

УДК 629.051

АНАЛИТИКО-ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КООРДИНАТОМЕТРИИ ДВУХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ, ИСПОЛЬЗУЮЩЕЙ ИЗЛУЧАЮЩУЮ ОПОРНУЮ РЕПЕРНУЮ СТАНЦИЮ И НЕ МЕНЕЕ ЧЕТЫРЕХ ЗЕМНЫХ СТАНЦИЙ

С.В Дворников, Д.М. Наасо, В.В. Севидов (Санкт-Петербург)

Классические системы координатометрии, такие как угломерные [1], угломерно-дальномерные [2], разностно-дальномерные [3] достаточно хорошо изучены, оценены и оптимизированы. Вместе с тем ряд практических задач по радиосвязи, радиомониторингу и деструктивному воздействию приводят к появлению новых комбинированных систем координатометрии [4, 5]. Для таких систем координатометрии не всегда представляется возможным вывести аналитические выражения для оценки точностных характеристик системы, являющихся одними из основных.

Целью исследования явилась разработка комбинированной системы координатометрии по определению координат двух космических аппаратов, использующая излучающую опорную реперную станцию (ИОРС) и не менее четырех земных станций (ЗС).

Для достижения цели сформулированы и решены две задачи:

– аналитическая – составление и решение уравнений по определению координат двух космических аппаратов, используя временные задержки от ИОРС и не менее четырех ЗС.

– имитационная – разработка и симуляция системы координатометрии, получение и анализ результатов по оценке точностных характеристик оценки координат КА.

Разработанная система координатометрии характеризуется наличием помимо основного космического аппарата (ОКА), через который организуется канал связи, смежного космического аппарата (СКА), способного ретранслировать, пусть и с большим ослаблением и иной частотой переноса, радиосигнал основного радиоканала. Результатом работы системы координатометрии является оценка координат и точности этой оценки как ОКА, так и СКА. Отличительной особенностью разработанной системы координатометрии является то, что все необходимые измерения и расчеты проводятся на приемной радиотехнической станции (ПРТС).

На рисунке 1 представлена топология разработанной системы координатометрии двух КА и введены обозначения: S_1 – ОКА; S_2 – СКА; K – ПРТС; H – ИОРС; I_1, \dots, I_4 – ЗС.

Алгоритм определения координат ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 с использованием ЗС I_n , где $n = 1 \dots N$ – номер ЗС, $N \geq 4$, размещенных на позициях с известными координатами $x_{I_n}, y_{I_n}, z_{I_n}$ и ИОРС, размещенной на позиции с известными координатами x_H, y_H, z_H , основан на том, что каждой из временных задержек Δt_n соответствует разности ΔR_n длин $R_{I_n S_1 K}$ и $R_{I_n S_2 K}$ траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$, а временным задержкам Δt_{H_1} и Δt_{H_2} соответствуют длины $R_{H S_1 K}$ и $R_{H S_2 K}$ траекторий $H S_1 K$ и $H S_2 K$ соответственно.

В качестве примера далее представлен вариант с четырьмя ЗС ($N = 4$) и ИОРС как минимально необходимого состава для однозначного одномоментного определения координат ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 по заявляемому способу.

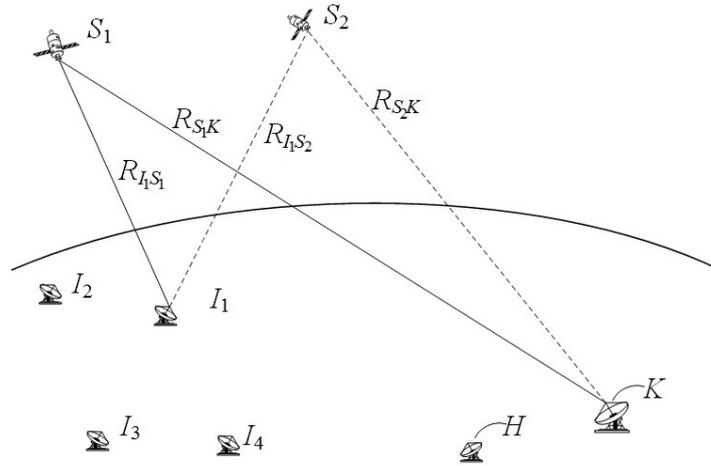


Рис. 1 – Топология разработанной системы координатометрии двух КА

Выражения для длин $R_{I_n S_1 K}$ и $R_{I_n S_2 K}$ траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$ возможно записать в виде:

$$R_{I_n S_1 K} = \sqrt{(x_1 - x_{I_n})^2 + (y_1 - y_{I_n})^2 + (z_1 - z_{I_n})^2} + \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2}; \quad (1)$$

$$R_{I_n S_2 K} = \sqrt{(x_2 - x_{I_n})^2 + (y_2 - y_{I_n})^2 + (z_2 - z_{I_n})^2} + \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2}. \quad (2)$$

