

В.В. Петрожалко, ад'юнкт*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету***МЕТОДИКА ЗНАХОДЖЕННЯ КОМПРОМІСНОГО РІШЕННЯ
ПРИ ПЛАНУВАННІ КОСМІЧНОГО ЗНІМАННЯ У СКЛАДНИХ УМОВАХ***(Представлено д.т.н., проф. Манойловим В.П.)*

Розроблено методику, яка дозволяє оцінити потенційні варіанти космічного знімання заданого району за різними показниками для прийняття компромісного рішення у складних умовах, коли не має можливості повністю задовольняти вимоги замовника даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Запропоноване рішення враховує більшу важливість одних параметрів, значення яких є принциповими для замовника і меншу інших, значення яких є менш принциповими.

Вступ. Постановка проблеми у загальному вигляді. Космічне спостереження за об'єктами у видимому діапазоні електромагнітних хвиль дозволяє отримувати інформацію, яка має високу якість та достовірність. Але результати оптико-електронного спостереження (ОЕС) залежать від метеорологічних умов та освітленості поверхні Землі. Але оскільки на дані фактори впливати не можливо, то виникає проблема – яким чином враховувати ці та інші умови при плануванні застосування космічної системи (КС) так, щоб ефективно використовувати космічні засоби та максимально врахувати побажання замовника щодо отриманої інформації.

На інтервалі оперативного планування, якщо замовник висуває досить високі вимоги до майбутнього знімка, а неконтрольовані зовнішні умови є несприятливими (значна хмарність та ін.), то з великою ймовірністю може виникнути ситуація, коли не буде жодного варіанта зйомки, який би повністю задовольняв усім вимогам. Саме таку ситуацію і будемо вважати “складною” при плануванні космічного знімання. Знаходження компромісного рішення, яке б максимально задовольняло вимоги замовника інформації у складних умовах є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [2, 8] розглянуто операції добування видової космічної інформації системою ДЗЗ, докладно описано структуру КС, процес функціонування її елементів, але не розкривається процес і методика узгодження зведеної заявки із замовником у випадку незадовільних погодних умов і таке інше. У методиках, запропонованих у статтях [9, 13], розглядається ситуація, коли заявок від замовників велика кількість. При цьому, якщо не виконуються умови знімання, що задаються замовником, то такі заявки просто не плануються до виконання. Така методика виправдана, якщо можливості КА не дозволяють відзняти всі замовлення і тому є необхідність здійснити вибірку та ранжування відповідних заявок. Але якщо КС завантажена неповністю, а при цьому вимоги замовників не виконуються повною мірою, то необхідно мати зовсім іншу методику для ефективного застосування космічних засобів.

Постановка завдання. Нехай замовник інформації бажає отримати зображення ділянки земної поверхні за допомогою КС ОЕС. При цьому на основі заявки замовника оператор КС формує замовлення щодо задіяння космічних засобів, в якому вказується: номер та вид замовлення, код споживача, дата початку та кінця дії замовлення, періодичність знімання, назва району, координати ділянки знімання, спектральні канали, тип підстильної поверхні, мінімально допустимий кут місця Сонця при зніманні, модуль максимально допустимого кута крену КА при зніманні, модуль кута тангажа КА при стереозніманні, код станції прийому інформації. Дані параметри можна розділити на три групи. До першої віднесемо ті з них, що не змінюються в процесі планування, наприклад, номер замовлення, код споживача та ін.; до другої групи – ті, які розраховуються і задаються оператором у процесі планування – керовані; до третьої – ті, які можуть бути передбачені, але некеровані оператором, тобто зовнішні умови функціонування космічної системи. Від параметрів другої і третьої групи безпосередньо залежить якість планування знімання заданого району, що в свою чергу впливає на ефективність функціонування космічної системи взагалі.

Метою статті є розробка методики, за допомогою якої серед значної кількості варіантів знімання заданого району та несприятливих зовнішніх умов можна визначити найкращий варіант для планування космічного знімання. Для цього необхідно розрахувати, спрогнозувати та проаналізувати такі контрольовані та неконтрольовані параметри знімання, які б максимально задовольняли поставленим вимогам і запропонувати оптимальне рішення замовника для узгодження і подальшого планування роботи КА.

