

І.Д. Варламов, к.т.н.

С.В. Водоп'ян, к.т.н.

А.А. Завада, к.т.н.

Житомирський військовий інститут радіоелектроніки ім. С.П. Корольова

АЛГОРИТМ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦІЛЬОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Розглядається задача уточнення параметрів руху космічних апаратів оптико-електронного спостереження з використанням цільової інформації. Пропонується алгоритм, за допомогою якого можна здійснювати автономну навігацію космічних апаратів. Особливістю алгоритму є застосування нелокального підходу до мінімізації цільової функції на основі методу Нелдера–Міда, що дозволяє розширити область збіжності алгоритму та отримувати більше корисної інформації про шуканий мінімум при малому об'ємі вимірювальної інформації.

Постановка проблеми у загальному вигляді. Однопунктна технологія управління обумовлює відносно низьку оперативність визначення параметрів руху космічних апаратів (КА) наземними засобами та необхідність прогнозу цих параметрів на значних інтервалах часу до наступного циклу їх уточнення. Просторові похибки оцінки положення КА оптико-електронного спостереження (ОЕС) на інтервалі прогнозу між вказаними циклами у проекції на земну поверхню можуть перевищувати розміри полів зору цільової апаратури, що не дозволяє зняти запланований район.

Вирішальну роль у механізмі створення похибки оцінки параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів, наряду з похибками самих вимірів, відіграють похибки моделі руху, які виникають через неточність опису зв'язків між вимірювальними величинами та оцінюваними параметрами. Ці похибки залежать від часового інтервалу між моментом вимірювання і моментом оцінювання параметрів руху КА. Даний часовий інтервал визначається технологічним циклом балістико-навігаційного забезпечення (БНЗ) управління КА й обумовлений накопиченням необхідного об'єму траєкторних вимірів для збіжності алгоритму оцінювання початкових умов руху супутника. Відповідно до штатного циклу БНЗ накопичення траєкторних вимірів проводиться на шести мірних витках. При меншому (скороченому, в порівнянні зі штатним) об'ємі вимірювальної інформації штатні методи оцінювання чи не дозволяють отримати рішення, чи точність оцінки може бути недостатньою для виконання цільової задачі КА ОЕС.

Для зйомки запланованого району спостереження з високим розрізненням необхідно проводити уточнення параметрів руху КА якомога ближче за часом до моменту зйомки, що дозволяє зменшити вплив похибок моделі руху КА. Одним зі шляхів підвищення оперативності уточнення параметрів руху КА є здійснення його автономної навігації, яка потребує залучення додаткової вимірювальної інформації.

Аналіз та постановка завдання. З аналізу літературних джерел встановлено, що більшість із запропонованих підходів підвищення точності навігації КА спрямовано на отримання траєкторних вимірів шляхом залучення додаткових засобів. Так широко відомі підходи, що засновані на використанні супутникових навігаційних систем, супутників ретрансляторів для передачі вимірювальної інформації при відсутності КА в зоні радіовидимості наземних засобів, організації псевдосупутникової навігації [1, 2]. Недоліками таких підходів є складність комплексної обробки вимірювальної інформації, отриманої різними засобами, значні фінансові витрати. Крім того, не завжди можливо використати інформацію супутникових радіонавігаційних систем з технічних або організаційних причин [1–3].

Головне протиріччя при підвищенні точності навігації КА в умовах однопунктної технології управління полягає в необхідності скорочення часового інтервалу прогнозування для забезпечення необхідної точності балістичних розрахунків, з одного боку, та збільшенні часу накопичення необхідного об'єму траєкторних вимірів (часового інтервалу прогнозування) для забезпечення збіжності крайової задачі – з іншого.

Одним зі шляхів підвищення точності навігації КА при неможливості використання інформації супутникових навігаційних систем є здійснення автономної навігації КА ОЕС з використанням цільової інформації (оптичних траєкторних вимірів). Як виміри поточних навігаційних параметрів розглядаються координати прив'язки отриманих знімків до еталонної карти оптичного поля. Однак такий спосіб навігації істотно обмежує об'єм траєкторних вимірів, що пов'язано з просторово-часовою нестаціонарністю оптичних полів та обмеженістю районів земної поверхні, що придатні для ефективного розв'язання кореляційно-екстремальної задачі за прив'язкою отриманих знімків.