Используя Δt_n и выражения (1) и (2), составляют уравнения для разностей длин $R_{I_n S_1 K}$ и $R_{I_n S_2 K}$ траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$:

$$\Delta R_n = \Delta t_n c = \sqrt{(x_1 - x_{I_n})^2 + (y_1 - y_{I_n})^2 + (z_1 - z_{I_n})^2} + \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2} - \sqrt{(x_2 - x_{I_n})^2 + (y_2 - y_{I_n})^2 + (z_2 - z_{I_n})^2} - \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2}, \quad (3)$$

где $c=3 \times 10^8$ м/с – скорость света в вакууме.

Для длин $R_{HS_1 K}$ и $R_{HS_2 K}$ траекторий $HS_1 K$ и $HS_2 K$ справедливы уравнения:

$$R_{HS_1 K} = \Delta t_{H_1} c = \sqrt{(x_1 - x_H)^2 + (y_1 - y_H)^2 + (z_1 - z_H)^2} + \sqrt{(x_1 - x_K)^2 + (y_1 - y_K)^2 + (z_1 - z_K)^2}; \quad (4)$$

$$R_{HS_2 K} = \Delta t_{H_2} c = \sqrt{(x_2 - x_H)^2 + (y_2 - y_H)^2 + (z_2 - z_H)^2} + \sqrt{(x_2 - x_K)^2 + (y_2 - y_K)^2 + (z_2 - z_K)^2}. \quad (5)$$

Решением системы уравнений, состоящей из шести уравнений (четыре уравнения (3) для $n=1 \dots 4$ и уравнения (4) и (5)) является шесть корней – координаты ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 в момент времени t_0 .

Для расчета координат ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 в момент времени t_0 с использованием четырех ЗС и ИОРС разработан алгоритм, схема которого представлена на рисунке 2.

На этапе 1 производят ввод исходных данных, в качестве которых выступают: момент времени измерения t_0 ; координаты ПРТС x_K, y_K, z_K ; координаты четырех ЗС $x_{I_n}, y_{I_n}, z_{I_n}$; координаты ИОРС x_H, y_H, z_H ; временные задержки между радиосигналами принятыми от ОКА и СКА для каждой из выбранных ЗС Δt_n ; временные задержки Δt_{H_1} и Δt_{H_2} между излученным и принятым тестовым радиосигналом ИОРС после его ретрансляции ОКА и СКА соответственно; порог точности δ расчета координат ОКА и СКА.

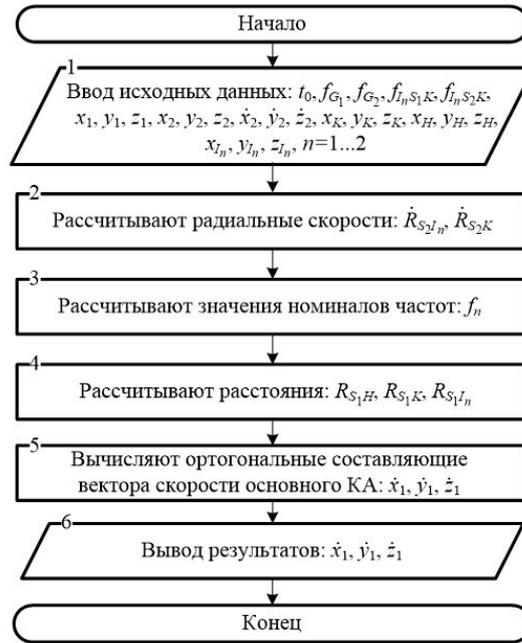


Рис. 2 – Схема алгоритма определения координат ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 с использованием ЗС I_n , где $n = 1...N$ – номер ЗС, $N \geq 4$, размещенных на позициях с известными координатами $x_{I_n}, y_{I_n}, z_{I_n}$ и ИОРС

