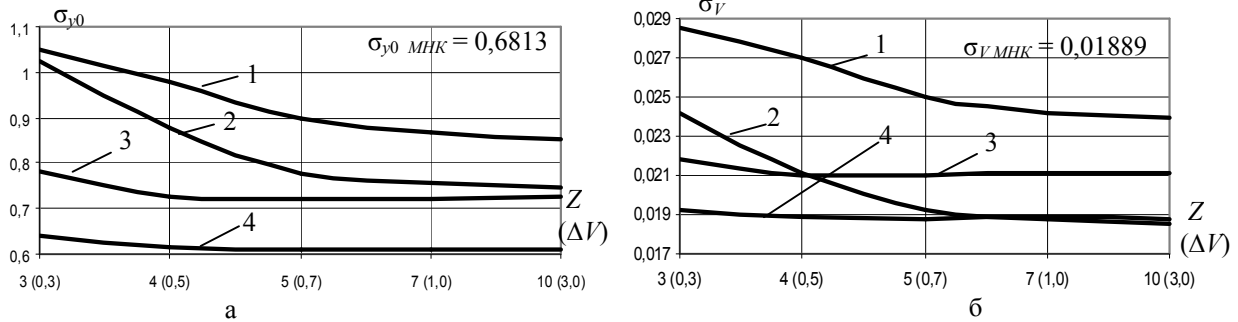


Рис. 3. СКО оценок параметров траекторий методом РООПТ с ПОР при наличии измерений от фоновых КО ($N = 7$): а – СКО оценок начального положения; б – СКО оценок скорости;

1 – ПТ, РООПТ с ПОР (О);
2 – ПТ, РООПТ с ПОР (ПТ);

3 – ПТ, РООПТ с ПОР (О);
4 – ПТ, РООПТ с ПОР (ПТ)

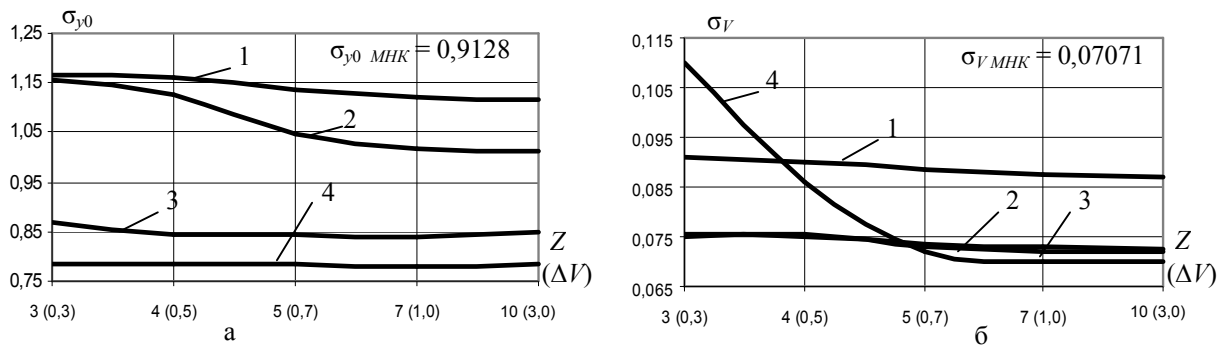


Рис. 4. СКО оценок параметров линейной траектории методом РООПТ с ПОР при наличии пропусков и измерений от фоновых КО ($N = 3, D = 0,95$):

а – СКО оценок начального положения; б – СКО оценок скорости;
1 – ПТ, РООПТ с ПОР (О); 3 – ПТ, РООПТ с ПОР (О);
2 – ПТ, РООПТ с ПОР (ПТ); 4 – ПТ, РООПТ с ПОР (ПТ)

