

ОПТИМАЛЬНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗАЯВОК НА ОТРИМАННЯ ЦІЛЬОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ З БОРТУ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

У статті розглянута задача обслуговування заявок на отримання цільової інформації з борту космічних апаратів дистанційного зондування Землі. Запропонований підхід дозволяє обґрунтовувати вибір варіанта обслуговування заявок за декількома критеріями. Багатокритеріальна оцінка дозволяє визначати оптимальний варіант обслуговування заявок за рахунок згортки конфлікуючих критеріїв за нелінійною схемою компромісів. Оптимальне обслуговування заявок дозволяє підвищити якість виконання цільових задач та раціонально використовувати ресурси бортової цільової апаратури, що підтверджується експериментальною перевіркою.

Вступ. Загальнодержавною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2008–2012 роки в рамках цільового завдання “Здійснення дистанційного зондування Землі” передбачається створення та використання національних технічних засобів дистанційного зондування Землі для задоволення державних потреб у матеріалах космічної зйомки [1]. Зокрема у 2010 році передбачається створення та експлуатація космічної системи (КС) спостереження Землі “Січ” з виведенням на орбіту космічного апарата (КА) “Січ-2”. Паралельно зі створенням космічних засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) актуальною задачею є дослідження науково обґрунтованих способів їх ефективного цільового застосування. Ефективність цільового застосування КС ДЗЗ залежить як від зовнішніх умов спостереження, так і від досконалості технології експлуатації. Існує потреба більш повно враховувати як динаміку зовнішніх умов, так і фактори технології експлуатації.

Серед етапів цільового застосування, який найбільше впливає на результуючу ефективність застосування КС ДЗЗ, є етап оперативного планування роботи цільової апаратури КА. Для підвищення результуючої ефективності застосування КС ДЗЗ необхідне вдосконалення процесу оперативного планування роботи бортової цільової апаратури (БЦА) КА. Складений оперативний план роботи БЦА космічних апаратів ДЗЗ повинен задовольняти виконання заявок споживачів на отримання цільової інформації [2].

У заявках споживачів зазначаються: організація-замовник; місцезнаходження району спостереження (назва та координати); час виконання (початок, кінець, періодичність); особливі умови зйомки (припустима хмарність та кут місця сонця).

Постановка задачі. Виходячи з того, що на практиці [3, 4]:

- 1) споживачі цільової інформації мають різний пріоритет (важливість);
- 2) існують різні за пріоритетом райони спостереження, зазначені в заявках;
- 3) обмежений ресурс БЦА КА та його евристичний розподіл;

4) критерій максимального часу $T_n(N) = \max$ знаходження КА над районом спостереження [5], за яким проводиться вибір і включення n -го району спостереження із множини придатних для спостереження N до варіанта обслуговування заявок, не завжди забезпечує інформаційні потреби різних замовників;

5) відсутнє врахування динаміки зміни освітленості підстеляючої поверхні району спостереження;

6) не повною мірою враховується вплив великої кількості негативних факторів (зміни метеорологічної обстановки над районом спостереження, відмови апаратури, витрата ресурсу бортової апаратури);

7) розбіжності у показниках між планом і фактом за існуючою методикою призводять до помилок складання оперативного плану, а отже, і неповного та неякісного задоволення заявок споживачів цільової інформації.

Кількість потенційних варіантів обслуговування заявок споживачів може бути непомірно високою та визначається як [6]:

$$W_V = W_N \cdot W_L, \quad (1)$$

де $W_N = 2^N - 1$ – кількість можливих комбінацій районів спостереження;

$W_L = 2^L - 1$ – кількість можливих комбінацій вмикань бортової цільової апаратури на L витках.

При $N \geq 10$ та $L \geq 10$ значення $W_V \gg 10^6$, що свідчить про необхідність вибору оптимального (на дискретній множині станів) за визначеними критеріями варіанта обслуговування заявок на отримання

цільової інформації, тобто необхідно розв'язувати задачу оцінки кращого з цих варіантів.

Мета оптимального обслуговування заявок на отримання цільової інформації полягає в наступному: на інтервалі обслуговування з безлічі можливих варіантів необхідно вибрати деякий оптимальний (за вибраними критеріями) варіант обслуговування заявок, тобто на якому витку, у якій послідовності, інформацію з яких районів спостереження необхідно отримати.