На этапе 2 рассчитывают разности ΔR_n длин $R_{I_n S_1 K}$ и $R_{I_n S_2 K}$ траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$ по формулам (1).

$$\Delta R_n = R_{I_n S_1 K} - R_{I_n S_2 K} = \Delta t_n c.$$

На этапе 3 рассчитывают длины $R_{HS_1 K}$ и $R_{HS_2 K}$ траекторий $HS_1 K$ и $HS_2 K$ по формулам:

$$R_{HS_1 K} = \Delta t_{H_1} c;$$

$$R_{HS_2 K} = \Delta t_{H_2} c.$$

На этапе 4 выбирают, на основе элементов Кеплеровой орбиты ОКА и СКА, координаты опорных точек $S'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ и $S'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$, как первых приближений к координатам ОКА и СКА соответственно.

На этапе 5 рассчитывают разности $\Delta R'_n$ длин $R_{I_n S'_1 K}$ и $R_{I_n S'_2 K}$ траекторий $I_n S'_1 K$ и $I_n S'_2 K$ при условии равенства координат ОКА и СКА координатам опорных точек $S'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ и $S'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ по формулам:

$$\Delta R'_n = \sqrt{(x'_1 - x_{I_n})^2 + (y'_1 - y_{I_n})^2 + (z'_1 - z_{I_n})^2} + \sqrt{(x'_1 - x_K)^2 + (y'_1 - y_K)^2 + (z'_1 - z_K)^2} - \sqrt{(x'_2 - x_{I_n})^2 + (y'_2 - y_{I_n})^2 + (z'_2 - z_{I_n})^2} - \sqrt{(x'_2 - x_K)^2 + (y'_2 - y_K)^2 + (z'_2 - z_K)^2}.$$

На этапе 6 рассчитывают длины $R_{HS'_1 K}$ и $R_{HS'_2 K}$ траекторий $HS'_1 K$ и $HS'_2 K$ при условии равенства координат ОКА и СКА координатам опорных точек $S'_1(x'_1, y'_1, z'_1)$ и $S'_2(x'_2, y'_2, z'_2)$ по формулам:

$$R_{HS'_1 K} = \sqrt{(x'_1 - x_H)^2 + (y'_1 - y_H)^2 + (z'_1 - z_H)^2} + \sqrt{(x'_1 - x_K)^2 + (y'_1 - y_K)^2 + (z'_1 - z_K)^2};$$

$$R_{HS'_2 K} = \sqrt{(x'_2 - x_H)^2 + (y'_2 - y_H)^2 + (z'_2 - z_H)^2} + \sqrt{(x'_2 - x_K)^2 + (y'_2 - y_K)^2 + (z'_2 - z_K)^2}.$$

На этапе 7 рассчитывают невязки k_1, k_2, k_3, k_4 и k_6 .

Невязки k_1, k_2, k_3 и k_4 рассчитывают как разницы между определенными на этапе 5 разностями длин $\Delta R'_n$ траекторий $I_n S'_1 K$ и $I_n S'_2 K$ и разностями длин ΔR_n траекторий $I_n S_1 K$ и $I_n S_2 K$, определенными на этапе 2 соответственно:

$$k_n = \Delta R'_n - \Delta R_n.$$

Невязки k_5 и k_6 рассчитывают как разницы между определенными на этапе 6 длинами $R_{HS'_1 K}$ и $R_{HS'_2 K}$ траекторий $HS'_1 K$ и $HS'_2 K$, а также длинами $R_{HS_1 K}$ и $R_{HS_2 K}$ траекторий $HS_1 K$ и $HS_2 K$, определенными на этапе 3 соответственно:

$$k_5 = R_{HS'_1 K} - R_{HS_1 K};$$

$$k_6 = R_{HS'_2 K} - R_{HS_2 K}.$$

На этапе 8 определяют поправки к координатам ОКА $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1$ и СКА $\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2$.

