

П.В. Фриз, к.т.н., доц.
Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету
О.М. Кондратов, здобувач
Військова частина А1906

АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗОВАНОГО ВИБОРУ РЕЛЕВАНТНИХ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗАДАНИХ РАЙОНІВ ЗЕМЛІ

У статті запропоновано алгоритм автоматизованого вибору доступних космічних апаратів (КА) оптико-електронного спостереження Землі із каталогу NORAD/NASA, придатних для зйомки заданих районів земної поверхні в умовах обмеженого часу на спостереження та при заданих вимогах до якості цільової інформації (ЦІ). Використання запропонованого алгоритму дозволить підвищити оперативність формування замовлень на придбання достовірної ЦІ заданого складу прийнятної вартості від доступних іноземних КА комерційного призначення.

Постановка проблеми. В нинішніх умовах, коли можливості України щодо створення власних космічних засобів обмежені, одним із перспективних шляхів підвищення ефективності попередження загроз у сфері національної безпеки і оборони України може бути використання інформації від діючих КА іноземних комерційних КСС [1, 2], причому від тих, котрі доступні для вітчизняних користувачів та здатні забезпечити оперативний збір даних з будь-якого району Землі з достатньо високим розрізненням бортової цільової апаратури (БЦА). Такі КА для стислості назвемо релевантними. (Релевантність в широкому розумінні – міра відповідності отриманого результату бажаному результату [3]).

Прикладом таких іноземних комерційних КСС можуть служити американські системи: NOAA, Terra, Aqua, Landsat, Ikonos, WorldView, Quicbird, Orbview, канадська Radarsat, ізраїльська Eros, французька Spot, європейська Envisat, індійська Irs, російські Pecsypc, Oкеан та ін. [4].

На даний час відомо декілька шляхів отримання ЦІ для забезпечення високої оперативності контролю за наземною обстановкою з використанням іноземних КСС [5]:

- замовлення зйомки потрібних районів і об'єктів через операторів іноземних комерційних КСС;
- безпосереднє планування і реалізація національними користувачами зйомки за допомогою іноземних КА за умови придбання у власників КСС ліцензії та відповідних наземних засобів (станцій управління й прийому інформації) та ін.

При такому підході постає проблема завчасного вибору комерційних КА і планування їх цільового використання.

У зв'язку з цим та з огляду на те, що на сучасному етапі ринок космічних інформаційних послуг достатньо великий, виникає актуальне завдання щодо автоматизації процедури вибору із каталогу космічних об'єктів (КО) NORAD/NASA [6] релевантних іноземних КА, придатних для спостереження заданих районів земної поверхні в умовах обмеженого часу на спостереження та високих вимог до якості ЦІ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Окремі підходи до вибору КА для певного цільового застосування за їх просторово-часовим положенням можна знайти в роботах [7, 8, 9]. Загальні вимоги до вибору орбіт КА для задач спостереження Землі найбільш повно викладені у роботі [10]. Вирішення конкретної задачі вибору КА, придатних за їх просторово-часовим положенням, тобто за параметрами їх орбіт і орбітального руху, запропоновано в роботі [5]. Але в цих та інших роботах не вирішується завдання комплексного вибору КА за багатьма критеріями тобто вибору релевантних КА.

Виходячи з цього, метою статті є розробка математичного апарату та алгоритму автоматизованого вибору релевантних КА, придатних для оптико-електронного спостереження заданих районів Землі з урахуванням просторово-часового положення КА, просторової, спектральної та радіометричної розрізненості БЦА, а також доступності і вартості отримуваної ЦІ.

Викладення основного матеріалу. Задачу вибору релевантних КА доцільно розв'язувати з використанням теорії множин [11] за принципом максимально швидкого звуження простору пошуку, коли на перших кроках вдається відкинути найбільші за розміром завідомо неприйнятні класи (типи, види) КА.

Виходячи із цього принципу, можна рекомендувати поетапний відбір релевантних КА. При цьому на першому етапі доцільно провести попередній вибір потенційно придатних КА у такій послідовності (рис. 1):

1. Вибір із загальної множини \mathbf{K}_Σ всіх КА тих, що знаходяться у космічному просторі, тобто існуючих КА $\mathbf{K}_{існ}$ на відміну, наприклад, від створених і готових до запуску $\mathbf{K}_{гот}$ або ще тільки створюваних $\mathbf{K}_{ств}$ КА:

$$\mathbf{K}_{існ} = \langle \mathbf{K}_\Sigma \rangle, \mathbf{K}_{існ} \subset \mathbf{K}_\Sigma, \mathbf{K}_\Sigma = \mathbf{K}_{існ} \cup \mathbf{K}_{гот} \cup \mathbf{K}_{ств}, \quad (1)$$

де кутувими дужками $\langle * \rangle$ позначена операція вибору (відбору, виділення, селекції, фільтрації) із множини $*$, символ \subset означає, що множина $\mathbf{K}_{існ}$ є підмножиною загальної множини \mathbf{K}_Σ , а символом \cup позначена операція об'єднання множин (підмножин).

