https://doi.org/10.15407/knit2020.04.038
УДК 629.7.05

О. І. ТКАЧЕНКО
старш. наук. співроб., д-р техн. наук
E-mail: tkachenko_mnnc@ukr.net
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем
НАН України і Міністерства освіти і науки України
Проспект Академіка Глушкова 40, Київ-680, Україна, 03680

ВАРІАНТ ПРИВ'ЯЗКИ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ОДНИМ КОСМІЧНИМ ЗНІМКОМ

Розглядається задача позиціонування невідомих наземних об'єктів у системі координат, пов'язаній з Землею (задача координатної прив'язки). Передбачається використання єдиного знімка згаданих об'єктів (маркерів), виконаного бортовою знімальною камерою космічного апарата на навколоземній орбіті і переданого на землю разом з синхронною супровідною інформацією. Залучається заданий апріорі математичний опис форми поверхні Землі. Зйомкам маркерів в інтересах координатної прив'язки передує польотне калібрування — уточнення взаємної орієнтації камери та бортового зоряного давача у тілі космічного апарата. Розрахунки у рамках калібрування і координатної прив'язки обслуговуються наземним комп'ютером.

На відміну від постановок і розв'язків розглядуваної задачі у відомих публікаціях, у цій роботі наперед надається вельми приблизна апроксимація шуканих координат об'єктів прив'язки з похибками на рівні 100 км. На цій підставі нелінійне рівняння земної поверхні замінюється лінеаризованим рівнянням відносно похибок позиціонування невідомого маркера. Вираз у лівій частині цього рівняння є проекцією вектора похибок позиціонування на напрям геоцентричного радіуса-вектора маркера. Згадане рівняння розв'язується разом з векторним рівнянням похибок, складеним на основі фотограмметричної умови колінеарності. Система чотирьох скалярних рівнянь похибок з певністю не вироджена, якщо лінія візування маркера не перпендикулярна до радіуса-вектора маркера.

Спрощення, допущені при лінеаризації рівняння формули Землі, істотно спотворюють оцінку параметрів прив'язки. Для послаблення цього ефекту пропонується методика координатної прив'язки, заснована на використанні розмитого спостерігача стану. Методика реалізується як послідовність циклічних операцій. У кожному циклі за допомогою розмитого спостерігача оцінюється відносно мала елементарна частина похибки позиціонування маркера. Збіжність процедури оцінювання така, що для отримання прийнятної точності прив'язки доводиться виконувати сотні і тисячі елементарних циклів. Це необтяжливо для розрахунків у стаціонарних умовах.

Точна і однозначна оцінка трьох координат об'єкта прив'язки можлива принаймні при його незначній висоті над рівневою поверхнею.

***Ключові слова**: космічний апарат, координатна прив'язка, зоряний давач, камера, розмитий спостерігач, рівняння поверхні Землі, збіжність оцінок.*

Нижче розглядається задача координатної прив'язки — визначення місцезнаходження невідомих наземних об'єктів у системі координат, зв'язаній із Землею, за космічними знімками. Розрахунки виконуються на землі.

В роботах [1—3] передбачається вирішення завдань координатної прив'язки тільки по одному космічному знімку, в роботах [4, 5] — з використанням не менш ніж двох знімків об'єктів прив'язки.

Цитування: Ткаченко О. І. Варіант прив'язки наземних об'єктів за одним космічним знімком. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 4 (125). С. 38—44. https://doi.org/10.15407/knit2020.04.038

На відміну від постановок і розв'язків розглянутої задачі у відомих публікаціях [1—5], в даній роботі вважається наперед заданою апроксимація шуканих координат об'єктів прив'язки, хоча б і дуже груба, наприклад з помилками порядку 100 км. Можливо, цієї точності недостатньо для наведення оптичної осі камери на передбачуване місце розташування об'єкта прив'язки; така гіперболізація має на увазі продемонструвати конвергентні можливості власне методу прив'язки. Можна очікувати, що такий підхід виявиться корисним для прив'язки невідомого об'єкта, що потрапив у поле зору камери несподівано — без навмисного наведення.