Для определения поправок к координатам ОКА $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1$ и СКА $\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2$ предварительно формируют систему линейных уравнений при разложении в ряд Тейлора функций $\Delta R'_n, R_{HS'_1 K}$ и $R_{HS'_2 K}$ с точностью до первых членов:

$$\begin{cases} \frac{\partial R'_1}{\partial x'_1} \Delta x_1 + \frac{\partial R'_1}{\partial y'_1} \Delta y_1 + \frac{\partial R'_1}{\partial z'_1} \Delta z_1 + \frac{\partial R'_1}{\partial x'_1} \Delta x_2 + \frac{\partial R'_1}{\partial y'_1} \Delta y_2 + \frac{\partial R'_1}{\partial z'_1} \Delta z_2 = k_1, \\ \frac{\partial R'_2}{\partial x'_1} \Delta x_1 + \frac{\partial R'_2}{\partial y'_1} \Delta y_1 + \frac{\partial R'_2}{\partial z'_1} \Delta z_1 + \frac{\partial R'_2}{\partial x'_1} \Delta x_2 + \frac{\partial R'_2}{\partial y'_1} \Delta y_2 + \frac{\partial R'_2}{\partial z'_1} \Delta z_2 = k_2, \\ \frac{\partial R'_3}{\partial x'_1} \Delta x_1 + \frac{\partial R'_3}{\partial y'_1} \Delta y_1 + \frac{\partial R'_3}{\partial z'_1} \Delta z_1 + \frac{\partial R'_3}{\partial x'_1} \Delta x_2 + \frac{\partial R'_3}{\partial y'_1} \Delta y_2 + \frac{\partial R'_3}{\partial z'_1} \Delta z_2 = k_3, \\ \frac{\partial R'_4}{\partial x'_1} \Delta x_1 + \frac{\partial R'_4}{\partial y'_1} \Delta y_1 + \frac{\partial R'_4}{\partial z'_1} \Delta z_1 + \frac{\partial R'_4}{\partial x'_1} \Delta x_2 + \frac{\partial R'_4}{\partial y'_1} \Delta y_2 + \frac{\partial R'_4}{\partial z'_1} \Delta z_2 = k_4, \\ \frac{\partial R_{HS'_1 K}}{\partial x'_1} \Delta x_1 + \frac{\partial R_{HS'_1 K}}{\partial y'_1} \Delta y_1 + \frac{\partial R_{HS'_1 K}}{\partial z'_1} \Delta z_1 = k_5, \\ \frac{\partial R_{HS'_2 K}}{\partial x'_2} \Delta x_1 + \frac{\partial R_{HS'_2 K}}{\partial y'_2} \Delta y_1 + \frac{\partial R_{HS'_2 K}}{\partial z'_2} \Delta z_1 = k_6. \end{cases} \quad (6)$$

где частные производные рассчитываются согласно выражениям

$$\begin{aligned} \frac{\partial R'_n}{\partial x'_1} &= \frac{x'_1 - x_{I_n}}{R_{I_n S'_1}} + \frac{x'_1 - x_K}{R_{S'_1 K}}, & \frac{\partial R'_n}{\partial y'_1} &= \frac{y'_1 - y_{I_n}}{R_{I_n S'_1}} + \frac{y'_1 - y_K}{R_{S'_1 K}}, & \frac{\partial R'_n}{\partial z'_1} &= \frac{z'_1 - z_{I_n}}{R_{I_n S'_1}} + \frac{z'_1 - z_K}{R_{S'_1 K}}, \\ \frac{\partial R'_n}{\partial x'_2} &= \frac{x_{I_n} - x'_2}{R_{I_n S'_2}} + \frac{x_K - x'_2}{R_{S'_2 K}}, & \frac{\partial R'_n}{\partial y'_1} &= \frac{y_{I_n} - y'_2}{R_{I_n S'_2}} + \frac{y_K - y'_2}{R_{S'_2 K}}, & \frac{\partial R'_n}{\partial x'_1} &= \frac{z_{I_n} - z'_2}{R_{I_n S'_2}} + \frac{z_K - z'_2}{R_{S'_2 K}}, \\ \frac{\partial R_{HS'_1 K}}{\partial x'_1} &= \frac{x'_1 - x_H}{R_{HS'_1}} + \frac{x'_1 - x_K}{R_{S'_1 K}}, & \frac{\partial R_{HS'_1 K}}{\partial y'_1} &= \frac{y'_1 - y_H}{R_{HS'_1}} + \frac{y'_1 - y_K}{R_{S'_1 K}}, & \frac{\partial R_{HS'_1 K}}{\partial z'_1} &= \frac{z'_1 - z_H}{R_{HS'_1}} + \frac{z'_1 - z_K}{R_{S'_1 K}}, \\ \frac{\partial R_{HS'_2 K}}{\partial x'_2} &= \frac{x'_2 - x_H}{R_{HS'_2}} + \frac{x'_2 - x_K}{R_{S'_2 K}}, & \frac{\partial R_{HS'_2 K}}{\partial y'_2} &= \frac{y'_2 - y_H}{R_{HS'_2}} + \frac{y'_2 - y_K}{R_{S'_2 K}}, & \frac{\partial R_{HS'_2 K}}{\partial z'_2} &= \frac{z'_2 - z_H}{R_{HS'_2}} + \frac{z'_2 - z_K}{R_{S'_2 K}}, \end{aligned}$$