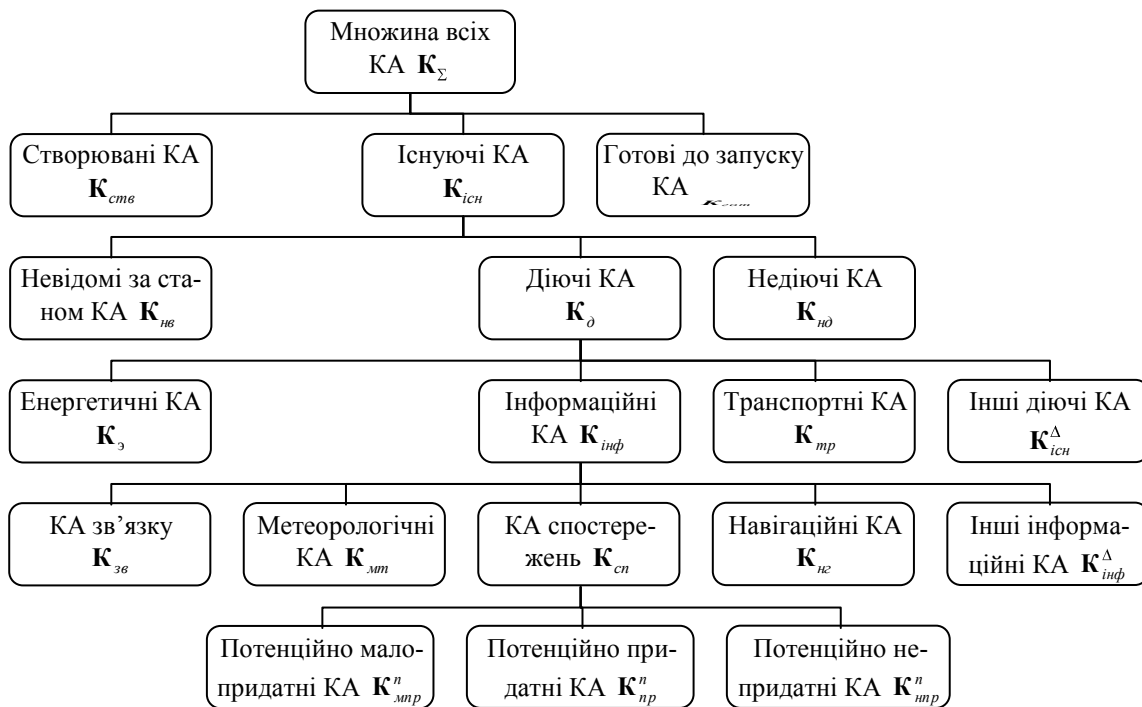


Рис. 1. Варіант загальної класифікації КА

При цьому варто врахувати, що серед існуючих КА можуть бути з одного боку діючі (∂), недіючі ($нд$) або невідомі ($нв$) за станом КА, а з іншого – інформаційні ($інф$), транспортні ($тр$), енергетичні ($е$) та інші (Δ) види КА. Тому справедливо вважати, що:

$$\mathbf{K}_{існ} = \mathbf{K}_{існ}^c \cup \mathbf{K}_{існ}^s, \mathbf{K}_{існ}^c = \mathbf{K}_\partial \cup \mathbf{K}_{нд} \cup \mathbf{K}_{нв}, \mathbf{K}_{існ}^s = \mathbf{K}_{інф} \cup \mathbf{K}_{тр} \cup \mathbf{K}_е \cup \mathbf{K}_{існ}^\Delta. \quad (2)$$

2. Вибір із множини $\mathbf{K}_{існ}^c$ діючих (активно функціонуючих на орбітах) КА \mathbf{K}_∂ , на відміну від недіючих через непрацездатність або з інших причин (вимкнені, знаходяться в резерві, закінчився ресурс тощо):

$$\mathbf{K}_\partial = \langle \mathbf{K}_{існ}^c \rangle, \mathbf{K}_\partial \subset \mathbf{K}_{існ}^c. \quad (3)$$

3. Вибір із множини $\mathbf{K}_{існ}^s$ класу інформаційних КА $\mathbf{K}_{інф}$:

$$\mathbf{K}_{інф} = \langle \mathbf{K}_{існ}^s \rangle, \mathbf{K}_{інф} \subset \mathbf{K}_{існ}^s. \quad (4)$$

4. Формування множини діючих інформаційних КА:

$$\mathbf{K}_{інф}^\partial = \mathbf{K}_\partial \cap \mathbf{K}_{інф}, \quad (5)$$

де символом \cap позначена операція перетинання множин (підмножин).

При цьому множина діючих інформаційних КА може містити підмножини КА спостереження \mathbf{K}_{cn} , КА зв'язку \mathbf{K}_{zv} , навігаційні КА \mathbf{K}_{nz} , метеорологічні КА \mathbf{K}_{mt} та ряд інших $\mathbf{K}_{inf}^{\Delta}$.

5. Вибір із множини $\mathbf{K}_{inf}^{\Delta}$ КА, призначених для спостереження Землі:

$$\mathbf{K}_{cn} = \langle \mathbf{K}_{inf}^{\Delta} \rangle, \mathbf{K}_{cn} \subset \mathbf{K}_{inf}^{\Delta}, \mathbf{K}_{inf}^{\Delta} = \mathbf{K}_{cn} \cup \mathbf{K}_{zv} \cup \mathbf{K}_{nz} \cup \mathbf{K}_{mt} \cup \mathbf{K}_{inf}^{\Delta}. \quad (6)$$

6. Вибір множини *потенційно придатних* для спостережень Землі КА \mathbf{K}_{np}^n , на відміну від *потенційно малопродатних* \mathbf{K}_{mnp}^n або *потенційно непридатних* \mathbf{K}_{mp}^n :

$$\mathbf{K}_{np}^n = \langle \mathbf{K}_{cn} \rangle, \mathbf{K}_{np}^n \subset \mathbf{K}_{cn}, \mathbf{K}_{cn} = \mathbf{K}_{np}^n \cup \mathbf{K}_{mnp}^n \cup \mathbf{K}_{mp}^n. \quad (7)$$

На *другому етапі* слід провести основний вибір *фактично придатних* КА \mathbf{K}_{np} із множини *потенційно придатних* $\mathbf{K}_{np}^n \subset \mathbf{K}_{np}$. При цьому ступінь придатності КА необхідно оцінювати за рядом принципово важливих критеріїв, які впливають із кінцевої мети вибору, а саме (рис. 2):

а) вибір КА, придатних за *просторово-часовим положенням* у космічному просторі (за параметрами орбіт).