Викладення основного матеріалу. Кількість варіантів зйомок можна знайти за методикою запропонованою в [9]. При цьому, якщо хоча б одна з вимог замовника не буде виконуватись, то даний варіант автоматично відкидається. У складних (несприятливих) умовах зовнішньої обстановки таку

методику застосовувати недоцільно. Для того, щоб проаналізувати всі варіанти і вибрати найкращий, необхідно створити нову методику. Для її реалізації пропонується такий порядок дій:

1. Ввести та розрахувати показники K_*^{Mg} , які будуть відображати ступінь можливого виконання КС окремо кожної вимоги замовника на всіх потенційних для знімання витках орбіти космічного апарата (КА).

2. Ввести та розрахувати коефіцієнти $\lambda_i, i = 1, 2 \dots n$, які будуть відображати ступінь важливості для замовника одних вимог відносно інших.

3. Розрахувати узагальнений показник доцільності знімання для кожного варіанта зйомки V_n , що може бути реалізований за допомогою КС ОЕС.

4. Визначити найкращий варіант (один або декілька), який має найбільше значення узагальненого показника доцільності знімання і запропонувати його замовнику як компромісний.

Відповідно до першого пункту, показники можливого виконання пропонується ввести таким чином: якщо вимогу замовника можливо повністю виконати, то $K_*^{Mg} = 1$, якщо лише частково, то $0 < K_*^{Mg} < 1$ і якщо вимогу не можливо виконати, то $K_*^{Mg} = 0$. Знак «*» означає відповідну вимогу замовника.

Аналіз вимог замовника інформації, які наведено у постановці завдання до цієї статті, дозволяє запропонувати такі показники можливого виконання окремо кожної вимоги замовника.

Площа району, яку має охоплювати знімок. Якщо площа, яка утворюється внаслідок знімання, повністю охопить заданий замовником район, то $K_Q^{Mg} = 1$. В іншому випадку, показник можливого виконання вимоги замовника за площею знімання має такий вигляд:

$$K_Q^{Mg} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \tilde{K}_s \geq 1; \\ \tilde{K}_s, & \text{якщо } \tilde{K}_s < 1, \end{cases} \quad (1)$$

де K_Q^{Mg} – показник, що показує ступінь можливого виконання вимоги замовника за площею знімання; \tilde{K}_s – відношення очікуваного показника накриття (K_n) до заданої замовником достатньої для знімання частина площі від усього району (K_s), тобто $\tilde{K}_s = \frac{K_n}{K_s}$. Очікуваний показник накриття обчислюється за формулою:

$$K_n = \frac{S_K}{S_p},$$

де S_K – корисна для замовника площа, яку планується для знімання на даному витку, S_p – загальна площа району спостереження.

Слід зауважити, що для деяких тематичних задач достатньо отримати знімок лише частини від усієї площі заданого району, щоб оцінити необхідну ситуацію, наприклад, врожай зернових, температуру води в озері тощо. Якщо замовник бажає отримати зображення всієї площі даного району, то $K_s = 1$.

Просторова розрізненість. Даний параметр залежить від багатьох факторів, але основним з них є кут відвороту оптичної осі технічного засобу ДЗЗ за креном від напрямку в надир [10, 12]. За рахунок цього смуга захоплення є досить широкою, що дозволяє значно зменшити час отримання цільової інформації, а також підвищити періодичність знімання. При цьому якість отриманого зображення дещо погіршується, на відміну від знімання у надир. Якщо замовник бажає отримати знімок зі значенням просторової розрізненості δ^3 краще, ніж може забезпечити КС на даний момент δ^{Mg} , то показник можливого виконання вимоги за просторовою розрізненістю (K_δ^{Mg}) доцільно розраховувати відповідно до методики запропонованої у [4]. Якщо КС може забезпечити значення просторової розрізненості краще, ніж бажає замовник, то $K_\delta^{Mg} = 1$. Отже загальний вираз для обчислення K_δ^{Mg} має вигляд:

$$K_\delta^{Mg} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \delta^3 \geq \delta^{Mg}; \\ 1 - \frac{P_{\text{вр.півтон}} - P_{\text{вр}}}{P_{\text{вр.півтон}}}, & \text{якщо } \delta^3 < \delta^{Mg}. \end{cases} \quad (2)$$

де K_δ^{Mg} – показник можливого виконання вимоги за просторовою розрізненістю; $P_{\text{вр.півтон}}$ – припустима еквівалентна ймовірність вірного розпізнавання півтонового зображення; $P_{\text{вр}}$ – ймовірність вірного розпізнавання об'єктів на знімку.