а расстояния $R_{HS'_1}, R_{S'_1 K}, R_{HS'_2}, R_{S'_2 K}, R_{I_n S'_1}, R_{S'_1 K}, R_{I_n S'_2}$ и $R_{S'_2 K}$ в свою очередь рассчитываются по формулам

$$R_{HS'_1} = \sqrt{(x'_1 - x_H)^2 + (y'_1 - y_H)^2 + (z'_1 - z_H)^2},$$

$$R_{S'_1 K} = \sqrt{(x'_1 - x_K)^2 + (y'_1 - y_K)^2 + (z'_1 - z_K)^2},$$

$$R_{HS'_2} = \sqrt{(x'_2 - x_H)^2 + (y'_2 - y_H)^2 + (z'_2 - z_H)^2},$$

$$R_{S'_2K} = \sqrt{(x'_2 - x_K)^2 + (y'_2 - y_K)^2 + (z'_2 - z_K)^2},$$

$$R_{I_n S'_1} = \sqrt{(x'_1 - x_{I_n})^2 + (y'_1 - y_{I_n})^2 + (z'_1 - z_{I_n})^2},$$

$$R_{S'_1K} = \sqrt{(x'_1 - x_K)^2 + (y'_1 - y_K)^2 + (z'_1 - z_K)^2},$$

$$R_{I_n S'_2} = \sqrt{(x'_2 - x_{I_n})^2 + (y'_2 - y_{I_n})^2 + (z'_2 - z_{I_n})^2},$$

$$R_{S'_2K} = \sqrt{(x'_2 - x_K)^2 + (y'_2 - y_K)^2 + (z'_2 - z_K)^2}.$$

Решая систему линейных уравнений (А.4) одним из известных методов, например, методом Крамера, получают поправки к координатам ОКА $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1$ и СКА КА $\Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2$.

На этапе 9 рассчитывают координаты новых опорных точек x''_1, y''_1, z''_1 и x''_2, y''_2, z''_2

$$x''_1 = x'_1 + \Delta x_1, y''_1 = y'_1 + \Delta y_1, z''_1 = z'_1 + \Delta z_1,$$

$$x''_2 = x'_2 + \Delta x_2, y''_2 = y'_2 + \Delta y_2, z''_2 = z'_2 + \Delta z_2.$$

Этапы 5–9 в совокупности составляют первую итерацию. Далее итерации повторяют, используя каждый раз новые опорные точки, полученные на предыдущей итерации. Количество необходимых итераций зависит требуемой точности определения координат ОКА и СКА. С точностью определения координат ОКА и СКА напрямую связаны шаги итерации d_1 и d_2 соответственно.

На этапе 10 определяют шаги итерации d_1 и d_2 как расстояния между текущими и предыдущими опорными точками:

$$d_1 = \sqrt{(x''_1 - x'_1)^2 + (y''_1 - y'_1)^2 + (z''_1 - z'_1)^2},$$

$$d_2 = \sqrt{(x''_2 - x'_2)^2 + (y''_2 - y'_2)^2 + (z''_2 - z'_2)^2}.$$

На этапе 11 сравнивают d_1 и d_2 с порогом δ , задаваемым на этапе 1.

Необходимое число итераций, как правило, составляет 2...4. В качестве координат ОКА x_1, y_1, z_1 и СКА x_2, y_2, z_2 выбирают значения координат опорных точек на последней итерации, вывод которых осуществляют на этапе 12.

В общем случае, когда количество ЗС $N > 4$, алгоритм определения координат ОКА и СКА остается прежним, с той лишь разницей, что система уравнений (6) будет содержать $N+2$ уравнений. Тогда такую систему уравнений решают, например, методом наименьших квадратов.

Важнейшей характеристикой любой системы координатометрии является точность оценки координат.

Для оценки точности разработанной системы координатометрии, проведено имитационное моделирование в среде программирования Matlab [6].