Таким чином, для здійснення автономної навігації КА ОЕС з використанням цільової інформації постає питання розробки алгоритму визначення параметрів руху КА за скороченим об'ємом траєкторних вимірів.

Виклад основного матеріалу. Структурно алгоритм визначення параметрів руху КА з використанням цільової інформації зображений на рис. 1.

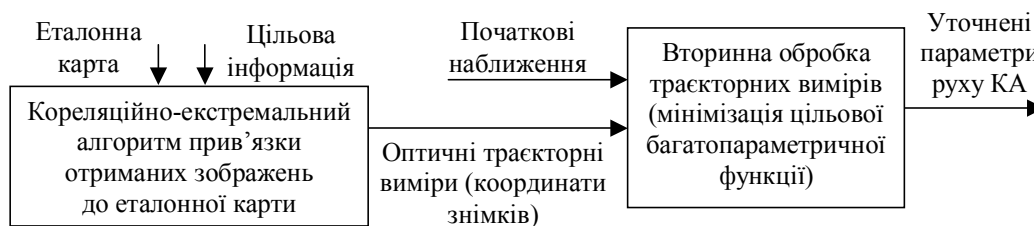


Рис. 1. Схема визначення параметрів руху КА

Для вирішення задачі прив'язки зображень до еталонної карти застосовують кореляційно-екстремальні методи [4], які базуються на спектральному аналізі та на моделях просторового розподілу інтенсивності навігаційного поля. Однак в багатьох випадках, в особливості під час обробки полів, що містять довгі об'єкти, другий підхід дає кращі результати, у порівнянні з багатомірним спектральним аналізом [4, 5].

Розглянемо прив'язку отриманого зображення (розміром $N \times N$) до еталонного поля у двовимірному (розміром $M \times M$) та трьохвимірному (розміром $M \times M \times M$) випадках. Розмір зображення значно менше розміру еталонної моделі.

Пристрій вимірювання навігаційного поля жорстко закріплений на КА, що здійснює два види керованого руху: поступальний – центра мас та обертальний – відносно центра мас.

Крім того, на платформу діють збурюючі фактори, що призводять до зсуву платформи як за кутівими $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, так і за лінійними Δx , Δy , Δz координатами, в наслідок чого виникає відхилення поточного положення платформи від прогнозованого.

Необхідно визначити оцінку величин Δx , Δy (для поверхневого поля) и Δx , Δy , Δz (для просторового), які характеризують зсув поточного зображення відносно еталону (рис. 2), що дозволяє оцінити положення КА на орбіті.

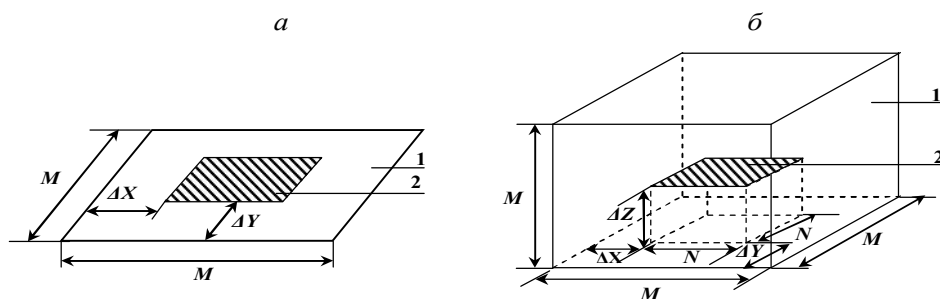


Рис. 2. Ілюстрація прив'язки еталонного та виміряного навігаційних полів:
 а – двовимірний зсув; б – трьохвимірний зсув;
 1 – еталонна модель поля; 2 – поточний вимір навігаційного поля

Розв'язання кореляційно-екстремальної задачі на борту КА є достатньо складним як з алгоритмічної, так і з технічної точок зору. Слід також зазначити, що на земній кулі існує не так багато районів, над якими прозорість атмосфери не гірше 2 балів, що відповідає умовам проведення якісної зйомки земної поверхні [5]. Таким чином, враховуючи швидкості руху КА та просторово-часову нестационарність оптичного поля, можливо отримувати достатньо обмежений об'єм вимірювальної інформації.

