

УДК 521.91

**Сравнение различных реализаций земной системы координат, построенных по данным лазерной локации искусственных спутников Земли**

**В. Я. Чолий**

Проведено сравнение различных реализаций спутниковой земной системы координат. Показано, что в пределах одного вида измерений совпадение различных реализаций земной системы координат можно считать хорошим. Результаты можно использовать для построения сводной земной системы координат

*THE COMPARISON OF DIFFERENT TERRESTRIAL REFERENCE FRAME REALIZATIONS BASED ON ARTIFICIAL SATELLITES LASER RANGING, by Cholij V. Ya.—* The paper deals with the comparison of different realizations of satellite Terrestrial Reference Frame. It is shown that within the same processing method the coincidence of the results is good. The results may be used to construct the Combined Terrestrial Reference Frame.

В последнее время много внимания уделяется заданию и практическому построению двух основных систем координат: инерциальной и земной. В соответствии с рекомендациями рабочей группы Международного астрономического союза (МАС) и Международного геодезического и геофизического союза (МГГС) по проекту MERIT (отслеживание вра-

Таблица 1. Параметры связи реализаций ЗСК ( $t_1, t_2, t_3, m$ )

Номер реализации ЗСК	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-0.089 -0.047 -0.109	-0.084 -0.041 -0.160	-0.044 -0.074 -0.031	-0.131 -0.054 0.116	-0.095 -0.046 -0.040	-0.076 -0.041 -0.188	-0.274 -0.020 -0.121	-0.091 -0.049 -0.086
2		0.005 0.008 0.056	0.029 0.012 0.068	-0.020 -0.022 0.197	-0.008 0.010 0.043	-0.002 -0.016 -0.094	0.007 0.002 -0.049	0.005 -0.002 0.027
3			0.028 -0.011 0.139	-0.029 -0.022 0.252	-0.014 0.007 0.099	0.013 0.010 -0.037	-0.002 0.002 -0.078	-0.001 0.003 0.102
4				-0.035 -0.026 0.133	-0.034 0.012 -0.024	-0.014 -0.025 -0.173	0.019 -0.019 -0.187	-0.012 -0.013 -0.048
5					0.007 0.035 -0.153	0.020 0.025 -0.285	-0.087 -0.035 -0.374	0.016 0.022 -0.182
6						0.001 -0.011 -0.133	0.407 -0.007 -0.458	0.006 -0.011 -0.026
7							0.005 0.002 -0.056	0.004 0.013 0.131
8								-0.015 -0.003 0.181

щения Земли и сравнение различных методов и средств наблюдений) условная земная система координат (ЗСК) задается сетью станций, теорий и констант так, чтобы не было переноса или вращения этой сети станций относительно поверхности Земли. Система отсчета реализуется набором положений и движений выбранных станций [4].

С этой целью на поверхности Земли создаются различные сети станций, ведущих измерения дальности до Луны и ИСЗ, радиоинтерферометрические наблюдения удаленных радионисточников и др. В результате обработки таких наблюдений можно получить наборы координат станций, т. е. различные реализации земной системы координат, параметры вращения Земли и др.

Построение сводной земной системы координат на основе различных реализаций представляет собой актуальную научную и прикладную задачу. При таком построении возникает необходимость изучения систематических различий упомянутых выше реализаций ЗСК как вну-

Таблица 2. Параметры связи реализаций ЗСК ( $r_1, r_2, r_3$ , секунды дуги)

Номер реализации ЗСК	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-0.006 -0.001 -0.105	-0.005 0.011 0.010	0.000 -0.006 -0.087	-0.012 -0.004 0.156	-0.000 -0.001 0.209	-0.003 0.007 0.003	-0.019 0.003 0.017	0.002 0.005 0.004
2		-0.002 -0.010 -0.015	0.007 -0.004 0.017	-0.006 -0.004 0.261	0.005 -0.008 0.311	0.003 0.008 0.108	-0.018 -0.004 0.117	0.008 0.006 0.109
3			0.004 -0.016 -0.097	-0.008 -0.015 0.146	0.003 -0.018 0.196	0.002 -0.003 -0.007	-0.018 -0.014 0.002	0.007 -0.005 -0.006
4				-0.011 0.001 0.243	-0.001 -0.002 0.293	-0.005 0.012 0.091	-0.024 -0.000 0.098	0.001 0.010 0.091
5					0.011 -0.004 0.049	0.009 0.011 -0.158	-0.011 0.004 -0.149	0.014 0.011 -0.152
6						-0.002 0.015 -0.202	-0.014 0.010 -0.184	0.004 0.014 -0.202
7							-0.019 -0.011 0.009	0.006 -0.001 0.000
8								0.005 0.009 -0.008

