УДК 621.396.94

С.В. Ковбасюк, к.т.н., с.н.с.
Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова
Є.І. Махонін, нач. упр.
Національне космічне агентство України
М.Ю. Ракушев, ад'юнкт
Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ КОСМІЧНОГО АПАРАТА ЗА ІНФОРМАЦІЄЮ ОДНОГО ДОПЛЕРІВСЬКОГО ВИМІРЮВАЧА

Розглядається можливість визначення параметрів руху космічного апарата за інформацією одного доплерівського вимірювача методом диференціальних перетворень. Наведено результати математичного моделювання.

За останні десятиліття широкого використання практично у всіх галузях діяльності людства набули космічні системи різного призначення. Для вирішення завдань балістичного забезпечення польотів космічних апаратів (КА) потрібно проводити уточнення "застарілих" параметрів руху КА. Одним із підходів вирішення даного завдання є використання інформації виміру зсуву частоти Доплера системою, що складається з декількох наземних пунктів (НП), на одному прольоті КА або на одному НП при вимірюванні зсуву частоти Доплера на декількох послідовних прольотах КА. Зараз в Україні, внаслідок її малої територіальної протяжності, вимірювання проводяться за іншим варіантом. Необхідність використання декількох інформаційних вибірок зсуву частоти Доплера викликана тим, що задача проведення уточнення "застарілих" параметрів руху КА за однією такою інформаційною вибіркою є погано обумовленою, а використання декількох вибірок призводить до покращення її обумовленості. Теоретичні основи розв'язку такої задачі описані в [4], [5].

Однак важливим питанням для України стоїть необхідність підвищення оперативності вирішення завдання проведення уточнення "застарілих" параметрів руху КА, що може бути зроблено за однією інформаційною вибіркою зсуву частоти Доплера на одному НП при одному прольоті КА. Вирішення такого завдання значно підвищить ефективність використання вітчизняних космічних систем. Але його розв'язок з використанням відомих методів з [4], [5] внаслідок поганої обумовленості задачі є неможливим (виникає ефект числової нестійкості і задача уточнення "розходиться"). Таким чином, актуальною є задача розробки нового математичного забезпечення, яке б могло забезпечити оперативне уточнення параметрів КА при невисоких обчислювальних витратах та задовільних точнісних характеристиках.

Метою статті є розгляд можливості проведення уточнення параметрів руху КА за однією інформаційною вибіркою зсуву частоти Доплера, що знімається на одному НП, на одному прольоті КА новим операційним методом – методом диференціальних перетворень.

Поставлена задача розв'язується наступним чином. При отриманні на часовому інтервалі спостереження $- \; T_\partial$ у фіксовані моменти часу $t_i \in T_\partial$ інформаційної вибірки доплерівської поправки частоти f_∂ можна з неї визначити радіальну швидкість V_r:

$$V_r = \frac{c}{2f_0} \cdot f_\partial ,$$

де c = 2,999*10^5 км/с – швидкість світла;

f_0 – несуча частота приймального сигналу.

Якщо застосувати до отриманої таким чином вибірки один із методів статистичної обробки, можна знайти поліном, який відображав би закон зміни радіальної швидкості в часі. Використовуючи метод найменших квадратів, реальну функціональну залежність $V_r(t)$ можна апроксимувати узагальненим поліномом вигляду [9]:

$$V_r^{мнк}(t) = \varphi^T(t) \cdot C , \qquad (1)$$

де $\varphi^T(t)$ – вектор довільних реальних гладких функцій;

$C = \left(\psi^T \psi\right)^{-1} \psi^T V_r$ – вектор коефіцієнтів апроксимуючої функції [8]:

де

$$\Psi = \begin{pmatrix} \varphi_1(t_1) & \varphi_2(t_1) & \cdots & \varphi_m(t_1) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_1(t_n) & \varphi_2(t_n) & \cdots & \varphi_m(t_n) \end{pmatrix}, \ \overline{V}_r = \begin{pmatrix} V_{r_1} \\ \vdots \\ V_{r_n} \end{pmatrix}.$$

Співвідношення (1) однозначно описує рух КА та є законом, що відображає зміну радіальної швидкості КА у часі, яка розраховується за вибіркою f_∂ і несе в собі повну інформацію про реальні параметри руху КА [2].