Результати проведеного аналізу штатного алгоритму оцінки параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів та практика БНЗ управління супутниками “Січ-1”, “Океан-О”, “АУОС-СМ-КФ” показали, що при скороченому об'ємі траєкторних вимірів та значних відхиленнях початкових наближень штатний алгоритм не забезпечує потрібної точності оцінки параметрів руху або взагалі не дозволяє отримати рішення через погану обумовленість задачі оцінювання.

Відповідно до принципу найменших квадратів оцінки параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів визначаються з умови:

$$F(\bar{q}) = \sum_{i=1}^n (d_i(t) - \tilde{d}_i(\bar{q}, t))^2 \Rightarrow \min, \quad (1)$$

де $\bar{q} = \{x, y, z, \sqrt{x}, \sqrt{y}, \sqrt{z}\}$ – вектор початкових умов руху КА в гринвіцькій системі координат; $d_i(t)$ – траєкторний вимір, отриманий у момент часу t_i ; $\tilde{d}_i(\bar{q}, t)$ – розрахункове значення траєкторного виміру, отримане за допомогою прогнозування руху КА з використанням моделі руху КА.

Найбільш загальними методами мінімізації виразу (1) є методи перебору значень аргументів та градієнтні методи.

Для мінімізації цільової багатопараметричної функції (1) в штатному алгоритмі використовується градієнтний метод Ньютона, який спирається на локальні (в околицях поточної точки) лінійні моделі цільової функції. Перевагами методу Ньютона є відносно проста обчислювальна схема та квадратична збіжність в області рішення. Недоліки методу Ньютона: лінеаризація цільової функції, яка обумовлює додаткові похибки оцінювання параметрів руху КА; локальність підходу обумовлює критичність методу до точності початкового наближення, що не дозволяє ефективно використовувати штатний алгоритм при значних відхиленнях розрахункових параметрів орбіти від дійсних. Для відносно непродуктивних електронно-обчислювальних машин (ЕОМ), на які розраховувались штатні алгоритми БНЗ, та при невисоких вимогах до точності результатів оцінювання \bar{q} переваги методу Ньютона мають вирішальне значення. Враховуючи зростання продуктивності сучасних ЕОМ, а також зростання вимог щодо точності вирішення задач БНЗ для КА ОЕС, необхідно використовувати методи мінімізації, що позбавлені вказаних недоліків.

В роботі проведений порівняльний аналіз таких методів оптимізації: методу Ньютона, простої ітерації, січної, найскорішого спуску, Гауса–Зайделя (покоординатного спуску), Хука–Дживса (прямого пошуку) та Нелдера–Міда (багатогранника, що деформується). Аналіз проводився за критеріями: швидкість збіжності, обчислювальна ефективність, точність початкових наближень, розмірність вектора початкових наближень, розрахунок похідних, критичність до об'єму вимірювальної інформації, потенційна точність результату. Результати аналізу свідчать про те, що при малому об'ємі траєкторних вимірів та значних відхиленнях вектора початкових наближень від реальних параметрів руху в умовах однопунктної технології управління для мінімізації функції (1) доцільно використовувати нелокальні підходи, що дозволяють отримати максимально можливу кількість інформації про цільову функцію [6, 7].

Враховуючи переваги методу Нелдера–Міда (простота реалізації, відсутність лінеаризації цільової функції, властивість області багатогранника, що деформується, вироджуватись в точку лише при досягненні мінімуму цільової функції), його обчислювальна схема взята за основу при розробці збіжного алгоритму оцінювання параметрів руху КА за скороченим об'ємом траєкторних вимірів. Збіжність покращується завдяки тому, що в самому початку мінімізації вдається отримати суттєвий об'єм відносно цільової функції за рахунок розгляду великої кількості вершин області початкових наближень, на кожному етапі оптимізаційного пошуку інформація, необхідна для реалізації чергової ітерації, отримується за рахунок розгляду семи вершин даної області.