Хмарність над районом у момент знімання. Очевидно, що кожного замовника буде цікавити знімок із мінімальним відсотком накриття заданого району хмарами. Тому замовник може допускати існування

певного відсотка хмарності й на майбутньому знімку χ^3 . Звичайно, якщо хмарність над районом у момент знімання буде становити 100 відсотків, то відповідний показник має бути $K_\chi^{M6} = 0$. Але прогнозування хмарності завжди відбувається з певною ймовірністю p_χ . Дана ймовірність залежить як від часу прогнозу, так і від географічного місця розташування району на Землі. Її можна отримати з метеопрогнозів для заданого регіону. Загальний вираз для знаходження показника можливого виконання вимоги за хмарністю має вигляд:

$$K_\chi^{M6} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \tilde{K}_\chi \geq 1; \\ p_\chi \cdot \tilde{K}_\chi, \text{ якщо } \tilde{K}_\chi < 1, \end{cases} \quad (3)$$

де K_χ^{M6} – показник можливого виконання вимоги за хмарністю; $\tilde{K}_\chi = \frac{100 - \chi^{M6}}{100 - \chi^3}$ – вираз для нормування показника за хмарністю; χ^3 – заданий замовником допустимий відсоток хмарності на знімку; χ^{M6} – відсоток хмарності за прогнозом над заданим районом; p_χ – ймовірність прогнозу.

Кут місця Сонця над районом. Сучасна методика вибору витків орбіти КА для здійснення зйомки передбачає розрахунок лише в тому випадку, коли значення кута місця Сонця α над районом зйомки перевищує задану величину. Але, наприклад, коли замовник задає умову – $\alpha^3 = 30^\circ$, то виток орбіти КА, на якому $\alpha^{M6} = 29^\circ$ – вже буде відкидатися. Хоча на такому витку можливо отримати варіант зйомки з кращими іншими параметрами і цілком прийнятний для замовника. Тому показник можливого виконання вимоги замовника за кутом місця Сонця доцільно обчислити за виразом:

$$K_\alpha^{i\alpha} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } \tilde{K}_\alpha \geq 1; \\ \tilde{K}_\alpha, \text{ якщо } \tilde{K}_\alpha < 1, \end{cases} \quad (4)$$

де $K_\alpha^{i\alpha}$ – показник можливого виконання вимоги замовника за кутом місця Сонця; $\tilde{K}_\alpha = \frac{\alpha^{M6}}{\alpha^3} \Big|_{\alpha > 0}$ – вираз для нормування показника за кутом місця Сонця.

Інтервал дат, у межах яких має відбуватися знімання. Значення відповідного показника $K_d^{M6} = 1$, якщо процес знімання відбудеться у заданий замовником інтервал дат. Але може виникнути випадок, коли на даних витках інші параметри, що цікавлять замовника не відповідають вимогам. Тому доцільно розглянути також витки, які лежать поза інтервалом дат заданих замовником. Тоді буде виконуватись умова – $K_d^{M6} < 1$. Розрахунок даного показника можна здійснити, взявши за основу монотонне перетворення Михалевича–Волковича [3] та принципи згортання векторних показників ефективності [14]:

$$K_d^{M6} = \begin{cases} \frac{JD^{M6} - JD_{\min}}{JD_n^3 - JD_{\min}}, \text{ якщо } JD^{M6} < JD_n^3; \\ 1, \text{ якщо } JD_n^3 \leq JD^{M6} \leq JD_k^3; \\ \frac{JD_{\max} - JD^{M6}}{JD_{\max} - JD_k^3}, \text{ якщо } JD^{M6} > JD_k^3, \end{cases} \quad (5)$$

де K_d^{M6} – показник можливого виконання вимоги замовника за інтервалом дат знімання; JD – юліанська дата, що відповідає календарній даті початку JD_n^3 та кінця JD_k^3 знімання [1]; JD_{\min} , JD_{\max} – мінімально та максимально допустимі дати, в межах яких можлива зйомка. Ці дати визначаються оператором КС, залежно від тематичної задачі та узгоджуються із замовником.