Таблица 3. Параметры связи реализаций ЗСК ( $\mu$ , безразмерный)

Номер реализации ЗСК	2	3	4	5
1	$5.876 \cdot 10^{-9}$	$1.997 \cdot 10^{-8}$	$6.922 \cdot 10^{-9}$	$3.371 \cdot 10^{-8}$
2		$1.223 \cdot 10^{-8}$	$2.600 \cdot 10^{-9}$	$2.475 \cdot 10^{-8}$
3			$-1.428 \cdot 10^{-8}$	$8.662 \cdot 10^{-9}$
4				$2.316 \cdot 10^{-8}$
5				
6				
7				
8				

три каждого метода наблюдений, так и между различными методами. Первым приближением при решении этой задачи может служить система BTS, созданная в Международном бюро времени (ВИН) [2].

В данной работе проведено сравнение нескольких реализаций ЗСК, построенных различными центрами обработки данных по результатам лазерной локации ИСЗ во время основной кампании MERIT. Эти сводки координат станций лазерной локации ИСЗ, записанные на магнитную ленту, получены нами из ВИН. Часть данных взята из [3]. Очевидно, что рассматриваемые нами реализации ЗСК могут отличаться друг от друга из-за различий принятых начал отсчета, состава и конфигурации сети станций, моделей обработки данных и др.

Рассмотрим систематические и случайные расхождения реализаций спутниковой ЗСК  $S_i$  и  $S_j$ , имеющих  $n_{ij}$  общих станций. Систематические расхождения представим в виде переноса начал и поворота осей

$$\mathbf{r}_{jk} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{r}_{ik} + \mathbf{t} + \mathbf{r}_{ik}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{r}_{ik}$ ,  $\mathbf{r}_k$  — векторы координат  $k$ -й точки в  $S_i$  и  $S_j$  соответственно;  $\mathbf{t} = (t_1, t_2, t_3)$  — вектор параллельного переноса начала отсчета координат  $S_i$  в точку начала  $S_j$ ;  $\mathbf{B}$  — матрица поворота, имеющая вид

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \mu & -r_3 & r_2 \\ r_3 & \mu & -r_1 \\ -r_2 & r_1 & \mu \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $\mu$  — величина, характеризующая несовпадение масштабов  $S_i$  и  $S_j$ , принятая одинаковой по трем осям;  $r_1, r_2, r_3$  — углы поворотов вокруг соответствующих осей.

Таким образом, систематические расхождения различных реализаций ЗСК определяются семью параметрами в (1) и (2) и их средними квадратичными ошибками. Эти величины можно найти из решения системы уравнений (1) для координат станций, общих для  $S_i$  и  $S_j$ .

Чтобы охарактеризовать точность реализаций ЗСК в случайном отношении, определим дисперсию

$$D_{ij} = \frac{1}{n_{ij} - 7} \sum_{k=1}^{n_{ij}} (\mathbf{r}_{jk} - \mathbf{r}_{ik}^*)^2, \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}_{ik}^*$  — вектор, переведенный из  $S_i$  в  $S_j$  по (1) с помощью найденных выше параметров переноса и поворота осей. В случае некоррелированных случайных ошибок реализаций  $S_i$  и  $S_j$  имеем

$$D_{ij} = D_i + D_j, \quad (4)$$

где  $D_i$  — дисперсия случайных ошибок реализации  $S_i$ . Значения  $D_i$  могут быть получены из попарного сравнения различных реализаций ЗСК.

6	7	8	9
$4.933 \cdot 10^{-9}$	$9.108 \cdot 10^{-9}$	$1.013 \cdot 10^{-8}$	$5.063 \cdot 10^{-9}$
$8.259 \cdot 10^{-10}$	$6.647 \cdot 10^{-9}$	$2.748 \cdot 10^{-9}$	$-1.730 \cdot 10^{-9}$
$1.662 \cdot 10^{-8}$	$-7.777 \cdot 10^{-9}$	$-1.128 \cdot 10^{-8}$	$-1.731 \cdot 10^{-8}$
$2.438 \cdot 10^{-9}$	$5.288 \cdot 10^{-9}$	$5.817 \cdot 10^{-10}$	$2.512 \cdot 10^{-9}$
$-2.514 \cdot 10^{-8}$	$-2.166 \cdot 10^{-8}$	$-8.669 \cdot 10^{-9}$	$-2.540 \cdot 10^{-8}$
	$4.463 \cdot 10^{-9}$	$3.056 \cdot 10^{-11}$	$1.694 \cdot 10^{-10}$
		$-5.204 \cdot 10^{-9}$	$-8.935 \cdot 10^{-9}$
			$-4.033 \cdot 10^{-8}$

Выполнено сравнение следующих девяти реализаций ЗСК.