Розроблений алгоритм автономної навігації КА ОЕС з використанням цільової інформації включає такі етапи:

1. Отримання оптичних траєкторних вимірів (прив'язка отриманих знімків до еталонної карти шляхом розв'язання кореляційно-екстремальної задачі).

2. Побудова області початкових наближень.

Для застосування методу оптимізації Нелдера–Міда необхідно $w = 7$ значень вектора початкових наближень (на одиницю більше кількості оцінюваних параметрів). Для формування області початкових наближень пропонується два підходи: перший – область початкових наближень формується відповідно до граничних значень похибок виведення КА на орбіту (при первинному визначенні параметрів руху після запуску); другий – область формується відповідно до максимального відхилення розрахункового часу знаходження КА в точці траверзу від моменту часу, визначеного за результатами сеансу зв'язку з КА.

Таким чином, область початкових наближень має вигляд:

$$\bar{Q}_{np}^{(k)} = \{\bar{q}_{np1}^{(k)}, \dots, \bar{q}_{np7}^{(k)}\},$$

де $\bar{q}_{npw}^{(k)} = \{x_{npw}^{(k)}, y_{npw}^{(k)}, z_{npw}^{(k)}, \sqrt{x}_{npw}^{(k)}, \sqrt{y}_{npw}^{(k)}, \sqrt{z}_{npw}^{(k)}\}$, $w = \overline{1,7}$ – індекс відповідної вершини області початкових наближень; k – номер ітерації.

3. Обчислення мінімізованої функції відповідно до методу найменших квадратів для всіх вершин області початкових наближень

$$F_w^{(k)}(\bar{q}_{npw}^{(k)}) = \sum_{i=1}^n (d_i - \tilde{d}_i(\bar{q}_{npw}^{(k)}))^2, \quad w = \overline{1,7}, \quad (2)$$

де $\vec{\sigma}_i(\vec{q}_{npw}^{(k)})$ – розрахункові значення вимірюваного параметра.

4. Визначення $\vec{q}_{\min}^{(k)}$ та $\vec{q}_{\max}^{(k)}$ – вершин області початкових наближень, в яких функція (2) приймає відповідно найменше і найбільше значення.

5. Визначення центру тяжіння всіх вершин, виключаючи $\vec{q}_{\max}^{(k)}$:

$$\vec{q}_{cj}^{(k)} = \frac{1}{6} \left[\left(\sum_{w=1, j \neq h}^7 \vec{q}_{npw, j}^{(k)} \right) \right], j = \overline{1,6},$$

де індекс j означає координатний напрямок; h – номер вершини $\vec{q}_{\max}^{(k)}$.

6. Перевірка умови закінчення пошуку:

$$\left\{ \frac{1}{7} \sum_{w=1}^7 \left[F_w(\vec{q}_{npw}^{(k)}) - F(\vec{q}_c^{(k)}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \varepsilon, \tag{3}$$

де ε - порогове значення критерію закінчення пошуку; $F(\vec{q}_c^{(k)})$ – значення цільової функції в центрі тяжіння.

Від величини ε залежить кількість ітерацій k при пошуку мінімуму цільової функції (1), а також точність знаходження даного мінімуму. При виборі значення величини ε необхідно враховувати, що через неминучу наявність систематичних і випадкових похибок нульове значення мінімізованої функції не може бути досягнуто, отже недоцільно задавати дуже мале значення ε . Результати досліджень показали, що кращим, з точки зору обчислювальних витрат і точності отриманого рішення, є значення $\varepsilon = 10^{-7}$.

7. Якщо умова закінчення пошуку (3) не виконується, то, відповідно до методу Нелдера–Міда, здійснюється перетворення області початкових наближень $\vec{Q}_{np}^{(k)}$ із застосуванням однієї з операцій: віддзеркалення, розтягнення, стиснення та редукції. Потім робота алгоритму повторюється з п. 3, при цьому $k = k + 1$.