Для того, щоб провести уточнення параметрів руху КА, їх потрібно якимось чином пов'язати з визначеним законом зміни радіальної швидкості (1). Скористаємось для цього новим операційним методом, розробленим академіком НАН України Пуховим Г.Є., – методом диференціальних перетворень.

Диференціальні перетворення – це новий операційний метод, який оснований на переведенні оригіналів в область зображень, на відміну від відомих інтегральних перетворень Лапласа і Фур'є, за допомогою операції диференціювання, що призводить до значного спрощення процедури проведення математичного моделювання.

У найпростішому випадку диференціальні перетворення називаються диференціально-тейлорівськими перетвореннями (ДТ-перетвореннями), оскільки вони основані на представленні аналізованої функції рядом Тейлора [6], [7]:

$$Z(K) = P\{z(t)\}_{t^*} = \frac{H^K}{K!}\left[\frac{d^K z(t)}{dt^K}\right]_{t^*}; \tag{2}$$

$$z(t) = P^{-1}\{Z(K)\} = \sum_{K=0}^{\infty}\left(\frac{t-t^*}{H}\right)^K Z(K), \tag{3}$$

де t^* – момент часу, в якому проводиться перетворення;

$Z(K)$ – дискретна функція цілочислового аргумента $K = 0,1,2,3...$;

H – відрізок аргумента, на якому розглядається функція $z(t)$.

Вираз (2) визначає пряме перетворення, яке дозволяє за оригіналом $z(t)$ знайти зображення $Z(K)$. Обернене перетворення, що відновлює оригінал $z(t)$ у вигляді ряду Тейлора, визначається виразом (3). Диференціальні зображення $Z(K)$ прийнято називати диференціальним спектром або Р-спектром, а значення функції $Z(K)$ при конкретних значеннях аргумента K – дискретами диференціального спектра. Застосовувати такий підхід можна тільки на інтервалах зміни аргумента, що не перевищує радіус збіжності ряду Тейлора.

У ході проведення моделювання в оберненому перетворенні (3) беруть не весь нескінченний ряд, а тільки його відрізок, причому кількість членів обирається, виходячи із забезпечення точності, що необхідна для розв'язку задачі.

Задамо траєкторію руху КА через векторне диференціальне рівняння незбуреного руху КА в інерціальній геоцентричній прямокутній системі координат (ІСК):

$$\ddot{\vec{r}}(t) + \mu_3 \frac{\vec{r}(t)}{r^3(t)} = 0, \tag{4}$$

де $\mu_3 = 3{,}986 \cdot 10^5$ км^3/с^2 – гравітаційний параметр Землі;

$\vec{r}(t)$ – радіус-вектор КА.

Рівняння (4) – це система трьох диференціальних рівнянь другого порядку, для розв'язку якої слід задатися початковим значенням шести змінних, у нашому випадку – шести параметрів руху КА. Уточнення цих параметрів руху проводитимемо в точці траверзу – точці орбіти КА, в якій радіальна швидкість супутника дорівнює нулю. Параметри, що підлягають визначенню, запишемо у вигляді невідомого вектора з координат радіус-вектора та швидкості КА в ІСК і для зручності подальших математичних викладок введемо ще один параметр – значення модуля радіус-вектора КА**:**

$$X_T = X_T(a_i) = \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & V_x = x_1 & V_y = y_1 & V_z = z_1 & r_{\kappa a} \end{pmatrix},$$

де a_i – узагальнений параметр руху КА.