Система показників ефективності та критеріїв складання оптимального варіанта обслуговування заявок представлена у табл. 1, де K_{II} – критерій повноти інформації; N_z – замовлена кількість районів спостереження; N_r – кількість районів спостереження, за якими реально може проводитись спостереження; N^{max} – максимальна кількість районів спостереження, за якими може бути добута інформація (залежить від об'єму бортового запам'ятовуючого пристрою КА та часу спостереження); N – нормативна кількість районів спостереження, за якими може бути добута інформація (залежить від об'єму бортового запам'ятовуючого пристрою КА V_z та часу спостереження T_1); K_p – критерій мінімуму ризику невиконання заявки; N_r^{max} – максимальна кількість районів спостереження, за якими реально може проводитись спостереження; P_n – розрахована ймовірність виконання задачі спостереження; γ_n – коефіцієнт ваги, який враховує значення пріоритету району спостереження; K_e – критерій перевитрати ресурсу; R_n – витрата технічного ресурсу КА (невідновлювальний) – кількість вмикань БЦА; R_d – допустима витрата ресурсу КА за визначений термін.

Таблиця 1

Формалізована постановка задачі оптимізації обслуговування заявок

Мета розв'язку	Формалізований вид задачі		
	показник ефективності	критерій ефективності	обмеження
Визначення оптимального варіанта обслуговування заявок	$K_{II} = \frac{N_r}{N_z}$	$K_{II} \rightarrow \max$	$0 \leq N_z \leq N^{max}$ $N_r \geq N$ $N^{max} = f(V_z, T_1)$
	$K_p = \frac{\sum_{n=1}^{N_r} (P_n \cdot \gamma_n)}{N_r^{max}}$	$K_p \rightarrow \max$	$P_n \leq 1$
	$K_e = \frac{\sum_{n=1}^{N_r} R_n}{R_d}$	$K_e \rightarrow \min$	$R_n \leq R_d$

Викладення основного матеріалу. Для вирішення багатокритеріальних задач існує декілька підходів до оптимізації [7, 8]. Всі вони приводяться до пошуку деякої схеми компромісу між усіма критеріями.

На основі аналізу підходів до здійснення параметричної багатокритеріальної оптимізації її доцільно провести методом скалярної згортки за нелінійною схемою компромісів [8]. Цей метод має ряд переваг, а саме:

- застосовується при оптимізації дискретних величин (варіант плану);
- нелінійна схема компромісів задовольняє умову парето-оптимальності;
- існує можливість знаходження оптимального розв'язку задачі з урахуванням області обмежень частинних критеріїв;
- розв'язок задачі можливий з урахуванням пріоритетів критеріїв та згортки конфліктуючих критеріїв різної фізичної природи за рахунок їх нормалізації.

Основні процедури методики багатокритеріальної оцінки варіантів обслуговування заявок.

1. Вибір обмежень.

Крім загальних обмежень, сформульованих при математичній постановці задачі, слід зазначити наступне: для розв'язання задачі використовується один КА, який є складовою частиною КС ДЗЗ та рухається по орбіті за відомими законами, з відомими початковими умовами руху. Розглядаються лише ті функціональні вузли КА, які безпосередньо впливають на якість та ефективність виконання цільових завдань спостереження, а саме: бортова цільова апаратура (формує інформацію про район спостереження); бортовий забезпечувальний комплекс (виділяється система орієнтації та стабілізації;

система енергоспоживання; бортовий інформаційно-обчислювальний комплекс; реактивна управляюча система).

2. Вибір та обґрунтування системи показників та критеріїв складання оптимального варіанта обслуговування заявок.

$J\{\varphi_j\}$ – множина частинних критеріїв, де $1 < j < M$, $\varphi_j = F\{K_{II}, K_p, K_e\}$.

3. Складання загальної критеріальної функції.

Показник повноти інформації та показник витрати ресурсу відносяться один до одного як суперечливі, тобто покращення першого призводить до погіршення другого і навпаки. В цих умовах пошук оптимальних значень показників є результатом компромісу трьох параметрів (частинних критеріїв) K_{II} , K_p , K_e .

4. Нормалізація частинних критеріїв.