Бортова апаратура, необхідна для координатної прив'язки, включає знімальну камеру, зоряний давач, приймач GPS, хронометр. Вважаємо, що при експонуванні невідомий точковий маркер M перебуває у полі зору камери. Вводяться ортонормовані координатні базиси: $\mathbf{J}$ — геоцентричний, пов'язаний з Землею, $\mathbf{K}$ — пов'язаний з камерою, з початком у її центрі проекції. Якщо координатній прив'язці передує ретельне калібрування, то можна вважати, що орієнтація базису $\mathbf{K}$ відносно $\mathbf{J}$ визначається з потрібною точністю за показаннями зоряного давача. Одне рівняння вимірювань для методу прив'язки виходить на основі фотограмметричної умови колінеарності:

$$\Phi(\mathbf{e}_J)\mathbf{r}_J = \mathbf{e}_J \times \mathbf{R}_J\,, \qquad (1)$$

де нижній індекс J вказує на подання векторів у базисі $\mathbf{J}$, $\mathbf{r}_J$ — шуканий геоцентричний радіус-вектор маркера M, $\mathbf{R}_J$ — геоцентричний радіус-вектор КА, знайдений за повідомленнями GPS, $\mathbf{e}_J$ — одиничний вектор лінії візування маркера, розрахований за допомогою камери, Φ — кососиметрична (3×3)-матриця; формально $\Phi(\mathbf{e}_J)\mathbf{r}_J \equiv \mathbf{e}_J \times \mathbf{r}_J$. Рівняння (1) визначає вектор $\mathbf{r}_J$ з точністю до проекції на напрямок лінії візування маркера.

Апроксимуємо рівневу поверхню Землі поверхнею еліпсоїда обертання так, що базисні напрямки системи $\mathbf{J}$ збігаються з головними центральними осями еліпсоїда:

$$\frac{x^2+y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1\,, \qquad (2)$$

де x, y, z — координати в базисі $\mathbf{J}$, a, b — відповідно велика і мала півосі еліпсоїда.

Нехай $x^* = x + \Delta x$, $y^* = y + \Delta y$, $z^* = z + \Delta z$ — відомі координати точки, відносно близької до M. Позначимо $\mathbf{r}^\circ = [x^*,\ y^*,\ az^*/b]^{\mathrm{T}}$ (індекс Т вказує на транспонування), $\Delta\mathbf{r} = [\Delta x,\ \Delta y,\ \Delta z\,]^{\mathrm{T}}$, $s = (\mathbf{r}^{\circ\mathrm{T}}\mathbf{r}^\circ)^{1/2}$, $\mathbf{e}^\circ = \mathbf{r}^\circ/s$.

Рівняння вимірювань, що відповідає рівнянню (2), має вигляд

$$\mathbf{e}^{\circ T}\Delta\mathbf{r} = a - s. \qquad (3)$$

Рівняння (3) характеризує проекцію вектора помилки $\Delta\mathbf{r}$ на напрям, протилежний $\mathbf{r}^\circ$. Воно нечутливе до складової названої помилки, перпендикулярної до $\mathbf{r}^\circ$. Рівняння (1) також виразимо через $\Delta\mathbf{r}$:

$$\Phi(\mathbf{e}_J)\Delta\mathbf{r} = \mathbf{e}_J \times (\mathbf{r}_J^* - \mathbf{R}_J)\,.$$

Неспостережуваний підпростір трансформованого рівняння (1) відносно $\Delta\mathbf{r}$ збігається з напрямком лінії візування $\mathbf{e}_J$. Неспостережуваний підпростір рівняння (3) є площиною, перпендикулярною до $\mathbf{r}^\circ$. Якщо вектори $\mathbf{e}_J$ і $\mathbf{r}^\circ$ не є взаємно ортогональними, то вектор $\Delta\mathbf{r}$ не може одночасно належати обом неспостережуваним підпросторам, і отже, формально він цілком спостережуваний за вимірюваннями (1), (3). Ситуація повної спостережності безсумнівно має місце, якщо об'єкт прив'язки лежить у межах відносно вузького поля зору камери.