Початкове наближення параметрів, що підлягають уточненню (“застарілі” параметри руху КА), подамо у вигляді:

$$X_{T0} = (x_{00} \quad y_{00} \quad z_{00} \quad x_{10} \quad y_{10} \quad z_{10} \quad r_0).$$

Далі розглядатимемо КА тільки з коловими орбітами. Для такого випадку виконуються такі співвідношення [1] (для зручності запишемо їх у векторно-матричній формі):

$$f(X_T)=\begin{pmatrix} x_0^2+y_0^2+z_0^2-r_{ka}^2 \\ x_1^2+y_1^2+z_1^2-V_{ka}^2 \\ x_0x_1+y_0y_1+z_0z_1 \end{pmatrix}=0\,, \tag{5}$$

де $V_{ka}=\sqrt{\dfrac{\mu_3}{r_{ka}}}$ – швидкість КА в ІСК.

Визначимо з (4) Р-спектр руху КА в ІСК, використовуючи методики пошуку диференціальних зображень складних нелінійних залежностей [6], [7]:

$$P\left\{\ddot{\vec r}(t)+\mu_3\frac{\vec r(t)}{r^3(t)}=0\right\}\Rightarrow$$

$$\Rightarrow\begin{cases} X(0)=x_0,\; Y(0)=y_0,\; Z(0)=z_0 \\ X(1)=x_1H,\; Y(1)=y_1H,\; Z(1)=z_1H \\ X(K+2)=-\mu_3\dfrac{H^2}{(K+1)(K+2)}\cdot\dfrac{X(K)}{r^3} \\ Y(K+2)=-\mu_3\dfrac{H^2}{(K+1)(K+2)}\cdot\dfrac{Y(K)}{r^3} \\ Z(K+2)=-\mu_3\dfrac{H^2}{(K+1)(K+2)}\cdot\dfrac{Z(K)}{r^3} \end{cases}, \tag{6}$$

де $X(K), Y(K), Z(K)$ – диференціальний спектр руху КА по кожній з координат в ІСК.

Проведемо перерахунок координат КА із ІСК в гринвіцьку прямокутну систему координат (ГСК) за допомогою співвідношення (7) та перерахунок з ГСК в топоцентричну прямокутну систему координат (ТСК) [1] за допомогою співвідношення (8):

$$\begin{aligned} &r_g=\Phi^{-1}\cdot r_{ka}\,, \\ &\Phi^{-1}=\begin{bmatrix} \cos(S) & \sin(S) & 0 \\ -\sin(S) & \cos(S) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ &S=q\Omega_3 t+S_0\,, \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} &r_p=\Lambda\cdot\left(r_g-r_{g0}\right), \\ &\Lambda=\begin{pmatrix} -\sin(\varphi_0)\cos(\lambda_0) & -\sin(\varphi_0)\sin(\lambda_0) & \cos(\varphi_0) \\ \cos(\varphi_0)\cos(\lambda_0) & \cos(\varphi_0)\sin(\lambda_0) & \sin(\varphi_0) \\ -\sin(\lambda_0) & \cos(\lambda_0) & 0 \end{pmatrix}, \\ &r_{g0}^T=\left(x_{g0}\quad y_{g0}\quad z_{g0}\right), \\ &x_{g0}=(h_{нп}+R_3)\cos(\varphi_0)\cos(\lambda_0), \\ &y_{g0}=(h_{нп}+R_3)\cos(\varphi_0)\sin(\lambda_0), \\ &z_{g0}=(h_{нп}+R_3)\sin(\varphi_0), \end{aligned} \tag{8}$$

де r_g, r_{ka} – вектори-стовпці координат радіус-вектора КА в ГСК та ІСК відповідно;

Φ^{-1} – матриця перерахунку з ІСК в ГСК;

Ω_3 = 0.7292115·10^{-4} рад/с – кутова швидкість обертання Землі навколо власної осі;

q = 1.0027379 – множник для переходу від середньосонячного часу до зоряного;

S – зоряний час;

S_0 – зоряний час в середню гринвіцьку північ;

φ_0, λ_0 – широта та довгота НП;

$h_{нп}$ – висота НП над рівнем моря;

R_3 = 6371 км – радіус Землі.