Для цього скористаємось множиною всіх можливих типів орбіт КО (специфічних – *cn*, інших – *in*, невідомих – *nv*):

$$\mathbf{O}_{\Sigma} = \mathbf{O}_{cn} \cup \mathbf{O}_{in} \cup \mathbf{O}_{nv}, \quad (8)$$

серед яких виділимо множину специфічних орбіт КА (стаціонарні – СтО, високоеліптичні – ВЕО, сонячно-синхронні – ССО):

$$\mathbf{O}_{cn} = \text{СтО} \cup \text{ВЕО} \cup \text{ССО}, \mathbf{O}_{cn} \subset \mathbf{O}_{\Sigma}. \quad (9)$$

Як відомо, для задач видового спостереження Землі зазвичай використовують КА на ССО. В такому разі КА на таких орбітах варто обирати за правилом:

$$\text{ССО} = \langle \mathbf{O}_{cn} \rangle. \quad (10)$$

При цьому, оскільки для задач видового спостереження Землі найчастіше використовують ССО на низьких колових орбітах, процедуру подальшого вибору слід проводити за правилом:

$$\text{ССО}_{kn} = \langle \text{ССО}_k \subset \text{ССО} \rangle, \text{ССО} = \text{ССО}_e \cup \text{ССО}_k, \quad (11)$$

де $\text{ССО}_e = \text{ССО}_{ec} \cup \text{ССО}_{en}$ – множина еліптичних ССО на середніх (*ec*) та низьких (*en*) висотах;

$\text{ССО}_k = \text{ССО}_{kc} \cup \text{ССО}_{kn}$ – множина колових ССО на середніх (*kc*) та низьких (*kn*) висотах;

б) вибір КА, придатних за *функціональним призначенням* – КА *видового спостереження* Землі \mathbf{K}_{BCn} :

$$\mathbf{K}_{BCn} = \langle \mathbf{K}_{cn} \rangle, \mathbf{K}_{BCn} \subset \mathbf{K}_{cn}, \mathbf{K}_{cn} = \mathbf{K}_{BCn} \cup \mathbf{K}_{PECn} \cup \mathbf{K}_{cn}^{\Delta}, \quad (12)$$

де \mathbf{K}_{PECn} – КА радіоелектронного спостереження; \mathbf{K}_{cn}^{Δ} – інші КА цього призначення;

в) вибір КА, придатних за *типом (принципом дії) БЦА* видового спостереження $\mathbf{БЦА}_{BCn}$ (оптико-електронного $\mathbf{БЦА}_{OECn}$, радіолокаційного $\mathbf{БЦА}_{PLCn}$, фотографічного спостереження $\mathbf{БЦА}_{FCn}$ та інших типів $\mathbf{БЦА}_{BCn}^{\Delta}$). Оскільки в даній статті розглядається задача тільки оптико-електронного спостереження Землі, то далі слід діяти за алгоритмом:

$$\mathbf{БЦА}_{OECn} = \langle \mathbf{БЦА}_{BCn} \rangle, \quad (13)$$

$$\mathbf{БЦА}_{BCn} = \mathbf{БЦА}_{OECn} \cup \mathbf{БЦА}_{PLCn} \cup \mathbf{БЦА}_{FCn} \cup \mathbf{БЦА}_{BCn}^{\Delta}.$$