Для розв'язування рівнянь координатної прив'язки використовуємо формули розмитого спостерігача стану, подібно до того, як це зроблено в роботі [6] стосовно задачі польотного геометричного калібрування.

Нехай оцінку невідомого вектора $\mathbf{x} \in R^m$ (далі для визначеності $m = 3$) було отримано як результат n-го кроку рекурентної процедури у вигляді вектора $\mathbf{x}^{(n)}$. Результат наступного кроку шукається у вигляді

$$\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{x}^{(n)} + \Delta\mathbf{x}^{(n+1)},$$

де $\Delta\mathbf{x}^{(n+1)}$ — вектор уточнювального приросту оцінки. Для його обчислення формується скалярне рівняння виду $\mathbf{h}^{\mathrm{T}}\Delta\mathbf{x}^{(n+1)} = z$, де $\mathbf{h} \in R^m$, z — скаляр (не плутати з координатою в базисі $\mathbf{J}$). При дотриманні відповідних умов спостережності оцінка вектора $\Delta\mathbf{x}^{(n+1)}$ виходить як результат операцій

$$\mathbf{K}_c = \frac{P^{-}\mathbf{h}}{\alpha + \mathbf{h}^T P^{-}\mathbf{h}},$$

$$\gamma_i^2 = \frac{w_i z^2}{\beta + \mathbf{h}^T P^{-}\mathbf{h}}, \; i = 1, 2, 3, \qquad (4)$$

$$G = \mathrm{diag}\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\},$$

$$P^{+} = \Gamma(P^{-} - \mathbf{K}_c \mathbf{h}^T P^{-})\Gamma,$$

$$\Delta\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{K}_c z,$$

де α, β, w_i — додатні параметри, які можуть бути різними для різних рівнянь і різних кроків рекурентного рахунку, P^{-} — (3×3)-матриця, відома на початку $(n+1)$-го кроку, P^{+} — (3×3)-матриця, обчислена на черговому кроці, $\mathbf{K}_c \in R^3$ — векторний коефіцієнт спостерігача для конкретного скалярного рівняння на черговому кроці. Параметри α, β, w_i та початкове значення P^{-} уточнюються шляхом попереднього налаштування спостерігача — багаторазового тестування з варіюванням умов прив'язки в діапазоні останніх, характерному для практичної реалізації. Якщо, як це має місце у розглянутій задачі, $\mathbf{x} = \mathrm{const}$, етап прогнозу, звичайний для такого роду алгоритмів оцінювання, замінюється операцією пересилання $P^{-} = P^{+}$ після виконання розрахунків (4). Взагалі спостерігач (4) призначається для поліпшення збіжності оцінок стану за лінеаризованими рівняннями вимірювань. У даному випадку це рівняння (3). Застосування спостерігача (4) для обробки кожного з чотирьох скалярних рівнянь системи (1), (3) має підвищити точність і поліпшити збіжність оцінок в задачі координатної прив'язки.