В області зображень перерахунок (7) матиме вигляд:

$$\begin{cases} X_g(K) = \underline{\underline{\cos}}\left[S(K)\right] * X(K) + \underline{\underline{\sin}}\left[S(K)\right] * Y(K) \\ Y_g(K) = -\underline{\underline{\sin}}\left[S(K)\right] * X(K) + \underline{\underline{\cos}}\left[S(K)\right] * Y(K) \\ Z_g(K) = Z(K) \\ \underline{\underline{\sin}}\left[S(K+1)\right] = \sum_{l=0}^{K}\left(\frac{l+1}{K+1}S(l+1)\underline{\underline{\cos}}\left[S(K-l)\right]\right), \\ \underline{\underline{\cos}}\left[S(K+1)\right] = -\sum_{l=0}^{K}\left(\frac{l+1}{K+1}S(l+1)\underline{\underline{\sin}}\left[S(K-l)\right]\right) \\ S(K) = q\Omega_3ъ(K+1) + S_0ъ(K) \end{cases} \tag{9}$$

а перерахунок (8) – такий:

$$\begin{aligned} X_p(K) &= -\sin(\varphi_0)\cos(\lambda_0)\left(X_g(K) - x_{g0}ъ(K)\right) - \\ &\quad - \sin(\varphi_0)\sin(\lambda_0)\left(Y_g(K) - y_{g0}ъ(K)\right) + \\ &\quad + \cos(\varphi_0)\left(Z_g(K) - z_{g0}ъ(K)\right), \\ Y_p(K) &= \cos(\varphi_0)\cos(\lambda_0)\left(X_g(K) - x_{g0}ъ(K)\right) + \\ &\quad + \cos(\varphi_0)\sin(\lambda_0)\left(Y_g(K) - y_{g0}ъ(K)\right) + \\ &\quad + \sin(\varphi_0)\left(Z_g(K) - z_{g0}ъ(K)\right), \\ Z_p(K) &= -\sin(\lambda_0)\left(X_g(K) - x_{g0}ъ(K)\right) + \cos(\lambda_0)\left(Y_g(K) - y_{g0}ъ(K)\right), \end{aligned} \tag{10}$$

де $ъ(K-m) = \begin{cases} 1, \text{ при } K = m \\ 0, \text{ при } K \neq m \end{cases}$ – тейлорівська одиниця або “теда”;

$*$ – позначає операцію алгебраїчної згортки, наприклад:

$$P\{s(t)\cdot u(t)\} = S(K) * U(K) = \sum_{l=0}^{K} S(l)\cdot U(K-l).$$

За допомогою вищевикладених математичних залежностей (4, 7, 8) задається траєкторія руху КА в ТСК. Визначити з неї закон зміни радіальної швидкості можна за допомогою таких співвідношень:

$$\begin{aligned} d^2(t) &= x_p^2(t) + y_p^2(t) + z_p^2(t), \\ d(t) &= \sqrt{d^2(t)}, \\ V_r(t) &= \frac{d}{dt}\left[d(t)\right], \end{aligned} \tag{11}$$

де $d(t)$ – дальність від НП до КА.

Для того, щоб визначити Р-спектр радіальної швидкості КА з врахуванням (6, 9, 10) та (11), скористаємось співвідношеннями:

$$P\left\{d^2(t)\right\} = D_2(K) = X_p(K) * X_p(K) + Y_p(K) * Y_p(K) + Z_p(K) * Z_p(K), \tag{12}$$

$$D(0) = \sqrt{D_2(0)},$$

$$D(K) = \frac{D_2(K) - \sum_{l=1}^{K-1} D(K-l)D(l)}{2D(0)}.$$

$$P\{\ V_r(t)\} = V_r(K) = \frac{K+1}{H}D(K+1).$$

Проведемо відновлення радіальної швидкості як функції часу та невідомих параметрів руху КА з її Р-спектра $V_r(K)$:

$$V_r(X_T, t) = P^{-1}\left\{V_r(K)\right\}. \tag{13}$$

Далі з врахуванням методу найменших квадратів запишемо цільову функцію:

$$I(X_T) = \int_{T_д}\left(V_r^{МНК}(t) - V_r(X_T, t)\right)^2 dt, \tag{14}$$

яка є інтегралом квадрата нев’язки апроксимуючого узагальненого полінома (1) та відновленої функції радіальної швидкості КА на часовому інтервалі спостереження $T_д$.