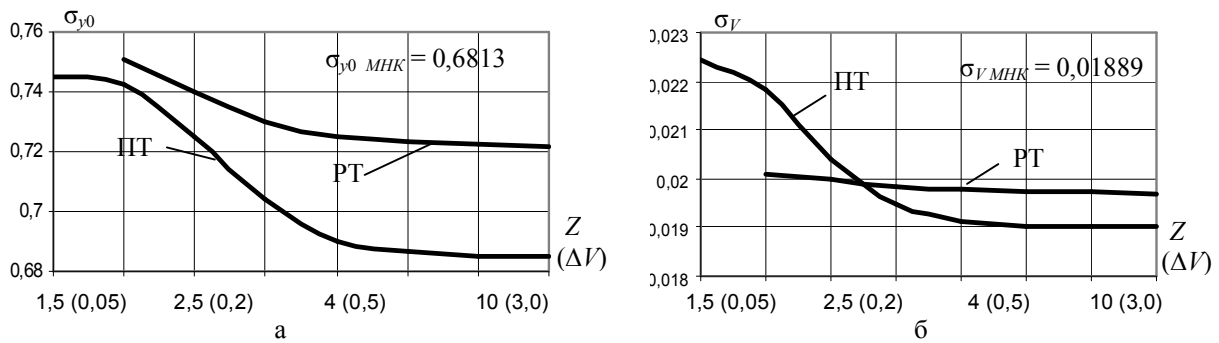


Рис. 5. СКО оценок параметров траектории методом РООПТ с СРО при наличии измерений от фоновых КО ($N = 7$): а – СКО оценок начального положения; б – СКО оценок скорости

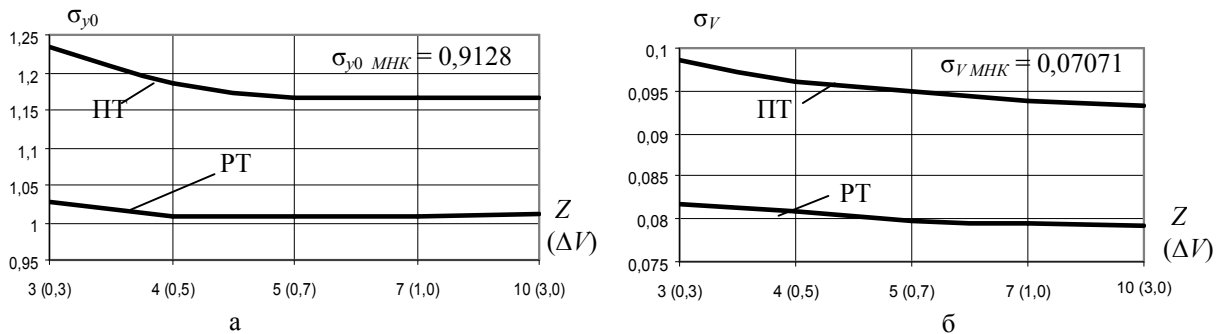


Рис. 6. СКО оценок параметров траектории методом РООПТ с СРО при наличии пропусков и измерений от фоновых КО ($N = 3, D = 0,95$): а – СКО оценок начального положения; б – СКО оценок скорости

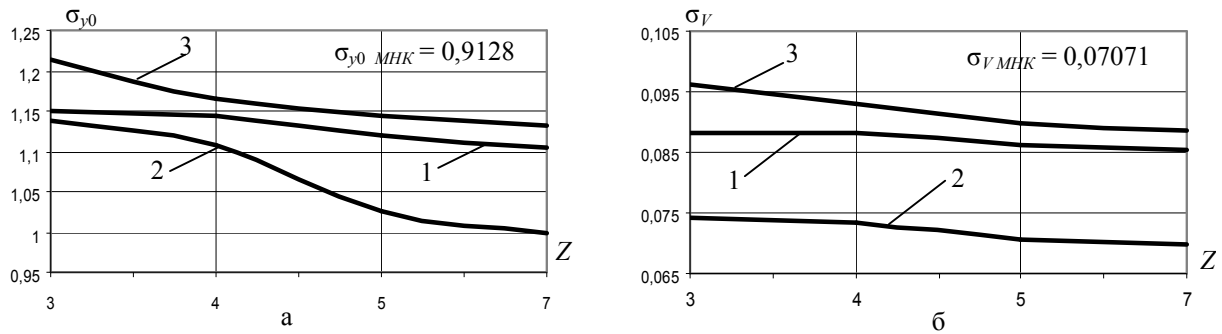


Рис. 7. СКО оценок параметров траекторий при наличии пропусков и измерений от фоновых КО (ПТ, $N = 3$): а – СКО оценок начального положения; б – СКО оценок скорости; 1 – РООПТ с ПОР (О); 2 – РООПТ с ПОР (ПТ); 3 – РООПТ с СРО