При комп'ютерному моделюванні формул (1), (3) (далі — алгоритму (1)+(3)) відтворювався рух КА по сонячно-синхронній орбіті заввишки 670 км, близькій до кругової. Вводилися значення $a = 6378137$ м, $b = 6356752$ м. Це елементи системи параметрів Землі WGS 84. Задавалося розташування «невідомих» точкових наземних об'єктів на ділянках B і C, що мають форму квадрата зі стороною 5 км і зміщені під час зйомок щодо траси на відстані 100 і 300 км відповідно. Зйомка кожної ділянки здійснювалася, коли вона опинялася у полі зору камери. Як і в роботі [4], на кожній з ділянок 16 об'єктів прив'язки лежать у вузлах рівномірної квадратної сітки, обмеженої периметром ділянки. Таким чином, кожна з координат об'єктів однієї ділянки в земному базисі утворює (4×4)-матрицю. Цей прийом не означає, що насправді передбачено такий набір об'єктів, він має на меті скоротити обсяг розрахунків для виявлення досліджуваних ефектів. Об'єкти пронумеровано як прийнято у мові програмування Фортран: зверху вниз в кожному стовпці згаданої матриці з безперервним продовженням нумерації в наступному стовпці. При зйомках кожної ділянки оптична вісь камери наводилася на околиці відповідного об'єкта № 7, що лежить на перетині другого стовпця і третього рядка матриці координат. Помилка наведення — випадкова величина, рівномірно розподілена у межах ± 1200 м. Помилки зоряного давача вводилися як нормально розподілені випадкові кути поворотів навколо двох напрямків, перпендикулярних до оптичної осі давача, і навколо самої цієї осі з середніми квадратичними відхиленнями відповідно 1″, 1″ і 20″. Це орієнтовні характеристики перспективного зоряного давача БОКЗ-МД-02; вони приймаються для зниження фону, на якому виявляються помилки алгоритму прив'язки. Розмір пікселя камери 9 мкм. Середнє квадратичне відхилення нормально розподілених випадкових помилок GPS дорівнює 3 м. Моделюванню процесу координатної прив'язки передувало польотне геометричне калібрування системи «камера і зоряний давач». Після закінчення калібрування залишкові помилки визначення орієнтації камери відносно зоряного давача в базисі K мали середні квадратичні відхилення 1″, 1″ (помилки напрямку оптичної осі) і 56″ (помилка у площині чутливої площадки). Слід враховувати, що при відносно близькому розташуванні об'єкта прив'язки до точки перетину оптичної осі камери з земною поверхнею вплив навіть дуже великої третьої помилки калібрування незначний порівняно із впливом малих значень двох перших помилок.

Моделювання при конкретному наборі умов і реалізації випадкових помилок виконувалося серіями по 100 варіантів у кожній. Зокрема, у кожному варіанті для всіх 16 об'єктів-маркерів кожної ділянки вводилися взаємно незалежні початкові помилки завдання координат, нормально розподілені з середніми квадратичними відхиленнями 100 км. Мотивування настільки, взагалі кажучи, перебільшених умов було пояснене вище, хоча слід рахуватися з можливістю їхньої реалізації на практиці. У різних серіях єдиний знімок кожної ділянки виконувався при різних значеннях тангажу КА. За результатами конкретної серії розраховувалися у метрах характеристики M_X, M_Y, M_Z — оцінки математичних очікувань помилок обчислення координат об'єктів у земному базисі **J** — та σ_X, σ_Y, σ_Z — оцінки середніх квадратичних відхилень тих же помилок.

Розрахунки за алгоритмом (1)+(3) виконувалися за циклічною схемою. Після кожної оцінки значення $\mathbf{r}_J$ для конкретного маркера воно вводилося як початкова умова для уточнення в наступному циклі. Моделювання показало повільну, але надійну збіжність оцінок, що вимагає декількох тисяч циклів для досягнення прийнятної точності прив'язки. Для стаціонарного комп'ютера це необтяжливо. Повільна збіжність шуканої оцінки пояснюється істотними помилками, які вносяться при лінеаризації рівняння (2).

В табл. 1 показано характеристики точності прив'язки для маркера № 7 ділянки *B*, отримані при зйомці з кутом тангажу 25° для різних значень кількості L_S циклів у серії рахунку. Видно, як зі збільшенням L_S збільшується точність прив'язки, доходячи до насичення в нижніх рядках таблиці.

В табл. 2 приведено характеристики σ_X, σ_Y, σ_Z, отримані при моделюванні координатної прив'язки маркерів ділянок *B* та *C* при $L_S = 50000$ і зйомки з кутом тангажу 2.5°. Оскільки розміри ділянок *B* і *C* відносно невеликі, відмінності у точності прив'язки маркерів однієї ділянки незначні, хоча помітна теоретично обґрунтована тенденція до зниження точності прив'язки об'єктів, віддалених від точки № 7.