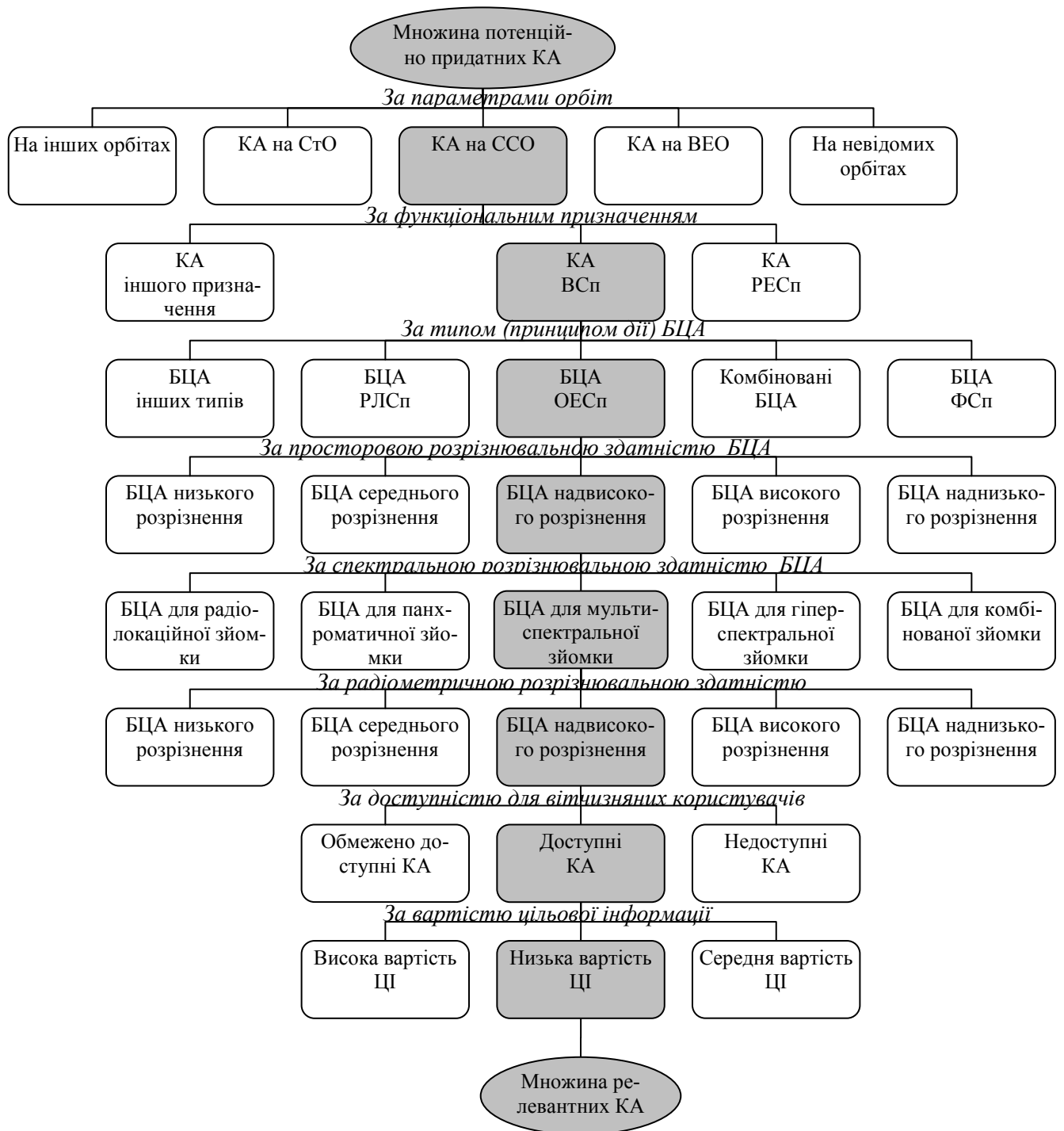


Рис. 2. Узагальнений алгоритм вибору релевантних КА

Таким чином, другий етап дозволяє однозначно вирішити певні завдання вибору придатних КА за жорсткою схемою.

На *третьому етапі* є можливість вибору за гнучкою схемою “або...або”, коли вибір здійснюється залежно від потреб і можливостей особи, що приймає рішення. На цьому етапі необхідно вибрати КА, придатні за розрізювальною здатністю БЦА оптико-електронного спостереження – просторовою $\text{БЦА}_{\text{ОЕСп}}^*$, спектральною $\text{БЦА}_{\text{ОЕСп}}^*$, радіометричною $\text{БЦА}_{\text{ОЕСп}}^*$ [12, 13, 14], а саме (рис. 2):

а) вибирати БЦА за *просторовою розрізювальною здатністю* слід із множини існуючих типів БЦА (наднизького – *нн*, низького – *н*, середнього – *с*, високого – *в*, надвисокого розрізнення – *нв*) за такою схемою:

$$\mathbf{БЦА}_{OECn}^{**} = \langle \mathbf{БЦА}_{OECn}^* \rangle, \quad \mathbf{БЦА}_{OECn}^{**} \subset \mathbf{БЦА}_{OECn}^*, \quad (14)$$

$$\mathbf{БЦА}_{OECn}^* = \mathbf{БЦА}_{OECn}^{nh} \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^h \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^c \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^e \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{ne};$$

б) вибір БЦА за *спектральною розрізнявальною здатністю* необхідно здійснювати із множини існуючих типів БЦА (панхроматичні – *пх*, мультиспектральні – *мс*, гіперспектральні – *гс*, радіолокаційні – *рл*, комбіновані – *кб*) як:

$$**\mathbf{БЦА}_{OECn} = \langle *\mathbf{БЦА}_{OECn} \rangle, \quad **\mathbf{БЦА}_{OECn} \subset *\mathbf{БЦА}_{OECn}, \quad (15)$$

$$*\mathbf{БЦА}_{OECn} = \mathbf{БЦА}_{OECn}^{пх} \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{мс} \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{гс} \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{рл} \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{кб};$$

в) вибір БЦА за *радіометричною розрізнявальною здатністю* можна здійснювати із множини існуючих типів БЦА (наднизького – *нн*, низького – *н*, середнього – *с*, високого – *в*, надвисокого розрізнення – *нв*) відповідно до правила:

$$**\mathbf{БЦА}_{OECn} = \langle *\mathbf{БЦА}_{OECn} \rangle, \quad **\mathbf{БЦА}_{OECn} \subset *\mathbf{БЦА}_{OECn}, \quad (16)$$

$$*\mathbf{БЦА}_{OECn} = \mathbf{БЦА}_{OECn}^{нн} \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^n \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^c \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^e \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{нв};$$

На основі залежностей (13)...(16) можна задавати у формалізованому вигляді правило вибору КА з установленою на ньому БЦА з необхідною розрізнявальною здатністю.