Граничний час отримання знімка. Якщо взагалі не можливо надати достовірну інформацію заданої якості вчасно, то інформація, яка поступає трохи пізніше має меншу цінність, але вона також може бути важливою [6]. Ступінь важливості або цінності такої інформації буде залежати від конкретної ситуації і потреб замовника. Тому показник можливого виконання вимоги замовника за граничним часом отримання знімка пропонується обчислювати за формулою:

$$K_t^{M6} = \begin{cases} 1, \text{ якщо } t_2^3 < t_2^{M6} \\ e^{-\gamma(1 - \frac{t_2^{M6}}{t_2^3})}, \text{ якщо } t_2^3 \geq t_2^{M6} \end{cases}, \quad (6)$$

де K_z^{m6} – показник можливого виконання вимоги замовника за граничним часом отримання знімка; γ – параметр, який залежить від швидкості зміни стану об'єкта та визначається залежно від потреб замовника.

Визначення коефіцієнтів λ_i , які відображають ступінь важливості для замовника одних вимог відносно інших пропонується здійснити також за методом експертних оцінок, який розроблено для задачі синтезу узагальненого критерію якості складних систем керування [3]. Цей метод передбачає етап, коли експерти зважують часткові показники. У даному випадку, як експерт виступає замовник даних, а часткові показники – це його вимоги щодо параметрів майбутнього знімка. Тоді коефіцієнти важливості визначаються за виразом:

$$\lambda_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^6 f_i}, \quad (7)$$

де λ_i – коефіцієнт важливості, розрахований для i -го параметра; f_i – оцінка замовником i -го параметра.

Розрахунок узагальненого показника доцільності знімання для кожного варіанта можна здійснити, використовуючи лінійну скалярну згортку часткових показників, які характеризують відповідні вимоги замовника:

$$V_n = K_Q^{ia} \lambda_1 + K_\delta^{ia} \lambda_2 + K_\chi^{ia} \lambda_3 + K_\alpha^{ia} \lambda_4 + K_d^{ia} \lambda_5 + K_t^{ia} \lambda_6, \quad (8)$$

де V_n – узагальнений показник доцільності знімання на n -му витку заданого району. Максимальне значення даного показника відповідає саме тому варіанту, який найкращим чином враховує побажання замовника. Тому компромісне рішення, яке варто узгоджувати із замовником знаходиться за виразом:

$$V^* = \arg \max V_n.$$

На основі запропонованої методики проведено моделювання процесу знімання заданого району вітчизняним КА типу «Січ-2» з такими вихідними даними: район апроксимований багатокутник навколо Житомирської області (рис. 1); задана просторова розрізненість – $\delta^3 = 8,0$ м; хмарність над районом у момент знімання – $\chi^3 = 10$ %; кут місця Сонця над районом – $\alpha^3 = 30^\circ$; інтервал дат, у межах яких має відбуватися знімання – $d_n^3 = 08.09.2011$, $d_k^3 = 18.09.2011$; граничний час отримання знімка – $t_s^3 = 20.09.2011$.