Завдання визначення параметрів руху КА зводиться до пошуку такого X_T^*, щоб мінімізувати (14) за умов (5), тобто:

$$X_T^* = \arg\left[\min\left\{I(X_T)\right\}\right], \text{ при умові, що } f(X_T) = 0. \tag{15}$$

Задача (15) – це типова задача нелінійного програмування: пошуку мінімуму цільової функції $I(X_T)$ з нелінійними обмеженнями у вигляді рівностей. У літературі наведена велика кількість методів її розв'язку [8], ми застосуємо метод Лагранжа. Для цього запишемо функцію Лагранжа:

$$L(X_T) = I(X_T) + \lambda^T f(X_T), \qquad (16)$$

де $\lambda^T = \begin{pmatrix}\lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3\end{pmatrix}$ – вектор множників Лагранжа.

Метод оптимізації з функцією Лагранжа (16) зводить задачу умовної оптимізації (15) до безумовної:

$$X_T^* = \arg\left[\min\left\{L(X_T)\right\}\right]. \qquad (17)$$

Слід підкреслити, що введені умови (5) значно спрощують математичні викладки при розрахунку Р-спектра та одночасно обчислювальну складність задачі (17).

При такому підході виникає складність, яка полягає в тому, що під час розв'язання потрібно розраховувати частинні похідні такого вигляду:

$$\frac{\partial}{\partial a_i}\left[L(X_T)\right] = \frac{\partial}{\partial a_i}\left[I(X_T)\right] + \lambda^T \frac{\partial}{\partial a_i}\left[f(X_T)\right]. \qquad (18)$$

Розпишемо окремо перший додаток:

$$\frac{\partial}{\partial a_i}\left[I(X_T)\right] = \frac{\partial}{\partial a_i}\left[\int_{T_o}\left(V_r^{МНК}(t) - V_r(X_T,t)\right)^2 dt\right] =$$

$$= -2\int_{T_o}\left[\left(V_r^{МНК}(t) - V_r(X_T,t)\right)\frac{\partial}{\partial a_i}\left[V_r(X_T,t)\right]\right]dt.$$

Виявляється, що для проведення розрахунків з необхідною точністю потрібно проводити визначення 19 дискрет Р-спектра, оскільки тільки тоді відновлений ряд Тейлора апроксимує функцію зміни радіальної швидкості з необхідною точністю. Але вирази як для $V_r(X_T,t)$, так і для $\frac{\partial}{\partial a_i}\left[V_r(X_T,t)\right]$ виявляються дуже громіздкими і непридатними для використання. Тому для подальшого розгляду введемо багатомірні ДТ-перетворення, що полягають у поданні функції декількох змінних багатомірним рядом Тейлора [6].

У нашому випадку слід проводити визначення тільки першої частинної похідної, тому достатньо скористатись багатомірними ДТ-перетвореннями для функції двох змінних або двомірними ДТ-перетвореннями.

Двомірні ДТ-перетворення для траєкторії руху КА за часом та кожним з параметрів руху a_i матимуть вигляд:

$$Z_i(K,K_i) = P\left\{z_i(t,a_i)\right\}_{t^*,a_i^*} = \frac{H^K H_1^{K_i}}{K!K_i!}\left[\frac{\partial^{K+K_i} z_i(t,a_i)}{\partial t^K \partial a_i^{K_i}}\right]_{t^*,a_i^*}, \qquad (19)$$

$$z_i(t,a_i) = P^{-1}\left\{Z_i(K,K_i)\right\} = \sum_{S=K+K_i=0}^{S=\infty}\left(\frac{t-t^*}{H}\right)^K \left(\frac{a_i - a_i^*}{H_i}\right)^{K_i} Z_i(K,K_i). \qquad (20)$$

З використанням (20, 21) розрахунок (18) буде менш громіздким за рахунок того, що такий підхід дозволить провести їх визначення в числовому вигляді (як систему рекурентних рівнянь). Раніше провести розрахунок в числовій формі заважав такий факт: якщо визначити таким чином лагранжіан (16), то далі неможливо взяти точно (не беручи на розгляд наближені числові методики) частинну похідну від нього за будь-яким параметром руху.