Наприклад, для реалізації детального оптико-електронного спостереження Землі може знадобитися БЦА з високим або надвисоким просторовим розрізненням, яка може здійснювати панхроматичну або мультиспектральну зйомку при високому радіометричному розрізненні, що у формалізованому вигляді можна подати як:

$$_{пх,мс}^e \mathbf{БЦА}_{OECn}^{e,ne} = \langle \mathbf{БЦА}_{OECn}^e \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{ne} \rangle \cap \langle \mathbf{БЦА}_{OECn} \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{мс} \rangle \cap \mathbf{БЦА}_{OECn} \quad (17)$$

Таким чином, на основі виразів (10)...(13) можна задавати алгоритм вибору КА, фактично придатних для *видового спостереження* Землі:

$$\mathbf{КА}_{BCn}^* = \mathbf{ССО}_{**} \cap \mathbf{БЦА}_{BCn} = \langle \mathbf{ССО}_{ec} \cup \mathbf{ССО}_{en} \cup \mathbf{ССО}_{kc} \cup \mathbf{ССО}_{kn} \rangle \cap \langle \mathbf{БЦА}_{OECn} \cup \mathbf{БЦА}_{PLCn} \rangle \quad (18)$$

В разі необхідності із множини придатних КА (18) можна виділити КА, фактично придатні тільки для *оптико-електронного спостереження* Землі:

$$\mathbf{КА}_{OECn}^* = \mathbf{ССО}_{**} \cap \mathbf{БЦА}_{OECn} = \langle \mathbf{ССО}_{ec} \cup \mathbf{ССО}_{en} \cup \mathbf{ССО}_{kc} \cup \mathbf{ССО}_{kn} \rangle \cap \mathbf{БЦА}_{OECn}. \quad (19)$$

Якщо завдання полягає у виборі КА, фактично придатних для *детального оптико-електронного спостереження* Землі, то на основі формул (11) та (17) із виразу (19) можна задати такий алгоритм:

$$\mathbf{КА}_{OECn}^{\delta} = \mathbf{ССО}_{kn} \cap \langle \mathbf{БЦА}_{OECn}^e \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{ne} \rangle \cap \langle \mathbf{БЦА}_{OECn} \cup \mathbf{БЦА}_{OECn}^{мс} \rangle \cap \mathbf{БЦА}_{OECn} \quad (20)$$

Подібним чином можна формувати будь-які множини КА, фактично придатних для вирішення поставлених завдань.

На *четвертому етапі* необхідно здійснити вибір фактично придатних КА, цільова інформація з яких доступна для вітчизняних користувачів $\mathbf{ЦІ}_{\delta}$, на відміну від малодоступної $\mathbf{ЦІ}_{md}$ або недоступної $\mathbf{ЦІ}_{nd}$:

$$\mathbf{ЦІ}_{\delta}^* = \langle \mathbf{ЦІ}_{*}^* \rangle, \quad \mathbf{ЦІ}_{*}^* = \mathbf{ЦІ}_{\delta}^* \cup \mathbf{ЦІ}_{md}^* \cup \mathbf{ЦІ}_{nd}^*. \quad (21)$$

Цей вибір слід робити з огляду на тип і призначення КА, їх державну приналежність, поточну міжнародну обстановку, астрономо-балістичні та фізичні умови спостережень, стан наземних засобів та умови передачі ЦІ на них і т. д.

На *п'ятому етапі* варто провести вибір КА, прийнятних за вартістю цільової інформації $\mathbf{ЦІ}_{*}^{+}$, на відміну від малоприйнятних $\mathbf{ЦІ}_{*}^0$ та неприйнятних $\mathbf{ЦІ}_{*}^{-}$:

$$\mathbf{ЦІ}_{*}^{+} = \langle \mathbf{ЦІ}_{*}^* \rangle, \quad \mathbf{ЦІ}_{*}^* = \mathbf{ЦІ}_{*}^{+} \cup \mathbf{ЦІ}_{*}^0 \cup \mathbf{ЦІ}_{*}^{-}. \quad (22)$$

Для цього можна скористатись каталогами цін на космічні знімки, залежно від їх детальності, знятої площі, давності спостережень і т. п.

На *шостому етапі* необхідно сформувану шукану множину релевантних КА. Для цього можна скористатись однією із формул (18), (19) або (20) та врахувати правила (21) і (22).

Наприклад, для видового спостереження Землі ця множина матиме вигляд:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{BCn}^* = \mathbf{C}\mathbf{C}\mathbf{O}_{**} \cap \mathbf{B}\mathbf{C}\mathbf{A}_{BCn} \cap \mathbf{C}\mathbf{I}_{**}^*, \quad (23)$$

а для оптико-електронного спостереження:

$$\tilde{\mathbf{K}}_{OECn}^* = \mathbf{C}\mathbf{C}\mathbf{O}_{**} \cap \mathbf{B}\mathbf{C}\mathbf{A}_{OECn} \cap \mathbf{C}\mathbf{I}_{**}^*. \quad (24)$$

При цьому у формулах (23) та (24) бажано забезпечити вимогу:

$$\mathbf{C}\mathbf{I}_{**}^* = \mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^* \cap \mathbf{C}\mathbf{I}_{**}^+ = \mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^+. \quad (25)$$

Якщо в реальних умовах вимогу (25) виконати не можливо, то її можна послабити за рахунок вартості, наприклад, за такими правилами:

$$\mathbf{C}\mathbf{I}_{**}^* = \mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^* \cap \mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^0 = \mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^0 \text{ або } \mathbf{C}\mathbf{I}_{**}^* = \mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^* \cap (\mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^+ \cup \mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^0) \supseteq \mathbf{C}\mathbf{I}_{\delta}^{+,0}. \quad (26)$$

У подальшому після формування підкаталогу КА, придатних за критеріями (1)...(26), можна на основі моделювання процесів і явищ в КСС за допомогою відповідних програмно-технічних засобів оцінити просторово-часове положення КА відносно наземних об'єктів (НО) спостереження і наземних пунктів (НП) прийому ЦІ та прийняти раціональне рішення щодо остаточного вибору КА з огляду на задану якість ЦІ та оперативність її отримання.