При мінімізації функція частинних критеріїв запишеться у вигляді:

$$\varphi_j(\chi) \rightarrow \min \Rightarrow \varphi_{0j} = \frac{\varphi_j(\chi)}{A_j}, \quad (2)$$

де A_j – максимальне значення функції частинного критерію.

При необхідності максимізувати функції частинних критеріїв вираз (4) запишеться у вигляді:

$$\varphi_j(\chi) \rightarrow \max \Rightarrow \varphi_{0j} = \frac{C_j - \varphi_j(\chi)}{A_j}, \quad (3)$$

де $C_j = \text{const} \geq \varphi_j^{\max}$ – константа, яка більша чи дорівнює максимальному значенню функції $\varphi_j(\chi)$.

5. Розв'язок задачі оптимізації.

Використовуючи метод скалярної згортки за нелінійною схемою компромісів [9] та враховуючи необхідність максимізувати критерії K_{II} і K_p та мінімізувати критерій K_e , можна знайти оптимальний варіант обслуговування заявок:

$$\chi^* = \arg \min_{\chi \in G} P(J) = \arg \min_{\chi \in G} \sum_{j=1}^M \rho_j [1 - \varphi_{0j}(\chi)]^{-1} \quad (4)$$

чи

$$N_r^* = \arg \min_{N_r \in G} \sum_{j=1}^3 \rho_j [1 - \varphi_j(N_r)]^{-1}, \quad (5)$$

де N_r^* – точка екстремуму (мінімуму) функції $\sum_{j=1}^3 \rho_j [1 - \varphi_j(N_r)]^{-1}$;

N_r – параметр, що варіюється;

ρ_j – вагові коефіцієнти функцій частинних критеріїв ($\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 = 1$), визначаються методом експертних оцінок і розробником КС ДЗЗ;

φ_j – функції частинних критеріїв.

Для оцінки правильності прийнятих підходів та перевірки ефективності обслуговування заявок на отримання цільової інформації з борту КА ДЗЗ було проведено імітаційне моделювання та експериментальна перевірка.

Працездатність методики перевірена при складанні оперативного плану роботи БСА КА “Січ-2” перспективної вітчизняної КС спостереження Землі “Січ”. Космічний апарат “Січ-2” рухається по коловій сонячно-синхронній орбіті висотою $H = 668$ км, нахиленням $i = 98,074^\circ$ та часом проходження низхідного вузла орбіти при проведенні спостереження заданих районів в період з $T_{II} = 9$ год. 30 хв. до $T_K = 11$ год. 30 хв. за місцевим часом. Для отримання зображень підстеляючої поверхні Землі до складу бортової цільової апаратури КА входить жорстко пов'язаний з корпусом КА багатозональний пристрій сканування (БПС). Перенацілювання смуги огляду БПС на визначений район спостереження здійснюється за рахунок відхилення всього КА від надиру на кут нахилення $\pm 35^\circ$. При цьому ширина смуги захоплення уперек траси – 1040 км; ширина смуги огляду – 46,6 км. Космічний апарат передає інформацію на наземний пункт прийому інформації (ППІ) не менше 4 разів. При відсутності зони прямої радіовидимості з ППІ інформація про район спостереження записується у бортовий запам'ятовуючий пристрій. Максимальний час спостереження району БПС дорівнює 180 с. Визначений інтервал обслуговування заявок – 3 доби (з 00.00 19.04.10 до 23.59 21.04.10). За цей час КА “Січ-2” здійснить навколо Землі $O_B = 44$ оберти.

Для проведення імітаційного моделювання були обрані райони спостереження з відповідними пріоритетами із зведених заявок споживачів. Були визначені витки з об'єктивно придатними до спостереження районами на інтервал обслуговування 3 доби. За цей інтервал часу всі з визначених районів спостереження будуть знаходитись у полі зору бортової цільової апаратури. Але одні райони на інтервалі обслуговування можна спостерігати лише один раз (такі райони однозначно включаються до обслуговування), а інші – два і більше рази (для таких районів необхідно вибрати оптимальний виток для спостереження). Значення згортки критеріїв за нелінійною схемою компромісів N^* розраховані при різних варіантах завдання вагових коефіцієнтів ρ кожного з критеріїв (табл. 2). Способи завдання вагових коефіцієнтів доцільні для дослідження властивостей скалярної згортки на прийняття рішення про включення району спостереження на обслуговування. У табл. 2 представлені чотири варіанти розрахунку значення скалярної згортки та її нормованого значення.