1. Реализация ЗСК, построенная на основе BTS с учетом данных локальной геодезической привязки лазерных дальномеров к геодезическим маркерам (SSC(BIH)84L). BTS реализуется набором координат 34 геодезических маркеров и координат двух радиотелескопов. С помощью приведенных в [1] данных геодезической привязки лазерных дальномеров к маркерам система BTS редуцирована к лазерной реализации ЗСК. С приемлемой точностью это удалось сделать для 22 станций лазерной локации ИСЗ.

2. Реализация SSC(ZIPE)85L02 построена Центральным институтом физики Земли (ГДР). Включает в себя 31 станцию лазерной локации ИСЗ. При построении реализации ЗСК широта и долгота станции №7907 фиксированы. Использовалась программа POTSDAM-5.

3. Реализация SSC(NAL)85L01 построена Национальной аэрокосмической лабораторией (Япония). Состоит из координат 23 станций. Использовалась система обработки орбит NAL-84.08P.

4. Реализация SSC(GAOUA)85L02 построена Главной астрономической обсерваторией АН УССР. Использовалась программа «Киев-Геодинамика-2». Долгота станции № 7907 фиксировалась.

5. Реализация SSC(UPAD)85L01 построена университетом г. Падуа (Италия). Состоит из координат 15 станций. При обработке использована программа GEODYN Центра космических полетов им. Годдарда (США).

6. Реализация SSC(ESOC)85L01 построена Европейским центром космических полетов (ФРГ). Состоит из координат 18 станций. Фиксирована долгота станции № 7105. Координаты станции № 7265 получены отдельно по меньшему массиву данных. Использовалась программа BAHN.

7. Реализация SSC(DGFII)85L04 построена Германским геодезическим исследовательским институтом (ФРГ). Состоит из координат 29 станций. Фиксированы широта и долгота станции № 7834 и широта станции № 7105.

8. Реализация SSC(GSFC)85L01 построена Центром космических полетов им. Годдарда (США). Состоит из координат 26 станций.

9. Реализация SSC(CSR)85L01 построена Центром космических исследований Техасского университета (США). Даны координаты 35 точек. Из них 18 станций лазерной локации и 17 геодезических маркеров, для которых даны векторы перехода к лазерам.

Результаты сравнений всех реализаций приведены в таблицах 1 — 3. Номера реализаций ЗСК соответствуют номерам в тексте. Параметры, полученные при сравнении  $S_i$  и  $S_j$  находятся на пересечении  $i$ -й строки и  $j$ -го столбца. Точность компонентов вектора переноса составляет от  $\pm 0.01$  до  $\pm 0.05$  м, углов — от  $\pm 0.001$  до  $\pm 0.003''$ , масштаба — от  $\pm 3 \cdot 10^{-10}$  до  $\pm 1 \cdot 10^{-9}$ . Приведенные результаты свидетельствуют о близости рассматриваемых реализаций в систематическом отношении.

Отметим, что при сравнении применялся критерий отбраковки отдельных станций  $|r_{jk} - r_{ik}^*| > 2D_{ij}$ , где  $D_{ij}$  — определяется из (3). При этом оказалось, что для реализации SSC(GSFC)85L01 необходимо постоянно отбрасывать большое число станций. Поэтому такая реализация исключена из дальнейшего анализа.

Оценки точности реализаций ЗСК в случайном отношении, полученные из решения системы (4), приведены ниже ( $D_i$ , м):

SSC (BIH)84L	— 0.119	SSC (UPAD) 85L01	— 0.061
SSC (ZIPE) 85L02	— 0.045	SSC (ESOC) 85L01	— 0.046
SSC (NAL) 85L01	— 0.048	SSC (DGFII) 85L04	— 0.046
SSC (GAOUA) 85L02	— 0.049	SSC (CSR) 85L01	— 0.027

Из этого следует, что реализация SSC(CSR)85L01 является самой точной. Реализация SSC(BIH)84L имеет худшую точность, что можно



объяснить двумя причинами: во-первых, BTS создана на основе объединения данных, полученных различными методами; во-вторых, выполненная нами редукция BTS типа «маркер-лазерный дальномер» имеет большие погрешности из-за отсутствия точной геодезической съемки.