З використанням вищевикладеного наведемо порядок розрахунку (18), спираючись на властивості багатомірних ДТ-перетворень [6], з врахуванням результатів, які отримані за допомогою одномірних ДТ-перетворень (6, 9, 10, 12):

$$D_{2i}(K,0) = D_{2i}(K), \quad D_i(K,0) = D_i(K), \quad V_{ri}(K,0) = V_{ri}(K),$$

$$D_{2i}(K,K_i) = \frac{\partial^{K_i} D_{2i}(K,K_i)}{\partial a_i},$$

$$D_i(K,K_i) = \left(D_{2i}(K,K_i) - \sum_{l=1}^{l=K-1}\sum_{m=0}^{m=K_i}\left(D_i(K-l,K_i-m)D_i(l,m)\right) - \right. \qquad (21)$$

$$\left. -2\sum_{m=0}^{m=K_i-1}\left(D_i(0,K_i-m)D_i(K,m)\right)\right) \Big/ D_i(0,0).$$

Під час проведення всіх розрахунків K_i набуває тільки два значення 0 та 1.

З використанням залежностей (21) проведемо розв'язок (17). Слід зазначити, що з погляду кількості обчислювальних витрат цей розв'язок досить громіздкий.

Результати математичного моделювання наведені в табл. 1, де X – точне значення параметрів руху КА; X_{0T}, "похибка" – початкове значення параметрів руху КА; X_T^*, "похибка" – розраховане значення параметрів руху КА. Для кращого представлення результатів (більшої наочності) окремо подані результати за модулем радіус-вектора КА та його швидкістю, причому за "похибку" взято відповідний модуль вектора різниці.

Таблиця 1

Параметри руху КА				
Точне значення X	Початкове значення		Розраховане значення	
	X_{0T}	Похибка	X_T^*	Похибка
x_0 = 3774,841 км	x_{00} = 3780,592 км	Δx_0 = - 5,751 км	x_0^* = 3778,367 км	Δx_0^* = -3,526 км
y_0 = -1538,034 км	y_{00} = -1533,034 км	Δy_0 = -5,0 км	y_0^* = -1533,034 км	Δy_0^* = -4,999 км
z_0 = 5924,146 км	z_{00} = 5922,385км	Δz_0 = 1,761 км	z_0^* = 5923,0801 км	Δz_0^* = 0,345 км
x_1 = -4,8166 км/с	x_{10} = -4,8157 км/с	$\Delta x_1 = 9\cdot10^{-4}$ км/с	x_1^* = -4,8166 км/с	$\Delta x_1^* = 10^{-5}$ км/с
y_1 = 3,9364 км/с	y_{10} = 3,9354 км/с	$\Delta y_1 = 10^{-3}$ км/с	y_1^* = 3,9362 км/с	$\Delta y_1^* = 2\cdot10^{-4}$ км/с
z_1 = 4,0911 км/с	z_{10} = 4,0928 км/с	$\Delta z_1 = -1{,}7\cdot10^{-3}$ км/с	z_1^* = 4,0909 км/с	$\Delta z_1^* = 3\cdot10^{-4}$ км/с
$r_{ка}$ = 7191 км	r_0 = 7191,5 км	Δr_0 = 7,8117 км	r_0^* = 7191,5 км	Δr_0^* = 6,1271 км
$V_{ка}$ = 7,445 км/с	V_0 = 7,445 км/с	$\Delta V_0 = 2{,}1\cdot10^{-3}$ км/с	V_0^* = 7,445 км/с	$\Delta V_0^* = 4\cdot10^{-4}$ км/с

Таким чином, результати проведеного математичного моделювання доводять можливість використання запропонованого підходу до розв'язання задачі оперативного уточнення параметрів руху КА на одному прольоті за рахунок використання математичного апарата диференціальних перетворень.