Таким чином, вирази (1)...(26) є специфічним оригінальним математичним апаратом, на основі якого можна вирішувати конкретні завдання вибору релевантних КА із заданої їх множини. Очевидно, що такі завдання є достатньо складними, що потребує поетапного багатокрокового ітераційного підходу [5], а це, в свою чергу, потребує алгоритмізації та комп'ютерного моделювання відповідних процесів на кожному кроці.

Відповідно до цього пропонується алгоритм автоматизованого вибору релевантних КА для оптико-електронного спостереження (дистанційного зондування) заданих районів Землі.

Сутність цього алгоритму можна описати такими кроками (рис. 3):

1. Формування каталогу КО оператора із загальної множини КО (8), які зареєстровані в міжнародному каталозі *NORAD/NASA* у вигляді:

$$\mathbf{O}_{\Sigma} = \mathbf{O}_{cn} \cup \mathbf{O}_{in} \cup \mathbf{O}_{in} \text{ при } TLE = 0 \vee 1, \quad (27)$$

де *TLE* – бінарна ознака наявності або відсутності *TLE-файлів* для конкретного КО у загальній їх множині:

$$TLE = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \text{існує файл } TLE; \\ 0, & \text{якщо } \text{немає файлу } TLE. \end{cases} \quad (28)$$

При цьому в процесі формування каталогу КО оператора проводиться аналіз поточних змін у складі КО та оновлення даних у цьому каталозі.

Зауважимо, що у каталозі *NORAD/NASA* [6] зареєстровані тільки існуючі КА на відміну від створюваних або створених і готових до запуску (рис. 1). Тому сам факт використання інформації цього каталогу уже є класифікаційною ознакою для вибору множини існуючих КА \mathbf{K}_{icn} за правилом (1).

2. Аналіз каталогу КО оператора та формування бази даних КА за бінарною ознакою $TLE = 1$:

$$\mathbf{O}'_{\Sigma} = \mathbf{O}_{cn} \cup \mathbf{O}_{in} \text{ при } TLE = 1. \quad (29)$$

3. Вибір із бази даних (29) тих КА, які знаходяться на низьких колових ССО, тобто формування підмножини $\mathbf{C}\mathbf{C}\mathbf{O}_{in}$ за правилом (11).