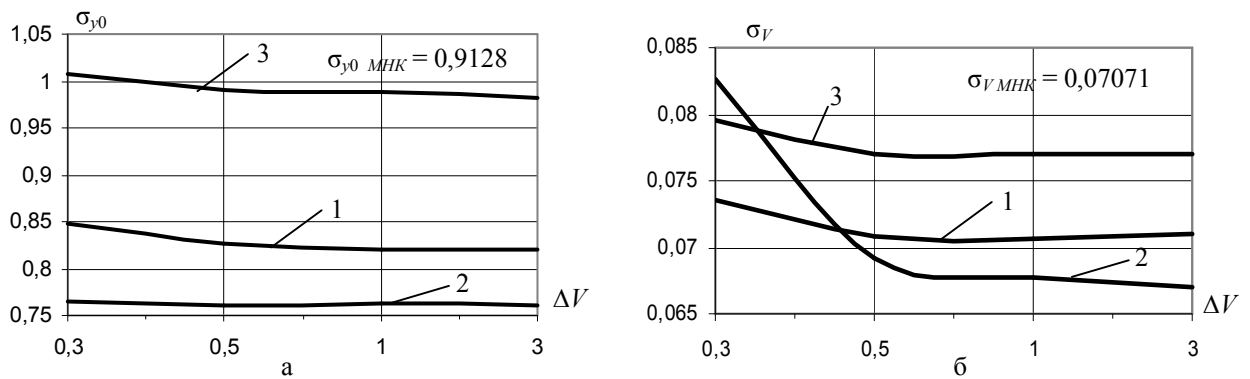


Рис. 8. СКО оценок параметров траекторий при наличии пропусков и измерений от фоновых КО (РТ, $N = 3$): а – СКО оценок начального положения; б – СКО оценок скорости; 1 – РООПТ с ПОР (О); 2 – РООПТ с ПОР (РТ); 3 – РООПТ с СРО

Таблица 1

Условия применимости методов оценки параметров траекторий

Условия формирования совокупности измерений		Модификация методов РООПТ	Условия наблюдения			
			Модель 1		Модель 2	
			N	Z	N	ΔV
1	0	ПОР (О)	≥ 3	≥ 3	≥ 3	$\geq 0,3$
		ПОР (ПТ)	≥ 3	≥ 3	-	-
		ПОР (РТ)	-	-	≥ 3 ≥ 4	$\geq 0,3$ $\geq 0,2$
		СРО	≥ 3 ≥ 5	≥ 2 $\geq 1,5$	≥ 3 ≥ 4 ≥ 5	$\geq 0,3$ $\geq 0,2$ $\geq 0,1$
1	1 (0,00125)	ПОР (О)	≥ 3	≥ 3	≥ 3	$\geq 0,3$
		ПОР (ПТ)	≥ 3	≥ 3	-	-
		ПОР (РТ)	-	-	≥ 3 ≥ 5	$\geq 0,3$ $\geq 0,2$
		СРО	≥ 3 ≥ 5	≥ 2 $\geq 1,5$	≥ 3 ≥ 5 ≥ 7	$\geq 0,3$ $\geq 0,2$ $\geq 0,1$
0,95	1 (0,00125)	ПОР (О)	≥ 3	≥ 3	≥ 3	$\geq 0,3$
		ПОР (ПТ)	≥ 3	≥ 3	-	-
		ПОР (РТ)	-	-	≥ 3 ≥ 6	$\geq 0,3$ $\geq 0,2$
		СРО	≥ 3 ≥ 5	≥ 2 $\geq 1,5$	≥ 3 ≥ 7	$\geq 0,3$ $\geq 0,2$

Таблиця 2

Условия достижимости потенциальных СКО методами оценки параметров траекторий

Условия формирования совокупности измерений		Модификация методов РООПТ	Условия наблюдения			
			ПТ		РТ	
D	μ		N	Z	N	ΔV
1	0	ПОР (О)	≥ 3	≥ 7	≥ 5	$\geq 0,3$
		ПОР (ПТ)	≥ 4	≥ 5	–	–
		ПОР (РТ)	–	–	≥ 3	$\geq 0,3$
		СРО	≥ 3 ≥ 7	≥ 5 ≥ 4	–	–
1	1 (0,00125)	ПОР (О)	≥ 6	≥ 7	≥ 5	$\geq 0,3$
		ПОР (ПТ)	≥ 5	≥ 5	–	–
		ПОР (РТ)	–	–	≥ 3	$\geq 0,3$
		СРО	≥ 3 ≥ 7	≥ 7 ≥ 5	–	–
0,95	1 (0,00125)	ПОР (О)	≥ 7	≥ 7	≥ 5	$\geq 0,5$
		ПОР (ПТ)	≥ 5	≥ 6	–	–
		ПОР (РТ)	–	–	≥ 3 ≥ 4	$\geq 0,7$ $\geq 0,5$
		СРО	–	–	≥ 7	$\geq 1,0$