Перший варіант відповідає ситуації, коли всі вагові коефіцієнти рівнозначні. Три наступних варіанти відповідають почерговій максимізації кожного з вагових коефіцієнтів. Графічне представлення значення скалярної згортки для вибору оптимального витка при різних вагових коефіцієнтах для району спостереження – № 10 (рис. 1, а) та № 3 (рис. 1, б).

Оцінка ефективності запропонованого підходу до обслуговування заявок споживачів у порівнянні з існуючим проводилась за такими показниками: N_z – замовлена кількість районів спостереження; N_r – кількість районів спостереження, за якими реально може проводитись спостереження; K_{Π} – показник повноти інформації; T_{ρ} – час складання варіанта обслуговування заявок; R – бортовий ресурс КА (рис. 2).

З аналізу табл. 2, рис. 1 та рис. 2 можна зробити такі висновки:

– значення згортки часткових критеріїв доцільно використовувати для автоматичного визначення пріоритетів на прийняття рішення щодо включення району спостереження до варіанта обслуговування заявок;

– залежно від початкових умов згортка виражає різні принципи оптимальності;

– оптимальний варіант обслуговування заявок дозволить зменшити нецільову витрату ресурсу КА, що міг би бути використаний на спостереження районів, для яких на заданий період часу несприятлива балістична ситуація, в яких склалися несприятливі погодні умови, пріоритет яких низький тощо, та використати його для розв'язання задач у майбутньому;

– значення показника повноти інформації збільшилось на 8 %, що забезпечило більш якісне виконання цільової задачі;

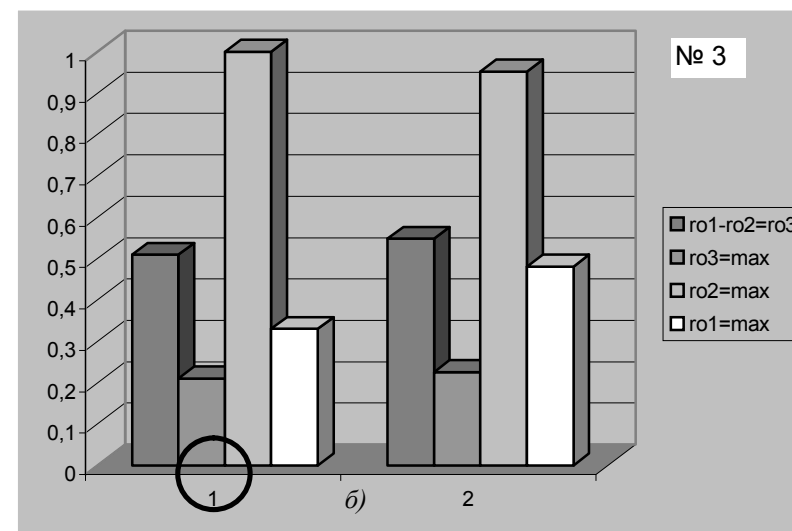
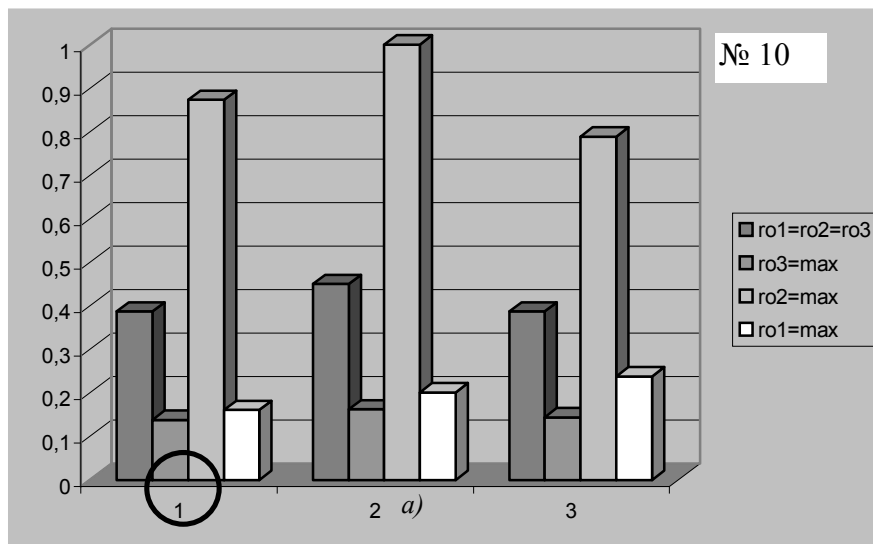
– час складання варіанта обслуговування заявок зменшився в 2,6 рази;

– забезпечується раціональне використання ресурсу БСА КА. Зберігається ресурс бортової апаратури КА на 7 %.