За показник швидкості збіжності оцінок в задачі прив'язки приймається різниця оцінок координат об'єкта x, y, z на черговому і попередньому циклах рахунку. В табл. 3 наведено такі показники $\nu_{X,7}$, $\nu_{Y,7}$, $\nu_{Z,7}$ для об'єкта № 7 ділянки *B*, отримані в одному з варіантів рахунку, і аналогічні показники $\nu_{X,16}$, $\nu_{Y,16}$, $\nu_{Z,16}$ для об'єкта № 16 тієї ж ділянки для різної кількості циклів L_S. Видно, як швидко уточнюються оцінки на

Таблиця 1. **Характеристики точності прив'язки, ділянка *B*, маркер 7**

L_S	M_X, м	M_Y, м	M_Z, м	σ_X, м	σ_Y, м	σ_Z, м
5	–346	849	–996	2473	6072	7124
50	47.1	27.3	43.9	453	258	413
500	0.6	0.5	1.5	126	8.8	130
5000	0.1	–0.5	1.0	6.0	5.9	8.5
50000	–0.2	0.5	1.2	3.0	6.5	6.9

Таблиця 2. **Помилки прив'язки маркерів на ділянках *B* і *C***

Ділянка	σ_X, м	σ_Y, м	σ_Z, м
B	9.7 8.8 7.1 6.7 7.6 6.8 6.4 6.5 6.6 7.3 8.4 9.1 8.0 8.3 10.6 11.4	2.7 2.9 3.0 3.0 2.9 2.4 2.2 2.8 3.6 2.9 2.6 2.5 3.5 3.1 3.0 2.2	7.5 6.3 7.3 8.9 8.1 6.8 6.7 8.2 10.1 8.1 6.1 7.0 11.2 9.1 6.4 6.3
C	4.9 4.3 3.6 3.5 3.7 3.6 3.2 3.3 3.3 3.8 4.6 5.0 4.1 4.7 5.8 6.4	7.8 6.0 5.7 8.1 7.7 5.7 6.2 7.8 7.1 5.5 6.9 8.5 6.8 5.2 6.6 9.3	5.7 6.1 7.2 7.7 5.3 5.4 5.8 6.0 7.4 7.2 6.2 5.9 9.7 9.0 8.0 7.5

Таблиця 3. **Показники швидкості збіжності оцінок**

L_S	$\nu_{X,7}$, м	$\nu_{Y,7}$, м	$\nu_{Z,7}$, м	$\nu_{X,16}$, м	$\nu_{Y,16}$, м	$\nu_{Z,16}$, м
1	$8.5 \cdot 10^3$	$-2.2 \cdot 10^4$	$-7.6 \cdot 10^4$	$-5.6 \cdot 10^4$	$-1.5 \cdot 10^4$	$-5.1 \cdot 10^3$
5	−52	93	−50	−130	240	−120
50	−0.45	0.80	−0.43	−1.2	2.2	−1.2
500	$-4.4 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$-4.2 \cdot 10^{-3}$	$-1.2 \cdot 10^{-2}$	$2.2 \cdot 10^{-2}$	$-1.2 \cdot 10^{-2}$
5000	$-4.4 \cdot 10^{-5}$	$7.8 \cdot 10^{-5}$	$-4.2 \cdot 10^{-5}$	$-1.2 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-4}$	$-1.2 \cdot 10^{-4}$
50000	$-4.4 \cdot 10^{-7}$	$7.8 \cdot 10^{-7}$	$-4.2 \cdot 10^{-7}$	$-1.2 \cdot 10^{-6}$	$2.2 \cdot 10^{-6}$	$-1.2 \cdot 10^{-6}$