Проведенный анализ позволил установить систематические различия реализаций спутниковой земной системы координат и дать оценку их точности. При этом оказалось, что координаты некоторых станций определены с недостаточной точностью в ряде реализаций (например, станция № 1181 в реализации SSC(UPAD)85L01 или станция № 7831 в реализации SSC(DGFII)85L04). Результаты выполненного сравнения можно использовать для построения сводной реализации ЗСК.

Автор выражает благодарность Я. С. Яцкиву за советы и замечания.

1. *Altamimi Z., Boucher C., Feissel M.* Directory of sites participating to the realisations of the BTS for 1984.— Paris, 1985.
2. *BIH Annu. Rept. for 1984.*— Paris, 1985.
3. *Proceedings of the international conference on Earth rotation and the terrestrial reference frame. Vol. 1.*— Columbus, Ohio: Dep. Geod. Sci. and Surv., Ohio State Univ., 1985.—416 p.
4. *Reference frame requirements and the MERIT campaign: proposal for extra observations / CSTG Bull.*— 1984.— N 4.— P. 1—2.

Киев. ун-т им. Т. Г. Шевченко

Поступила в редакцию  
21.07.86

*Окончание. Начало см. с. 57*

17. *Kontorovich V. M., Kochanov A. E.* Formation of universal and diffusion regions of non-linear spectra of relativistic electrons in spatially limited sources // *Astrophys. and Space Sci.*— 1980.—71, N 2.— P. 265—293.
18. *Kuhr H., Nauber U., Pauliny-Toth I. I. K., Witzel A.* A catalogue of radio sources.— Bonn, 1979.—337 P.— (Preprint / Max-Planck-Institut für Radioastronomie; N 55).
19. *Lousdale C. J., Morison I.* Asymmetries in four powerful radio sources // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*— 1983.—203, N 2.— P. 833—851.
20. *Rees M. J.* The M 87 jet: internal shocks in a plasma beam // *Ibid.*— 1978.—184, N 1.— P. 61—65.
21. *Schreier E., Gorenstein P., Feigelson E.* High-resolution X-ray observations of M 87: nucleus, jet and radio halo // *Astrophys. J.*— 1982.—261, N 1.— P. 42—50.
22. *Valtaoja E.* Diffusion of electrons in radio galaxies // *Astron. and Astrophys.*— 1982.—111, N 2.— P. 213—219.
23. *Vaucouleurs G., Nieto J.-L.* A photometric analysis of the jet in Messier 87 // *Astrophys. J.*— 1979.—231, N 2.— P. 364—371.

Радиоастрон. ин-т АН УССР,  
Харьков

Поступила в редакцию  
29.07.86

*Окончание. Начало см. с. 67*

7. *Чернин А. Д.* О происхождении вращения галактик. II // *Астрофизика.*— 1977.—13, вып. 1.— С. 69—78.
8. *Эйнасто Я.* Гипергалактики // *Крупномасштабная структура Вселенной.*— М.: Мир, 1981.— С. 63—74.
9. *Gott I. R. III, Turner E. L.* Group of Galaxies. III. Mass-to-light ratios and crossing times // *Astrophys. J.*— 1977.—213, N 2.— P. 309—322.
10. *Karachentsev I. D.* New radial velocities for 301 pairs of galaxies // *Astron. J. Suppl. Ser.*— 1980.—44, N 1.— P. 137—149.
11. *Roos N., Norman C. A.* Galaxy collisions and their influence on the dynamics and evolution of groups and clusters of galaxies // *Astron. and Astrophys.*— 1979.—76, N 1.— P. 75—85.
12. *Turner E. L.* Binary galaxies. II. Dynamics and mass-to-light ratios // *Astrophys. J.*— 1977.—208, N 2.— P. 304—316.
13. *Vennik J.* A list of nearby groups of galaxies.— Tallinn, 1984.—65 p.

Ленингр. пед. ин-т  
им. А. И. Герцена

Поступила в редакцию 01.09.86,  
после доработки 27.10.86