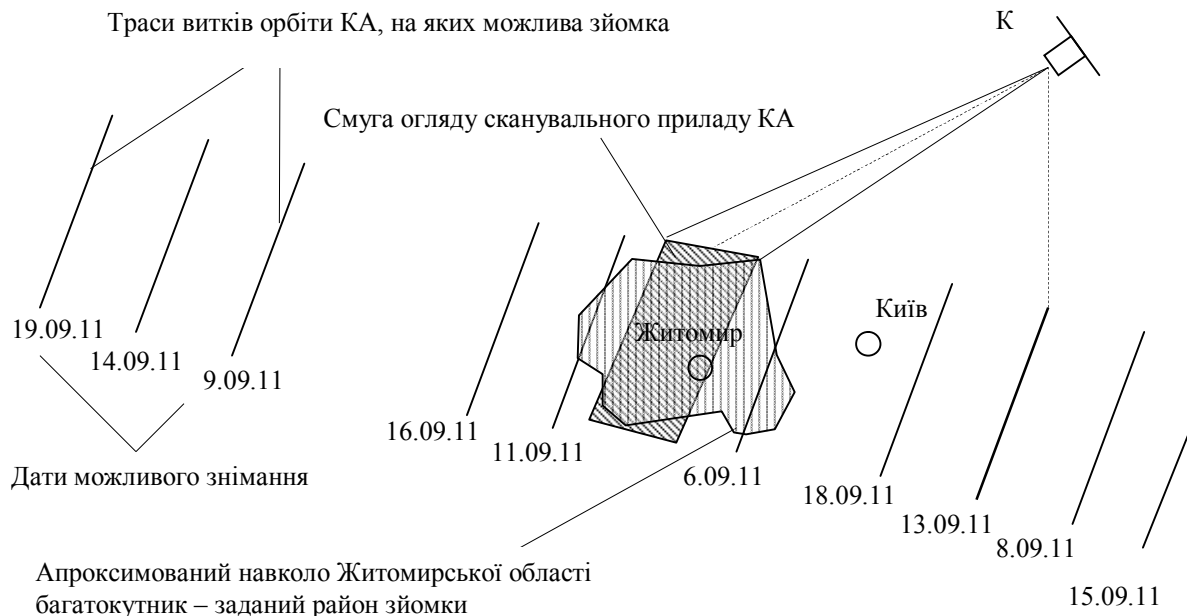


Рис. 1. Схематичне зображення району зйомки та трас витків орбіти КА, на яких можливе знімання

Припустимо, що замовник провів оцінку кожного i -го параметра майбутнього знімка (вимоги) таким чином: за площею – $f_1 = 6$ балів; за просторовою розрізненістю – $f_2 = 9$ балів; за хмарністю – $f_3 = 7$ балів; за кутом місця Сонця – $f_3 = 5$ балів; за інтервалом дат – $f_4 = 4$ бала; за граничним часом отримання знімка – $f_5 = 10$ балів.

Коефіцієнти важливості для даної ситуації, розраховані за формулою (7), мають такі значення:

$$\lambda_1 = 0,146; \quad \lambda_2 = 0,220; \quad \lambda_3 = 0,171; \quad \lambda_4 = 0,122 \quad \lambda_5 = 0,098 \quad \lambda_6 = 0,244.$$

Результати моделювання та розрахунків, згідно з формулами (1–6, 8), для кожного варіанта потенційної зйомки представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати розрахунку узагальненого показника доцільності знімання

Дата	Показник						узагальнений доцільності знімання, V_n
	за площею, K_Q^{me}	за просторовою розрізністю, K_δ^{me}	за хмарністю, K_χ^{me}	за кутом місця Сонця, K_α^{me}	за інтервалом дат, K_d^{me}	за граничним часом, K_z^{me}	
06.09.11	0,34	0,98	0,63	1,00	0,95	1,00	0,831
08.09.11	0,43	0,78	0,72	1,00	1,00	1,00	0,819
09.09.11	0,43	0,76	0,67	1,00	1,00	1,00	0,808
11.09.11	0,34	0,97	0,61	1,00	1,00	1,00	0,831
13.09.11	0,39	0,86	0,74	1,00	1,00	1,00	0,835
14.09.11	0,48	0,69	0,62	1,00	1,00	1,00	0,792
16.09.11	0,35	0,93	0,35	1,00	1,00	1,00	0,779
18.09.11	0,36	0,92	0,53	1,00	1,00	1,00	0,809
20.09.11	0,22	0,69	0,41	1,00	0,86	0,63	0,613
21.09.11	0,38	0,87	0,78	1,00	0,68	0,48	0,696

Найкращий варіант для знімання 13.09.2011 р., узагальнений показник для якого – 0,835. Цей варіант слід запропонувати замовнику для узгодження подальшого планування знімання заданого району за допомогою КА. Як альтернативні варіанти можуть бути запропоновані дати 11.09.2011 р. та 6.09.2011 р., які також мають досить високий узагальнений показник доцільності знімання. А варіанти 20.09.2011 р. та 21.09.2011 р. є найгіршими для узгодження. Хоча вони і не потрапляють у заданий замовником інтервал дат спостереження, але їх також слід було проаналізувати, щоб підтвердити справедливості розробленої методики.

Висновки. Запропонована методика дозволяє забезпечити цільове застосування КС ОЕС навіть за не зовсім сприятливими зовнішніми умовами. Хоча вимоги замовника будуть виконані не в повному обсязі за всіма показниками, але запропоноване компромісне рішення максимально враховує можливості КС ОЕС, стан зовнішніх факторів на поточний момент планування і побажання замовника щодо пріоритетності просторових, часових та якісних параметрів майбутнього знімка. Розроблений математичний апарат для знаходження як часткових показників, так і узагальненого показника доцільності знімання має експериментальний характер і є справедливим для певного класу задач. У подальшому передбачається розробити науково-методичний апарат для більш широкого класу тематичних завдань космічного знімання.