Таблиця 4. **Залежність точності прив'язки від точності вихідних даних**

L_S	S_G, км	M_X, м	M_Y, м	M_Z, м	σ_X, м	σ_Y, м	σ_Z, м
5	1	−84.8	151.1	−80.4	393.5	702.1	375.1
	10	−712.5	1271	−681	2769	4941	2649
	100	−223.3	398.8	−213	3208	5724	3067
5000	1	−17.4	30.8	−16.2	77.6	136.2	72.7
	10	−2.8	4.5	−2.1	29.2	48.3	26.7
	100	−0.3	0.1	0.2	9.4	9.1	9.0
500000	1	−0.4	0.4	0.1	7.3	2.9	8.1
	10	−0.3	0.3	0.2	7.3	2.7	8.1
	100	−0.3	0.1	0.1	7.3	2.7	8.1

перших циклах, і як точність оцінок досягає насичення зі збільшенням L_S.

Як випливає зі сказаного, діапазон початкової невизначеності $\Delta\mathbf{r}$, який допускає успішне застосування алгоритму (1)+(3), досить широкий. Для демонстрації залежності точності прив'язки від фактичного рівня точності вихідної апроксимації координат місцезнаходження об'єкта прив'язки виконувалося додаткове моделювання. Його результати для об'єкта № 7 ділянки *B* показано у табл. 4, де S_G — середнє квадратичне відхилення початкових значень координат вектора помилок $\Delta\mathbf{r}$. Правдоподібне пояснення кількісних співвідношень між помилками прив'язки при різних значеннях L_S і S_G полягає в тому, що при відносно малих значеннях S_G затухання згаданих помилок має коливальний характер, а при великих S_G — асимптотичний характер. З цим узгоджуються результати моделювання при проміжних значеннях L_S, не включених у табл. 4. Як і слід було очікувати, після закінчення перехідних процесів (у табл. 4 — при L_S = 500000) підсумкова точність координатної прив'язки практично не залежить від S_G.

Очевидно, рівняння (2) характеризує рівневу поверхню, але не реальний рельєф місцевості. Всупереч спрощеним міркуванням, якщо при зйомці лінія візування об'єкта-маркера строго вертикальна, але сам маркер лежить вище або нижче рівневої поверхні, в загальному випадку визначення геоцентричних координат на цій поверхні може виявитися неточним. Це не суперечить рівнянню (11) з роботи [1], яке аналітично зв'язує координати об'єкта на земній поверхні з елементами доступної інформації. Судячи з результатів моделювання з ідеальним поєднанням базисів камери і зоряного давача і безпомилковими показаннями чутливих елементів, піднесення маркера над рівневій поверхні на 100 м породжує помилку оцінювання широти приблизно в 3″. На місцевості цьому відповідають помилки позиціонування в десятки метрів.

З двох рівнянь у варіаціях, що відповідають нелінійному рівнянню (2), як видається, тільки рівняння (3) має правильний і збіжний розв'язок. З цим добре узгоджуються численні результати комп'ютерного моделювання, виконаного з варіюванням дислокації маркерів на поверхні земного еліпсоїда та реалізації випадкових збурень. Для контролю правильності оцінок придатні показники збіжності, подібні до приведених у табл. 3. Можна показати, принаймні при вертикальній лінії візування маркера, що рівняння (3) у тому вигляді, як воно записане, правильно оцінює вертикальну складову вектора помилки $\Delta\mathbf{r}$. Принаймні приєднання алгоритму (1)+(3) до методу, запропонованого в роботі [1], не зменшує надійності координатної прив'язки.

ЛІТЕРАТУРА

1. Лебедев Д. В. О географической привязке космических снимков. *Пробл. упр. и информ*. 2014. № 5. С. 71—79.
2. Лебедев Д. В. О привязке космических снимков по орбитальнам данным. *Пробл. упр. и информ*. 2016. № 6. С. 120—132.
3. Пятак И. А. Задачи координатной привязки снимков, выполненных КА. *Вісн. Дніпропетровського ун-ту. Сер. Ракетно-космічна техніка*. 2011. Вип. 14. С. 116—122.
4. Ткаченко А. И. О координатной привязке наземных объектов по космическим снимкам. *Космічна наука і технологія*. 2015. **21**, № 2. С. 65—72.
5. Ткаченко А. И. Два алгоритма привязки наземных объектов по космическим снимкам. *Космічна наука і технологія*. 2018. **24,** № 3. С. 69—74.
6. Ткаченко А. И. Усиленная сходимость оценок в полетной геометричской калибровке. *Космічна наука і технологія*. 2019. **25,** № 4. С 41—47.