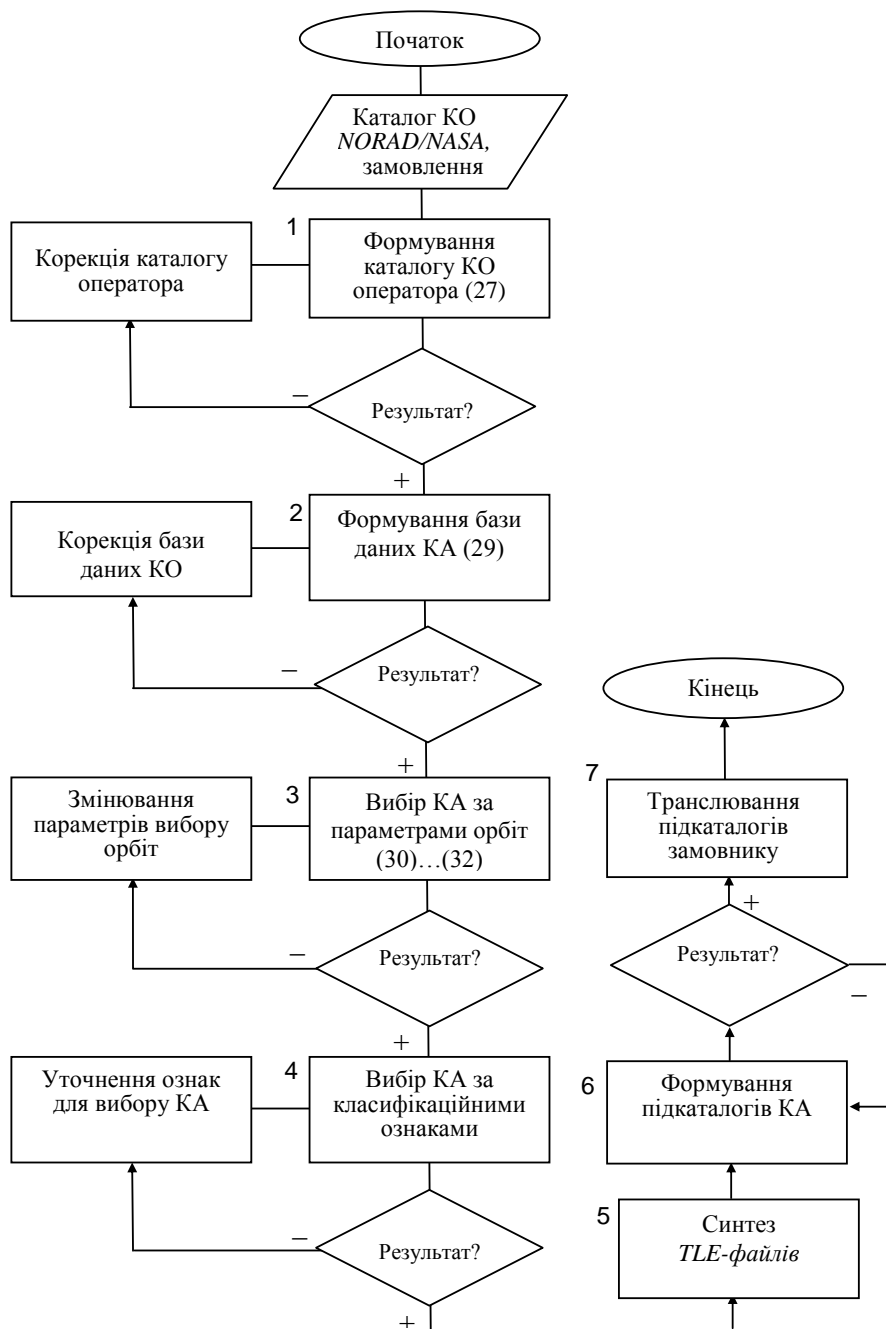


Рис. 3. Алгоритм автоматизованого вибору релевантних КА

При цьому, відповідно до формалізованого опису специфічних орбіт КА [5], послідовність операцій вибору КО на $CCO_{ки}$ може бути такою:

а) вибір множини CCO із бази даних (29) за правилом:

$$CCO = \langle O_{en} \subset O'_{\Sigma} \rangle = e_{cco} \cap i_{cco} \cap T_{cco}, \tag{30}$$

де e_{cco} – множина CCO будь-якої форми (за ексцентриситетом); i_{cco} – множина будь-яких CCO за нахиленням орбіти; T_{cco} – множина періодів обертання КА на CCO будь-якої форми;

б) вибір із множини (30) CCO на колових орбітах на будь-яких висотах із діапазону допустимих:

$$CCO_k = \langle CCO \rangle = e_{cck} \cap i_{cck} \cap T_{cck}, \tag{31}$$

де e_{cck} – множина колових CCO (за ексцентриситетом); i_{cck} – множина колових CCO за нахиленням орбіти; T_{cck} – множина періодів обертання КА на колових CCO .

в) вибір із множини (31) колових CCO на низьких орбітах:

$$CCO_{\text{кн}} = \langle CCO_{\text{к}} \rangle = CCO_{\text{к}} \cap H_{\text{н}}, \quad (32)$$

де $H_{\text{н}} = \{H \mid 300 \leq H \leq 2000\}$ – множина низьких орбіт.

Отже, як бачимо, класифікаційною ознакою для вибору КА на ССО є параметри орбіт КА, взяті із TLE-файлів кожного КА із підмножин (27)...(32). При цьому граничні значення елементів даних підмножин можна вибирати на підставі гістограм фактичної щільності розподілу КО за формою, нахиленням та періодом обертання (висотою) орбіти [5]. При надходженні нових даних про КО до каталогу NORAD/NASA може здійснюватися корекція діапазонів змін орбітальних параметрів.

4. Формування класифікаційних ознак для подальшого вибору потрібних КА із множини (32). При цьому, відповідно до поставленої мети, на основі загальної класифікації КА (рис. 1) необхідно обрати:

- за станом (за режимом роботи) – діючі КА;
- за видом – інформаційні КА;
- за класом – КА спостереження.

Крім того, на основі узагальненого алгоритму (рис. 2) слід обрати:

- за функціональним призначенням – КА видового спостереження;
- за типом (принципом дії) БЦА – КА оптико-електронного спостереження.

Ідентифікацію КА за цими ознаками можна здійснювати на основі інформації із відкритих джерел інформації, а також на основі отриманих на 3-му кроці TLE-файлів.

Формування класифікаційних ознак для вибору КА за розрізняльною здатністю БЦА доцільно здійснювати на підставі розрахунку ймовірності правильного дешифрування об'єктів на космічних зображеннях, яка описується модифікованою формулою Живичина [15]:

$$P_0 = \exp \left\{ \frac{\ln \alpha}{\lg \left[\frac{K + K_0}{K - K_0} \right] \left(\frac{d}{d_0} \right)^2} \right\}, \quad (33)$$

де K_0 – радіометричний контраст об'єкта на зображенні (для КСС, як правило, вибирається $K_0 \approx 0,2$ [16]); α – заданий рівень достовірності (як правило приймається $\alpha \approx 0,8..0,9$ [16]); d_0 – характерна деталістність об'єктів зйомки, потрібна для їх виявлення (обирається із таблиць для типових об'єктів [17]); d – просторова розрізненість БЦА (надається в комерційних пропозиціях операторів КСС [18]).

При цьому вважається, що для правильного дешифрування об'єктів необхідно забезпечувати $P_0 \geq 0,8$. Відомості щодо технічних характеристик БЦА, які забезпечують виконання цієї вимоги можна знайти із відкритих джерел інформації та конкретних пропозицій операторів іноземних КСС.

Таким же чином, можна знайти інформацію щодо доступності ЦІ від іноземних КА для вітчизняних споживачів, а також щодо її вартості.

Результатом виконання даного кроку алгоритму є множина TLE-файли релевантних КА оптико-електронного спостереження, які знаходяться на колових низьких ССО, задовольняють вимогам до якості, доступності та вартості ЦІ.

При надходженні нових даних про КО до каталогу NORAD/NASA, а отже і нових TLE-файлів, отриманих на 3-му кроці алгоритму, здійснюється корекція ознак для вибору потрібних КА.

5. Синтез TLE-файлів обраних КА.

На даному кроці алгоритму здійснюється формування одного (цілісного) підкаталогу (файлу), обраних КА із різних TLE-файлів, отриманих після виконання 4-го кроку.