Список використаної літератури:

1. Астрономический ежегодник – 1994. – СПб. : Наука, СПб. отд-ние, 1994. – 704 с.
2. Варламов І.Д. Структурно-логічна послідовність операцій видового космічного ДЗЗ / І.Д. Варламов, Д.А. Іщенко, В.В. Омельчук // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. пр. – Житомир : ЖВІРЕ, 2001. – Вип. 4. – С. 138–145.
3. Воронін А.М. Інформаційні системи прийняття рішень : навч. посібник / А.М. Воронін, Ю.К. Зіатдінов, А.С. Климова. – К. : НАУ-друк, 2009. – 136 с.
4. Горшенін О.Є. Методика оцінювання якості космічних знімків при їх використанні для дешифрування штучних об'єктів ДЗЗ / О.Є. Горшенін, В.В. Петрожалко, О.Ф. Дубіна // Вісник ЖДТУ. – Житомир, 2011. – Вип. 1 (56). – С. 37–43.
5. Дистанційне зондування Землі. Терміни та визначення понять: ДСТУ 4220–2003. – [Чинний від 2004–10–01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2003. – 17 с.: табл. – (Національний стандарт України).
6. Ефимов А.Н. Информация, ценность, старение, рассеивание / А.Н. Ефимов. – М. : Знание, 1979. – 64 с.
7. Лебедев А.А. Космические системы наблюдения: Синтез и моделирование / А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко. – М. : Машиностроение, 1991. – 224 с.

8. *Манойлов В.П.* ДЗЗ із космосу: науково-технічні основи формування і обробки видової інформації : монографія / *В.П. Манойлов, В.В. Омельчук, В.В. Опанюк.* – Житомир : ЖДТУ, 2008. – 384 с.
9. *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 : зб. наук. пр. – Житомир : ЖВІРЕ, 2003. – Вип. 6. – С. 90–100.
10. Моделирование и оценка эффективности применения космических систем : учеб. пособие / под. ред. *Н.С. Пастушенко, В.П. Деденка.* – Х. : ХВУ, 1997. – 278 с.
11. *Фриз П.В.* Основи орбітального руху космічних апаратів : навч. посібник. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2008. – 268 с.
12. *Ханцеверов Ф.Р.* Моделирование космических систем изучения природных ресурсов Земли / *Ф.Р. Ханцеверов, В.В. Остроухов.* – М. : Машиностроение, 1989. – 264 с.
13. Шляхи оптимізації планів цільового застосування КА видового спостереження на основі графової моделі / *В.Л. Баранов, С.В. Водоп'ян, Р.В. Дзюбчук та ін.* // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. пр. – Житомир : ЖВІРЕ, 2006. – Вип. 10. – С. 53–62.
14. *Шматок С.О.* Згортання векторних показників ефективності / *С.О. Шматок* // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. пр. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2011. – Вип. 4. – С. 56–64.

ПЕТРОЖАЛКО Володимир Володимирович – ад'юнкт кафедри геоінформаційних і космічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– планування використання космічних систем.

Стаття надійшла до редакції 25.01.2012

Петрожалко В.В. Методика знаходження компромісного рішення при плануванні космічного знімання у складних умовах

Петрожалко В.В. Методика нахождения компромиссного решения при планировании космической съемки в сложных условиях

Petrozhalko V.V. Methods of finding compromise decision at planning of space output in difficult conditions

УДК 629.78

Методика нахождения компромиссного решения при планировании космической съемки в сложных условиях / В.В. Петрожалко

Разработана методика, которая позволяет оценить потенциальные варианты космической съемки заданного района по разным показателям для принятия компромиссного решения в сложных условиях, когда нет возможности полностью удовлетворить требования заказчика данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Предложенное решение учитывает большую важность одних параметров, значения которых являются принципиальными для заказчика, и меньшую важность других, значения которых являются менее принципиальными.

УДК 629.78

Methods of finding compromise decision at planning of space output in difficult conditions / V.V. Petrozhalko

Methods which allows to estimate the potential variants of space survey of the set district on different indexes for the acceptance of compromise decision in difficult conditions are worked out, when possibility fully to satisfy the requirements of customer of data of the remote sensing of Earth is not. The offered solution takes into account large importance of one parameters values of which are fundamental for a customer, and less importance other, values of which are less fundamental.