Стаття надійшла до редакції 07.10.2019

REFERENCES

1. Lebedev D. V. (2014). On geographical coordinate determination of space images. *J. Automation and Inform. Sci.*, No. 5, 71—79 [in Russian].
2. Lebedev D. V. (2016). On the coordinate determination of space images by coordinate data. *J. Automation and Inform. Sci.*, No. 6, 120—132 [in Russian].
3. Piatak I. A. (2011). Problems of geo-referencing of the snapshots fulfilled by spacecraft. *Dniepropetrovsk university. Ser. The Rocket and Space Technics*, No. 14, 116—122 [in Russian].
4. Tkachenko A. I. (2015). On a geo-referencing of terrestrial objects using space snapshots. *Kosm. nauka tehnol.,* **21**, No. 2, 65—72 [in Russian].
5. Tkachenko A. I. (2018). Two algorithms for geo-referencing of the terrestrial objects using space snapshots. *Kosm. nauka tehnol.,* **24**, No. 3, 69—74 [in Russian].
6. Tkachenko A. I. (2019). Strenghtened convergence of estimations in the in-flight geometric calibration. *Kosm. nauka tehnol.*, **25**, No. 4, 41—47 [in Russian].

Received 07.10.2019

A. I. Tkachenko
Senior Researcher, Dr. Sci. in Techn.

International Research and Training Center for Information Technologies and Systems
of the National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine
40 Akademika Hlushkova Ave, Kyiv, 03187 Ukraine

A VERSION OF THE GEO-REFERENCING OF GROUND OBJECTS USING SINGLE SPACE SNAPSHOT

The problem of the positioning of unknown ground objects in a coordinate system related to the Earth (geo-referencing problem) is considered. The task was to use the single snapshot of the above-mentioned objects (markers) obtained with an onboard imaging camera of the spacecraft on the near-Earth orbit. The snapshot was transmitted to the ground-based services together with synchronous accompanying information for processing using the on-ground computer. The a priori accepted mathematical description of the Earth's shape was attracted. Imaging of markers for geo-referencing was preceded by in-flight calibration, which is to clarify the mutual attitude of the camera and the onboard star tracker in the body of the spacecraft. Unlike statements of the above-mentioned problem and its solutions in known publications, here we started from a highly rough approximation of unknown coordinates of geo-referenced objects with errors at the 100 km level. At this base, the nonlinear equation of the Earth's surface is replaced by a linearized equation to positioning errors of an unknown marker. The expression in the left part of this equation represents a projection of the vector of positioning errors onto the direction of the marker's geocentric radius-vector. The above-mentioned equation is solved together with the vector equation of errors composed on the base of the photogrammetric collinearity condition. The system of four scalar equations of errors is wittingly nonsingular if the marker's line of sight is non-orthogonal to the radius-vector of the marker.

Simplifications made during the linearization of the equation of Earth's shape essentially distort the estimation of the geo-referencing's parameters. To dilute this effect, the method of geo-referencing based on using the fuzzy state observer is proposed. The method is realized as a sequence of cyclic operations. In each cycle, a relatively small elementary part of the marker's positioning error is estimated using a fuzzy observer. The convergence of the estimation procedure makes it necessary to repeat up to thousands of elementary cycles to get acceptable accuracy of geo-referencing. This can be easily handled by computers in on-ground conditions.

Accurate and unambiguous estimation of three coordinates of a geo-referencing object is possible when it has a low height above the level surface.

Keywords: spacecraft, geo-referencing, star tracker, camera, fuzzy observer, equation of the Earth's surface, convergence of the estimations.