В качестве примера ПРТС, ИОРС и две ЗС были выбраны на территории Сирийской Арабской Республики с координатами в географической системе координат (ГСК) и декартовой системе координат (ДСК), представленными в таблице 1.

Схема размещения ПРТС, ИОРС и двух ЗС на территории Сирийской Арабской Республики показана на рисунке 3.

Таблица 1 –Координаты ПРТС, ИОРС и две ЗС в ГСК и ДСК

№ п/п	Наименование станции (город)	Координаты станции					
		В ГСК			В ДСК		
		$\lambda, ^\circ$ в.д.	$\varphi, ^\circ$ с.ш.	$h, \text{ м}$	$x, \text{ км}$	$y, \text{ км}$	$z, \text{ км}$
1	ПРТС (Дамаск)	36,3	33,5	700	4291,3	3152,3	3500,7
2	ИОРС (Латакия)	35,5	35,3	100	4243,7	3023,7	3656,7
3	ЗС № 1 (Хасака)	40,9	36,5	300	4880,1	3361,1	3773,1
4	ЗС № 2 (Теньф)	38,8	33,4	200	4151,2	3341,4	3494,2

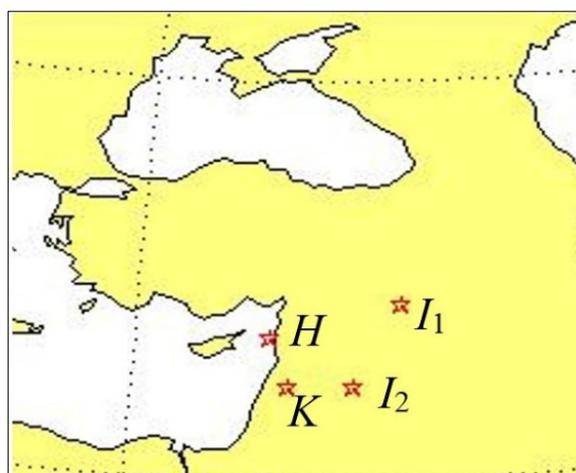


Рис. 3 – Схема размещения ПРТС, ИОРС и двух ЗС на территории Сирийской Арабской Республики

Высота КА была выбрана 550 км. Широты и долготы исследуемых координат КА с градацией $0,1^\circ$ были выбраны над территорией САР и над близлежащей территорией так, чтобы местоположение КА был в зоне прямой видимости каждой выбранной наземной станции из числа ПРТС, ИОРС и двух ЗС.

Для каждой из выбранных точек расположения КА проводят следующие процедуры:

- для текущей точки размещения КА и наземных станций из числа ПРТС, ИОРС и двух ЗС рассчитывали идеальные временные задержки, то есть такие, какие были бы измерены при нулевой погрешности измерений;
- к идеальным временным задержкам добавляли погрешности измерений с учетом их нормального распределения;
- по полученным задержкам, используя вышеописанный алгоритм, рассчитывали координаты КА для текущей исследуемой точки;
- усредняли координаты КА по результатам 1000 экспериментов. Как представлено на рисунке 4;
- сравнивали заданные и рассчитанные координаты КА, получая погрешность измерения σ_L ;
- по результатам расчета погрешностей для всех исследуемых точек строили изолинии, примеры которых для погрешностей измерений временных задержек $\sigma_\tau = 5 \times 10^{-8}$ с и $\sigma_\tau = 10^{-8}$ с представлены на рисунке 5.

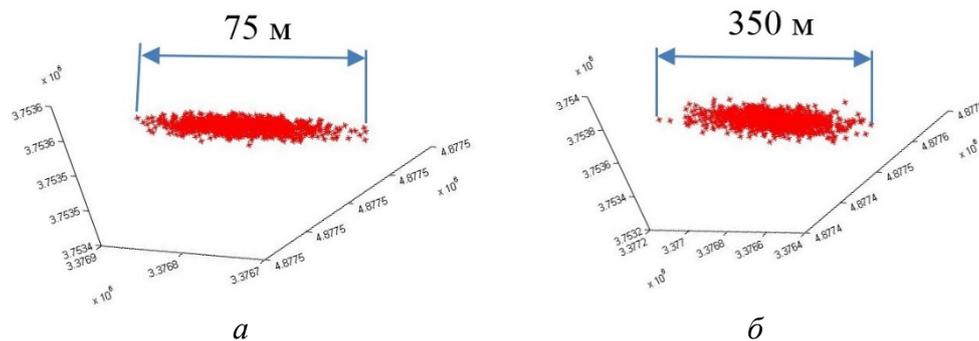


Рис. 4 – Результаты моделирования при разных погрешностях σ_τ :
 $a - \sigma_\tau = 5 \times 10^{-8}$, $b - \sigma_\tau = 10^{-8}$