6. Формування підкаталогів КА (групи синтезованих TLE-файлів).

7. Транслявання підкаталогів замовнику.

Висновки. Запропонований математичний апарат і розроблений на його основі алгоритм автоматизованого вибору релевантних КА дозволяє вирішувати цілий ряд практичних завдань. При цьому використання запропонованого алгоритму забезпечує суттєве підвищення оперативності формування замовлень на придбання достовірної ЦІ заданого складу прийнятної вартості від доступних іноземних КА комерційного призначення.

Список використаної літератури:

1. Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2008–2012 роки, затверджена Законом України від 30 вересня 2008 року N 608-VI [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon1.rada.gov.ua>
2. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 березня 2011 р. № 238-р. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon1.rada.gov.ua>
3. Энциклопедия поисковых систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.glossary.ru/cgi-bin/gl_sch2.

4. Компания “Совзонд” – точный взгляд на мир : сб. статей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.sovzond.ru.
5. Фриз П.В. Возможный підхід до формалізованого опису специфічних орбіт космічних апаратів у задачах спостереження Землі / П.В. Фриз, О.М. Кондратов // Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем : зб. наук. праць. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2011. – Вип. 5. – С. 147–157.
6. NORAD Two-Line Element Sets Current Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://celestrac.com/NORAD/documentation/tle-fmy.htm>.
7. Скребушевский Б.С. Формирование орбит космических аппаратов / Б.С. Скребушевский. – М. : Машиностроение, 1990. – 256 с.
8. Попович П.Р. Баллистическое проектирование космических систем / П.Р. Попович, Б.С. Скребушевский. – М. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
9. Лебедев А.А. Космические системы наблюдения. Синтез и моделирование / А.А. Лебедев, О.П. Нестеренко. – М. : Машиностроение, 1991. – 224 с.
10. Фриз П.В. Основи орбітального руху космічних апаратів : навч. посібник / П.В. Фриз. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2008. – 268 с.
11. Большой энциклопедический словарь. Математика / глав. ред. Ю.В. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Большая Российская энциклопедия, 2000. – 848 с.
12. Буритинська Х.В. Аерокосмічні знімальні системи : навч. посібник / Х.В. Буритинська, С.А. Станкевич. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 292 с.
13. Кохан С.С. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи : підручник / С.С. Кохан, А.Б. Востоков. – К. : Вища школа, 2009. – 511 с.
14. Манойлов В.П. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації : монографія / В.П. Манойлов, В.В. Омельчук, В.В. Опанюк. – Житомир : ЖДТУ, 2008. – 384 с.
15. Станкевич С.А. Уточнення відомої емпіричної формули оцінки імовірності правильного дешифрування об'єктів на аерокосмічному зображенні / С.А. Станкевич // Праці Наукового центру ВПС України. – Вип. 7. – К. : НЦ ВПС, 2004. – С. 242–246.
16. Ребрин Ю.К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. – КВВАИУ, 1988. – 450 с.
17. Техника получения изображений высокой четкости // Иностранная печать об экономическом, научно-техническом и военном потенциале государств-участников СНГ и технических средствах их выявления. Серия: Технические средства разведывательных служб капиталистических государств // ЕИБ ВИНТИ. – 1996. – № 1. – С. 15–18.
18. [Электронный ресурс]. – Режим доступа : www.dniprokosmos.ua/ua/services-and-products/landsat-images-of-sich-2.

ФРИЗ Петро Васильович – кандидат технічних наук, доцент, заслужений працівник освіти України, професор кафедри Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання процесів у складних технічних системах.

КОНДРАТОВ Олександр Михайлович – заступник начальника науково-дослідного відділу військової частини А1906, здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук ЖВІ НАУ.

Наукові інтереси:

– моделювання процесів у складних технічних системах.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2012

Фриз П.В., О.М. Кондратов Алгоритм автоматизованого вибору релевантних космічних апаратів для оптико-електронного спостереження заданих районів Землі

Фриз П.В., Кондратов А.М. Алгоритм автоматизированного выбора релевантных космических аппаратов для оптико-электронного наблюдения заданных районов Земли

Frees P.V., Kondratov A.M. Algorithm of automated selection of relevant spacecrafts intended for optoelectronic surveillance of the given areas on the earth surface

УДК 629.7:001.57.001.63

Алгоритм автоматизированного выбора релевантных космических аппаратов для оптико-электронного наблюдения заданных районов Земли / П.В. Фриз, А.М. Кондратов

В статье предлагается алгоритм автоматизированного выбора доступных космических аппаратов (КА) оптико-электронного наблюдения Земли из каталога NORAD/NASA, пригодных для съемки заданных районов земной поверхности в условиях ограниченного времени на наблюдение и при заданных требованиях к качеству целевой информации (ЦИ). Использование предложенного алгоритма позволит повысить оперативность формирования заказов на приобретение достоверной ЦИ заданного состава приемлемой стоимости от доступных иностранных КА коммерческого назначения.

УДК 629.7:001.57.001.63

Algorithm of automated selection of relevant spacecrafts intended for optoelectronic surveillance of the given areas on the earth surface / P.V. Frees, A.M. Kondratov

The algorithm of automated selection of available spacecrafts as means of optoelectronic Earth surveillance based on the NORAD/NASA catalog is offered. These spacecrafts are useful for imaging given areas on the Earth surface under the limited time frame conditions and proceed from requirements to defined mission information quality. The application of the offered algorithm allows to minimize time needed to fulfill orders on tailored, costsufficient, reliable defined mission information from available commerce foreign spacecrafts.