Потенціальна кількість РР	Реальна кількість РР	Показник повноти інформації	Час планування	Бортовий ресурс КА
------------------------------	-------------------------	-----------------------------------	-------------------	-----------------------

Значення згортки критеріїв при різних вагових коефіцієнтах

№ району	№ витка	Значення N^*				№ витка	Нормоване значення N^*			
		$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$	$\rho_1 = 0.1$ $\rho_2 = 0.1$ $\rho_3 = 0.8$	$\rho_1 = 0.1$ $\rho_2 = 0.8$ $\rho_3 = 0.1$	$\rho_1 = 0.8$ $\rho_2 = 0.1$ $\rho_3 = 0.1$		$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3$	$\rho_1 = 0.1$ $\rho_2 = 0.1$ $\rho_3 = 0.8$	$\rho_1 = 0.1$ $\rho_2 = 0.8$ $\rho_3 = 0.1$	$\rho_1 = 0.8$ $\rho_2 = 0.1$ $\rho_3 = 0.1$
10	5	14,930	5,335	33,69	6,19	5	0,386788	0,138212	0,872798	0,160363
10	20	17,379	6,262	38,6	7,76		0,450233	0,162228	1	0,201036
10	35	14,931	5,564	30,45	9,19		0,386813	0,144145	0,78886	0,238083
3	6	8,102	3,349	15,91	5,25	6	0,509239	0,210497	1	0,329981
3	35	8,716	3,596	15,14	7,64		0,547832	0,226021	0,951603	0,480201
7	11	5,457	6,01	6,01	4,33	26	0,652751	0,7189	0,7189	0,517943
7	26	5,431	4,135	6,46	5,75		0,649641	0,494617	0,772727	0,687799
7	40	6,621	5,037	6,54	8,36		0,791986	0,602512	0,782297	1

Рис. 1. Значення згортки при різних значеннях вагових коефіцієнтів ρ

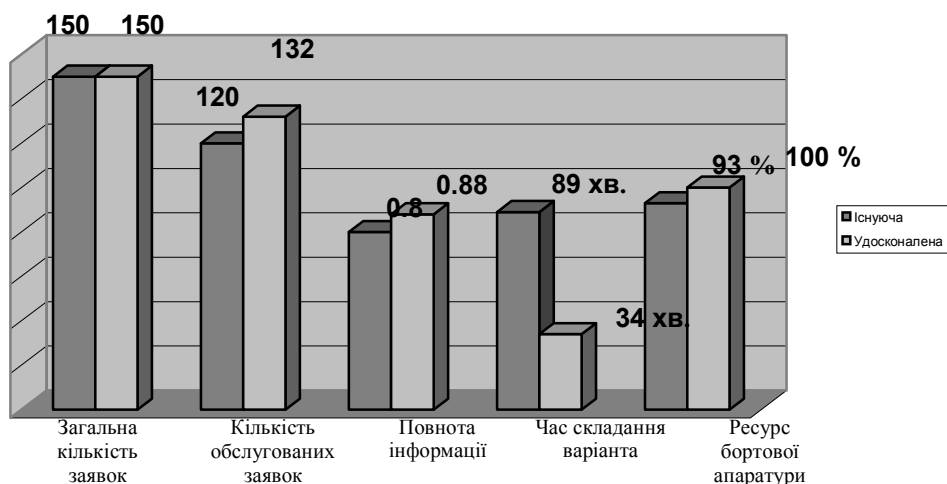


Рис. 2. Порівняння показників ефективності варіанта обслуговування заявок

Висновки. У статті подані шляхи оптимізації обслуговування заявок на отримання цільової інформації з борту КА ДЗЗ.