В результаті роботи алгоритму мінімізації область початкових наближень стискається, наближаючись до точки з мінімальним значенням функції (2). Тобто в результаті мінімізації отримуємо

$$\vec{q}_{npL} = \arg \min_{\vec{q}_{np} \in \vec{Q}_{np}} \sum_{i=1}^n \left[d_i - \tilde{d}_i(\vec{q}_{np}) \right]^2,$$

де $\vec{q}_{npL} = \vec{q}^{\wedge}$ – результат уточнення параметрів руху КА на момент часу t_0 .

За допомогою імітаційного моделювання здійснена оцінка незміщеності розробленого методу визначення параметрів руху КА. Під останнім розуміється те, що при відсутності систематичних та випадкових похибок ($\eta = \xi = 0$) оцінка \vec{q} наближається до точного значення \vec{q}^* . Результати оцінки наведені в табл. 1.

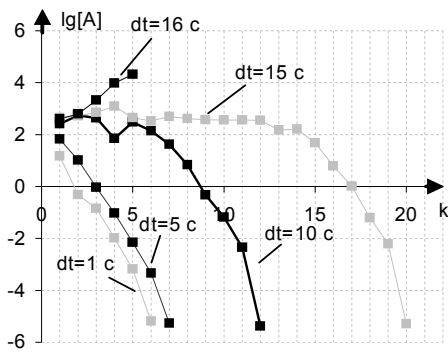
Таблиця 1

Оцінка незміщеності розробленого алгоритму

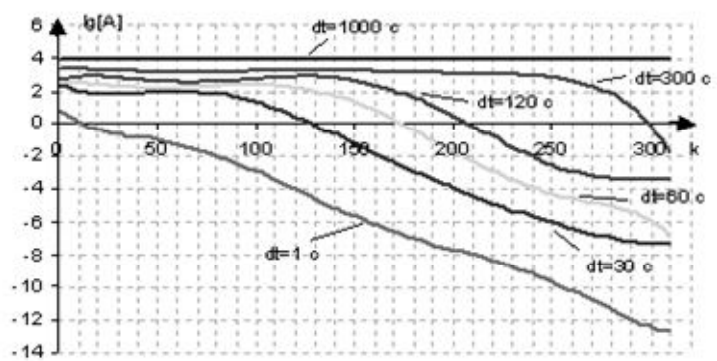
	Дійсні ПУ \vec{q}^*	Уточнені ПУ \vec{q}	Відхилення $ \Delta \vec{q} $
x , км	6003,214325	6003,214272	0,000053
y , км	3623,164556	3623,164642	0,000086
z , км	0,000000	0,000030	0,000030

Значення відхилень $|\Delta \vec{q}|$ характеризують потенційну точність розробленого алгоритму навігації КА. Із аналізу отриманих даних видно, що просторовий зсув положення КА при відсутності похибок траєкторних вимірів і моделі, не перевищує розмірів самого КА.

В роботі проведені експериментальні дослідження розробленого алгоритму навігації КА. На рис. 3 наведена візуалізація процесу оцінювання параметрів руху КА за результатами траєкторних вимірів при різних відхиленнях початкових наближень від шуканого результату з використанням штатного і розробленого алгоритмів.



а) на основі методу Ньютона



б) на основі методу Нелдера-Міда

Рис. 3. Збіжність процесу оцінювання параметрів руху КА

На рис. 3 використані позначення: k – кількість ітерацій процесу мінімізації цільової функції; dt – часове відхилення вектора початкових наближень від результату уточнення, яке характеризує розміри області збіжності; $A = |\hat{q}^* - \hat{q}|$.

З аналізу отриманих результатів видно, що штатний алгоритм має значно більшу швидкість збіжності, проте розроблений метод має істотно ширшу область збіжності, що дозволяє успішно вирішувати задачі визначення початкових умов руху КА при значних відхиленнях розрахункових параметрів орбіти від реальних, що підтверджує теоретичні положення.

В роботі також проведені дослідження з організації автономної навігації КА ОЕС з використанням цільової інформації на основі розробленого алгоритму. Як траєкторні виміри розглядаються координати прив'язки знімків високої розривності. Результати оцінки параметрів руху КА з використанням цільової інформації наведені в табл. 2. У розрахунках були використані початкові дані: середньоквадратичне відхилення похибок визначення геодезичної широти та довготи знімків $\sigma_B = \sigma_L = 4,3$ м; отримані 3 знімки з координатами (7,2240; 47,3710), (32,8070; 49,5070), (57,8050; 206,6080), координати знімків мають північну широту.