Таблиця 3

Условия предпочтительности применения методов оценки параметров траекторий

D	μ	Z N	Модель 1						Модель 2					
			1,5	2	3	4	5	7	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7
1	0	3	–	4	4	4	4	4	–	–	4(3)	4(3)	4(3)	4(3)
		4	–	4	4	4	4	4	–	–	4(3)	4(3)	1(3)	1(3)
		5	4	4	4	4	4	4	–	–(3)	4(3)	4(3)	1(3)	1(3)
		7	4	4	4	4	4	4	–(3)	–(3)	4(3)	1(3)	1(3)	1(3)
1	$1,25 \cdot 10^{-3}$	3	–	4	4	4(2)	4(2)	4(2)	–	4	4	4	–(3)	–(3)
		4	–	4	4	4(2)	4(2)	4(2)	–	4	4	–(3)	–(3)	–(3)
		5	4	4	4	4	4(2)	4(2)	–	4	4(3)	4(3)	1(3)	1(3)
		7	4	4	4	4	4(2)	4(2)	4	4	4(3)	4(3)	1(3)	1(3)
0,95	$1,25 \cdot 10^{-3}$	3	–	4	1(2)	1(2)	1(2)	1(2)	–	–	4(3)	4(3)	4(3)	4(3)
		4	–	4	4	1(2)	1(2)	1(2)	–	–	4(3)	4(3)	1(3)	1(3)
		5	4	4	4	4	1(2)	1(2)	–	–	4(3)	1(3)	1(3)	1(3)
		7	4	4	4	4	4	1(2)	–	4	1(3)	1(3)	1(3)	1(3)

Примечание. Методы оценки параметров траекторий: 1 – РООПТ с ПОР (О),
 2 – РООПТ с ПОР (ПТ),
 3 – РООПТ с ПОР (РТ),
 4 – РООПТ с СРО.

Таблиця 4

СКО оценок начального положения / скорости методом РООПТ с ПОР(О)

D	μ	N \ Z	ПТ		РТ	
			3	7	0,3	1,0
1	0	3	<u>1,10271</u> 0,08382	<u>1,03940</u> 0,08019	–	–
		7	<u>1,04911</u> 0,02809	<u>0,86363</u> 0,02367	<u>0,77197</u> 0,02124	<u>0,71092</u> 0,02042
1	1,25·10 ⁻³	3	<u>1,10572</u> 0,08408	<u>1,03999</u> 0,08024	–	–
		7	<u>1,04852</u> 0,02851	<u>0,86624</u> 0,02420	<u>0,77982</u> 0,02181	<u>0,72168</u> 0,02106
0,95	1,25·10 ⁻³	3	<u>1,16807</u> 0,09085	<u>1,12312</u> 0,08736	–	–
		7	<u>1,07698</u> 0,02887	<u>0,89569</u> 0,02467	<u>0,79939</u> 0,02212	<u>0,74376</u> 0,02113

Таблиця 5

СКО оценок начального положения / скорости методом РООПТ с СРО

D	μ	N \ Z	ПТ		РТ	
			3	7	0,3	1,0
1	0	3	<u>0,94194</u> 0,07307	<u>0,91468</u> 0,07094	<u>0,94730</u> 0,07230	<u>0,93592</u> 0,07156
		7	<u>0,70193</u> 0,01946	<u>0,68723</u> 0,01892	<u>0,73212</u> 0,01987	<u>0,72303</u> 0,01973
1	1,25·10 ⁻³	3	<u>0,94574</u> 0,07319	<u>0,91629</u> 0,07105	<u>0,91415</u> 0,07139	<u>0,91366</u> 0,07095
		7	<u>0,70436</u> 0,01948	<u>0,68502</u> 0,01903	<u>0,73015</u> 0,01982	<u>0,72279</u> 0,01974
0,95	1,25·10 ⁻³	3	<u>1,23416</u> 0,09850	<u>1,16704</u> 0,0938	<u>1,02590</u> 0,08163	<u>1,00802</u> 0,07953
		7	<u>0,87959</u> 0,02448	<u>0,85690</u> 0,02322	<u>0,76202</u> 0,02078	<u>0,75206</u> 0,02056

Таблиця 6

СКО оценок начального положения / скорости методами РООПТ с ПОР(ПТ) и РООПТ с ПОР(РТ)