1. Запропонований порядок обслуговування заявок враховує пріоритети заявок замовників інформації; додаткові умови та фактори на час оцінки обстановки та природних умов у районі спостереження. Обґрунтування вибору варіанта обслуговування заявок здійснюється за трьома критеріями.

2. Багатокритеріальна оцінка дозволяє визначити оптимальний за Парето варіант обслуговування заявок за рахунок згортки конфлікуючих критеріїв за нелінійною схемою компромісів. Оптимізація обслуговування заявок дозволяє підвищити якість виконання цільових завдань, раціонально використовувати ресурси БСА.

3. Експериментальні дослідження з використанням реальних початкових даних підтвердили працездатність запропонованих підходів. Отримані в ході експериментальних досліджень кількісні показники ефективності (значення показника повноти інформації збільшилось на 8 %; час складання варіанта обслуговування заявок зменшився в 2,6 рази; зберігається ресурс бортової апаратури КА на 7 %) свідчать про її збільшення в порівнянні з існуючою.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Про затвердження Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2008-2012 роки від 30.09.2008. – № 608-VI : закон України.
2. <http://www.pryroda.gov.ua>.
3. Космический аппарат “Січ-1” : Техническое описание. – Ч. I-III. – Днепропетровск, 1994.
4. Космическая система “Січ-1М” // Научно-технический бюллетень № 17. – Евпатория : ОНИИР, 1999. – С. 3–18.
5. Спеціальне програмне забезпечення розрахунку командно-програмної інформації „Луч-Е” : технічний опис. – Дніпропетровськ : ДНВП “Орбіта” 1995. – 214 с.
6. *Машков О.А.* Методика оптимізації планування роботи орбітальних засобів космічних систем спостереження / *О.А. Машков, С.П. Фриз* // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : збірник наукових праць. – Житомир : ЖВІРЕ, 2003. – Вип. 6. – С. 80–92.
7. *Брахман Т.Р.* Многокритериальность и выбор альтернативы в технике/ *Т.Р. Брахман.* – М. : Радио и связь, 1984. – 288 с.
8. *Воронин А.Н.* Многокритериальный синтез динамических систем / *А.Н. Воронин.* – К. : Наукова думка, 1992. – 160 с.
9. *Воронин А.Н.* Сложные технические и эргатические системы: методы исследования : монография / *А.Н. Воронин, Ю.К. Зияудинов, А.В. Харченко, В.В. Остапьевский.* – Харьков : Факт, 1997. – 240 с.

САВЧУК Андрій Володимирович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник наукового відділу військової частини А0735.

Наукові інтереси:

– ефективність функціонування космічних систем.

Подано 18.01.2010

Савчук А.В. Оптимальне обслуговування заявок на отримання цільової інформації з борта космічних апаратів дистанційного зондування Землі.

Савчук А.В. Оптимальное обслуживание заявок на получение целевой информации с борта космических аппаратов дистанционного зондирования Земли.

Savchuk A.V. Optimum servicing the requirements for reception mission information acquired by Earth remote sounding vehicles.

УДК 629.7.014

Оптимальное обслуживание заявок на получение целевой информации с борта космических аппаратов дистанционного зондирования Земли/ А.В. Савчук

В статье рассмотрена задача обслуживания заявок на получение целевой информации с борта космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Предложенный подход позволяет обосновывать выбор варианта обслуживания заявок по нескольким критериям. Многокритериальная оценка позволяет определить оптимальный вариант обслуживания заявок за счет свертки конфликтующих критериев по нелинейной схеме компромиссов. Оптимальное обслуживание заявок позволит повысить качество выполнения целевых задач и рационально использовать ресурсы бортовой целевой аппаратуры, что подтверждается экспериментальной проверкой.

УДК 629.7.014

Optimum servicing the requirements for reception mission information acquired by Earth remote sounding space vehicles / A.V. Savchuk

The article considers the task of servicing the requirements for reception mission information acquired by Earth remote sounding space vehicles. The offered approach allows motivate choice of the variant of the requirements servicing by several criteria. The multicriteria estimation allows define the optimum variant of the requirements servicing using folding conflict criteria on nonlinear scheme compromise approach. Optimum requirements servicing will allow enhance quality of the mission tasks performing and rationally use the on-board mission equipment capabilities, as experimental check has confirmed.