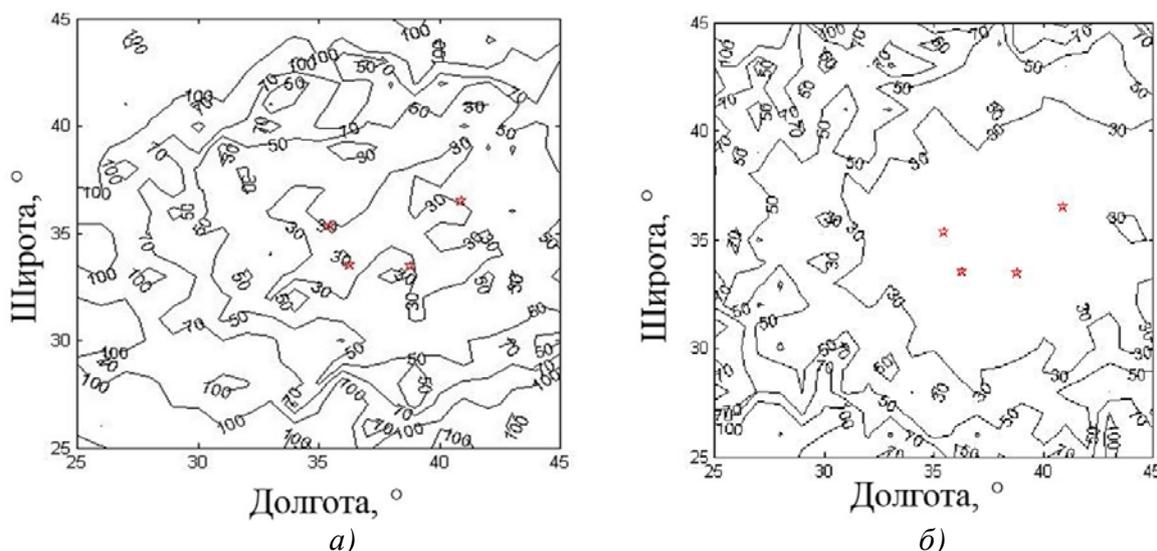


Рис. 5 – Примеры изолиний ошибок оценки координат КА (σ_L , м) при различных погрешностях измерения временной задержки σ_τ :
 $a - \sigma_\tau = 5 \times 10^{-8}$ с; $b - \sigma_\tau = 10^{-8}$ с

Результаты исследования могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих средств координатометрии, а также в образовательном процессе для подготовки соответствующих специалистов.

Данная статья не закрывает рассматриваемую тему. Направлением дальнейшего исследования может стать экспериментальное подтверждение полученных результатов.

Литература

1. Способы отождествления пеленгов в двухпозиционных угломерных системах радиомониторинга воздушного базирования / В. И. Меркулов, Д. А. Миляков, А. С. Пляшечник, В. С. Чернов // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 12.
2. **Строцев А.А.** Метод координатометрии источников излучения на основе построения параметрических поверхностей положения / А. А. Строцев, Р. В. Емельянов // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 7(9). С. 127-138.
3. **Фокин Г.А.** Сетевое позиционирование 5G и вероятностные модели оценки его точности / Г. А. Фокин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 12. С. 4-17.
4. **Фокин Г.А.** Использование SDR технологии для задач сетевого позиционирования.

- Формирование опорных сигналов LTE / Г. А. Фокин, Д. Б. Волгушев, В. Н. Харин // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16, № 5. С. 28-47.
5. Polarization Direction Finding Method of Interfering Radio Emission Sources / A. Simonov, G. Fokin, V. Sevidov [et al.] // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems, St. Petersburg, Russia, 26–28 августа 2019 года. Vol. 11660. – St. Petersburg, Russia: Springer Verlag, 2019. P. 208-219.
 6. **Наасо Д.М.** Программная модель разностно-суммарно-дальномерной системы координатометрии космического аппарата. Программа для ЭВМ. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2024665888, от 08.17.2024. Заявка № 2024663946 от 18.06.24.