D	μ	N \ Z	ПТ, РООПТ с ПОР(ПТ)		РТ, РООПТ с ПОР(РТ)	
			3	7	0,3	1,0
1	0	3	<u>1,112044</u> 0,069778	<u>0,938511</u> 0,061692	<u>0,754052</u> 0,068278	<u>0,741977</u> 0,064409
		7	<u>1,018305</u> 0,023627	<u>0,747164</u> 0,018202	<u>0,632096</u> 0,018785	<u>0,601997</u> 0,018352
1	1,25·10 ⁻³	3	<u>1,115405</u> 0,070266	<u>0,939817</u> 0,061814	<u>0,745</u> 0,065153	<u>0,740361</u> 0,064588
		7	<u>1,024589</u> 0,024151	<u>0,755094</u> 0,01876	<u>0,638403</u> 0,019226	<u>0,609578</u> 0,018829
0,95	1,25·10 ⁻³	3	<u>1,156254</u> 0,075054	<u>1,017444</u> 0,071852	<u>0,783857</u> 0,110172	<u>0,781537</u> 0,07023
		7	<u>1,065404</u> 0,025156	<u>0,789956</u> 0,019671	<u>0,664895</u> 0,01968	<u>0,636347</u> 0,01929

Выводы

1. Условия применимости рассматриваемых методов приведены в табл. 1. При малых взаимных расстояниях между объектами целесообразно использовать метод РООПТ с СРО (табл. 3). При увеличении этих расстояний предпочтительней выглядит использование метода РООПТ с ПОР из-за его существенно большего быстродействия.

2. С увеличением числа порций и расстояний между объектами (табл. 2) СКО оценок параметров траекторий стремятся к потенциальным (СКО МНК-оценок). Особенно быстро это наблюдается при использовании метода РООПТ с СРО.

3. Снижение СКО оценок при увеличении числа порций тем больше, чем больше Z , особенно это заметно на примере СКО оценок метода РООПТ с ПОР. В случае больших Z данное снижение не превосходит эквивалентного снижения СКО МНК-оценок (табл. 4).

4. Влияние значения Z на снижение СКО оценок при увеличении числа порций особенно заметно при увеличении вероятности пропусков измерений, особенно для РООПТ с ПОР (табл. 4, 5).

5. С ростом числа порций СКО оценок параметров траекторий снижается, особенно это заметно на примере СКО оценок метода РООПТ с СРО. Для данного метода данное снижение практически эквивалентно снижению СКО МНК-оценок (табл. 5).

6. Использование информации о зависимости параметров нескольких траекторий (табл. 6) приводит к снижению СКО оценок этих параметров. Для параллельных траекторий данный выигрыш особенно заметен для СКО оценок скорости и составляет 20% для $N = 3$ и $Z = 3$ и 30% для $N = 3$ и $Z = 7$. Данное соотношение практически остается неизменным при $N = 7$ (табл. 3).

7. Точность метода РООПТ с СРО по сравнению с другими методами менее зависима от количества пропущенных измерений (рис. 8).

8. Предпочтительность использования РООПТ с СРО обусловлена условиями моделирования, в которых предполагалось, что от одного объекта в од-

ной порции не может быть получено более одного измерения.

Литература

1. Зюбин В.И., Лазебник С.В., Симонова О.Г. Распознавание фрагментов запуска космического аппарата на основе баллистической информации // Системы обработки информации. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – Вип. 2 (8). – С. 191 – 193.

2. Ямницкий В.А., Саваневич В.Е., Симонова О.Г. Свойства совокупности радиолокационных измерений в модифицированной орбитальной системе координат // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 7. – С. 230 – 237.

3. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.

4. Симонова О.Г. МНК-оценка параметров зависимых линейных траекторий по классифицированной выборке // Системы обработки информации. – Х.: ХВУ. – 2004. – Вип. 9. – С. 164 – 169.

5. Саваневич В.Е., Логачев С.В., Пугач А.В. Бесстробовый алгоритм оценки параметров близких траекторий // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 2. – С. 4 – 8.

6. Саваневич В.Е. Оценка параметров близких траекторий с использованием совместного расщепления отметок на обзорах // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – 2003. № 3. – С. 70 – 75.

7. Саваневич В.Е., Симонова О.Г., Руденко Н.И. Оценка параметров зависимых линейных траекторий по смешанной выборке // Зб. наук. праць ІПМЕ. – К.: НАНУ, ІПМЕ. – 2003. – Вип. 22. – С. 169 – 176.

8. Саваневич В.Е., Симонова О.Г. Совместная классификация измерений группы ВЗКО на серии прохождений // Зб. наук. праць ІПМЕ. – К.: НАНУ, ІПМЕ. – 2004. – Вип. 25. – С. 188 – 194.

Поступила в редакцию 13.12.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Объединенный научно-исследовательский институт Вооруженных Сил, Харьков.