Таблиця 2

Результат оцінки параметрів руху КА

Відхилення $ \Delta \vec{q} $	Час, с	Вздовж орбіти, км	За радіусом, км	За боком, км
	0,021	0,157095	0,015110	0,032898

З аналізу отриманих результатів видно, що застосування розробленого алгоритму автономної навігації КА дозволяє отримати результат за скороченим об'ємом оптичних траєкторних вимірів, при цьому точність оцінки відповідає точнісним вимогам для зйомки запланованого району спостереження перспективним КА ОЕС "Січ-3".

Висновки. В роботі наведено результати вирішення актуального наукового завдання, яке полягає в розробці алгоритму автономної навігації КА ОЕС з використанням цільової інформації в умовах однопунктної технології управління за скороченим об'ємом траєкторних вимірів.

Розроблений алгоритм заснований на нелокальному оптимізаційному підході, що дозволяє отримати максимально можливу кількість інформації про цільову функцію; це дозволяє оцінити параметри орбіти супутника за скороченим об'ємом траєкторних вимірів. Відсутність лінеаризації цільової функції дозволяє підвищити гарантовану точність навігації КА ОЕС.

Застосування алгоритму навігації КА за скороченим об'ємом траєкторних вимірів дозволяє підвищити гарантовану точність оцінки положення КА на момент виконання цільової задачі за рахунок зменшення впливу похибок моделі руху шляхом скорочення часу між циклами уточнення параметрів руху КА.

Розроблений алгоритм навігації КА дозволяє у 2 рази підвищити оперативність отримання оцінки початкових умов руху КА шляхом зменшення об'єму вимірювальної інформації, що необхідна для збіжності методу обробки траєкторних вимірів.

Розроблений алгоритм навігації КА має область збіжності, виражену у відхиленні часових параметрів початкових наближень від шуканих оцінок, ширшу в 10 разів, у порівнянні зі штатним алгоритмом, що дозволяє використовувати його при первинному визначенні параметрів руху КА після виведення на орбіту при значних відхиленнях реальних параметрів орбіти від розрахункових в умовах неприцездатності штатного алгоритму.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Иванов Н.М.* Баллистика и навигация космических аппаратов: Учебник для вузов. – М.: Дрофа, 2004. – 544 с.
2. *Ястребов В.Д.* Исследование методических проблем и разработка алгоритмов баллистического обеспечения управления КА при использовании однопунктной схемы измерений. – М.: ЦНИИМАШ, 1993. – 174 с.
3. *Черный И.* США обеспокоены китайскими планами // Новости космонавтики. – 2003. – № 10. – С. 23.
4. *Андросов В.А., Бойко Ю.В., Бочкарев А.М., Однорог А.П.* Совмещение изображений в условиях неопределенности // Зарубежная радиоэлектроника. – 1985. – № 4. – С. 54–70.
5. *Лебедев А.А., Нестеренко О.П.* Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование. – М.: Машиностроение, 1991. – 346 с.
6. *Химмельблау Д.* Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
7. *Немировский А.С., Юдин Д.Б.* Сложность задач и эффективность методов оптимизации. – М.: Наука, 1980. – 429 с.

ВАРЛАМОВ Ігор Давидович – кандидат технічних наук, начальник науково-дослідного відділу проблем розробки застосування та експлуатації космічних інформаційних систем науково-дослідного центру Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- управління космічними системами;
- обробка інформації космічних засобів.

ВОДОП'ЯН Сергій Васильович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, заступник директора Житомирського науково-дослідного інституту радіосистем з наукової роботи.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання та цифрова обробка сигналів.

ЗАВАДА Андрій Анатолійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник науково-дослідного відділу проблем розробки застосування та експлуатації космічних інформаційних систем науково-дослідного центру Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С.П. Корольова.

Наукові інтереси:

- балістико-навігаційне забезпечення управління польотами космічних апаратів.

Подано 16.10.2006