В якості подальших досліджень у цьому напрямку можна відмітити використання диференціальних перетворень нетейлорівського типу з метою зменшення обчислювальної складності проведення уточнення параметрів руху КА.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Абалакин В.К., и др. /* Под ред. Г.Н. Дубовина / Справочное руководство по небесной механике и астродинамике. Издание 2-е, доп. и перераб. – М.: Наука. Глав. ред. физ-мат. лит., 1976. – 864 с.
2. *Белавин О.В.* Основы радионавигации: Учебное пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Сов. радио, 1977. – 320 с. с ил.
3. *Водоп'ян С.В., Ковбасюк С.В., Ракушев М.Ю.* Методика планування сеансів управління і зв'язку космічного апарата з наземним пунктом // Вісник ЖІТІ. – 2002. – № 2 (21) / Технічні науки. – С. 65–68.
4. *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений.– М.: Сов. радио, 1978. – 384 с.

5. *Соловьев Г.М., Елкин В.М.* Уточняемые параметры орбиты и частные производные в задачах определения движения космического аппарата // Двойные технологии. – 2003. – № 1. – С. 2–8.
6. *Пухов Г.Е.* Дифференциальные преобразования и математическое моделирование физических процессов. – К.: Наукова думка, 1986. – 159 с.
7. *Пухов Г.Е.* Дифференциальные спектры и модели. – К.: Наукова думка, 1990. – 184 с.
8. Численные методы условной оптимизации. / Под ред. Ф.Гилл и У.Мюррэй. – М.: Мир. 1977. – 293 с.
9. *Шилов П.И.* Способ наименьших квадратов. – М: Геодезиздат, 1941. – 407 с.

КОВБАСЮК Сергій Валентинович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного відділу Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.
Наукові інтереси:
– наземні засоби космічної інфраструктури України.

МАХОНІН Євген Іванович – начальник управління Національного космічного агентства України.
Наукові інтереси:
– радіотехнічні комплекси та системи.

РАКУШЕВ Михайло Юрійович – ад'юнкт Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.
Наукові інтереси:
– балістичне забезпечення польотів космічних об'єктів.

Подано 10.07.2003

Ковбасюк С.В., Махонін Є.І., Ракушев М.Ю. Визначення параметрів руху космічного апарата за інформацією одного допплерівського вимірювача

Ковбасюк С.В., Махонин Є.И., Ракушев М.Ю. Определение параметров движения космического аппарата за информацией одного доплеривского измерения

Kovbasyuk S.V., Makhonin Ye.I., Rakushev M.U. The Parameters Definition of the Space Vehicle Movement According to One Doplerovsky Measuring Instrument.

УДК 621.396.94

Визначення параметрів руху космічного апарата за інформацією одного допплерівського вимірювача / С.В. Ковбасюк, Є.І. Махонін, М.Ю. Ракушев

Розглядається можливість визначення параметрів руху космічного апарата за інформацією одного допплерівського вимірювача методом диференціальних перетворень. Наведено результати математичного моделювання.

УДК 621.396.94

Определение параметров движения космического аппарата по информации одного доплеровского измерителя / Ковбасюк С.В., Махонин Є.И., Ракушев М.Ю.

Рассматривается возможность определения параметров движения космического аппарата по информации одного доплеровского измерителя методом дифференциальных преобразований. Представлены результаты математического моделирования.

УДК 621.396.94

The Parameters Definition of the Space Vehicle Movement According to One Doplerovsky Measuring Instrument / S.V. Kovbasyuk, Ye.I. Makhonin, M.U. Rakushev

The opportunity of the parameters definition of the space vehicle movement is considered according to one Doplerovsky measuring instrument by a method of the differential transformation. The Results of the mathematical modelling are submitted.