

УДК 621.396.77

Д.П. Пашков

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ

МЕТОДИКА ВИБОРУ ШИРИНИ ОПТИМАЛЬНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ У КОСМІЧНИХ СИСТЕМАХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

У статті запропоновані шляхи визначення оптимальної ширини спектрального каналу для бортових пристроїв космічних апаратів оптико-електронного спостереження. Представлені результати досліджень дозволяють визначити ширину спектральних каналів оптимальною по визначеним параметрах. Застосування запропонованих рішень дозволить полегшити розпізнавання необхідних об'єктів.

Ключеві слова: оптико-електронні системи, спектральний інтервал, космічна система спостереження.

Вступ

Україна визначила космічну галузь як пріоритетний напрям, що підтверджується ухваленням Концепції реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року та виконанням Національної цільової науково-технічної космічної програми України на 2013-2017 роки [1, 2]. Основними напрямками Концепції та космічної програми є розвиток Національної системи дослідження Землі з космосу [1, 2]. Застосування космічних систем (КС) дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) на основі використання космічних апаратів (КА) оптико-електронного спостереження (ОЕСп) дозволяє вирішувати завдання, що пов'язані із розпізнаванням об'єктів, визначати його координат на поверхні Землі, а також можливості картографувати місцевість. При цьому постійно підвищуються вимоги до роздільної здатності, достовірності отриманої інформації і часу доставлення знімків з КА на наземний інформаційний комплекс (НІК), що сприяє розвитку технологій побудови бортового спеціального комплексу (БСК) КА ОЕСп, а також технічних засобів передачі даних (знятих знімків) на НІК, що визначило актуальність вибраної теми досліджень.

Аналіз літератури. У працях відомих світових і вітчизняних вчених і фахівців [3 – 6] досить детально розглянуті особливості побудови і функціонування КС ОЕСп. При цьому аналіз сучасних технологій побудови оптико-електронних систем (ОЕС) показав, що одним із перспективних напрямів для розпізнавання об'єктів є використання відеоспектральної зйомки [3, 6]. Проте у разі застосування відеоспектрометрів виникає комплекс завдань через різке збільшення об'єму зображення, пов'язано із реєстрацією, запам'ятовуванням і передачею інформації з БСК КА на НІК. Виникає протиріччя, що полягає з одного боку у збільшенні обсягу інформації багатоспектральних зображень, отримуваних від відеоспектрального пристрою, а з іншого боку обмеженості обсягу передавання даних у радіоканалі на НІК у реальному масштабі часу.

Постановка завдання. Одним з напрямків можливості здійснення оперативного розпізнавання

об'єктів в багатоспектральному зображенні є визначення необхідних даних, що безпосередньо пов'язані з об'єктом спостереження та передача їх по радіоканалу на НІК. Тому виникає завдання, що пов'язано із формуванням зображення на бортовому спеціальному комплексі КА в реальному масштабі часу для доставлення його на НІК.

Мета статті. Вирішення цієї проблеми можливо за допомогою виділення спектральних ознак необхідного об'єкту, що пов'язано з визначенням оптимальної ширини спектрального інтервалу каналу. Таким чином, метою статті є розробка методики вибору ширини оптимальних спектральних каналів у космічних системах оптико-електронного спостереження.

Виклад основного матеріалу дослідження

В основу виявлення об'єкту спостереження покладене те, що поле випромінювання його несе різноманітну інформацію про їх властивості від прямого, відбитого або розсіяного в атмосфері випромінювання Сонця і власного теплового випромінювання [3, 4, 6]. Оскільки характер взаємодії випромінювання з речовиною значною мірою визначається довжиною хвилі (частотою) випромінювання, то вибір спектральних ділянок (діапазонів) зондування є вирішальним для будь-якої схеми спостереження за об'єктом. Однак найбільш цікавим і найбільш складним є завдання вибору ділянок спектра (спектральних каналів) у системах спостереження, коли основна одержувана інформація має багатоспектральний характер (для розпізнавання об'єкта для визначення координат за спектральними характеристиками).

Вибір спектральної ширини каналу і його діапазону базується на інформативності спектральних вимірювань щодо характеристик досліджуваного об'єкта. Кількісне оцінювання інформативності, у свою чергу, пов'язане з можливістю певною мірою відновити характеристики досліджуваного об'єкта за безпосередньо спостережуваними величинами, тому під час проведення досліджень необхідно визначити інформативність спектральних даних об'єктів спостереження.

Кількісна оцінка інформативності спектрального об'єкта випромінювання пов'язана зі знаходженням його характеристик. При цьому, розбудовуючи метод інформаційного аналізу зворотних задач спостереження при квадратичних апіорних обмеженнях, одержимо інформативність кожного такого незалежного фрагмента, оцінювану числом λ_a , і сумарну інформативність об'єкта спостереження, що виражена деякою симетричною функцією чисел $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$. Так, кількість інформації буде описана як [3, 6]:

$$I(x, y) = \frac{1}{2} \sum_{a=1}^r \log(1 + \lambda_a). \quad (1)$$

Таким чином, із точного кількісного формулювання завдання спостереження як зворотної задачі відновлення характеристик досліджуваного об'єкта за спектральними даними випливає, що для розпізнавання об'єкта за спектральними ознаками необхідно виділити певну апіорну інформацію про припустимі стани об'єкта, що характеризує конкретні кількісні його характеристики. Саме тому необхідно провести вибір спектральних ділянок об'єкта спостереження, коли основна інформація про стан об'єкта міститься в залежності спостережуваної яскравості від положення лінії візування, тоді як залежність від довжини хвилі (частоти) випромінювання має параметричний характер. Щоб розв'язати завдання розпізнавання об'єкта та визначення його координати, необхідно вибрати три ділянки спектра [5, 7]. Цей підхід полягає в такому. Застосовуючи лінеаризацію, одержуємо лінійне інтегральне рівняння у вигляді [7, 8]:

$$\varphi_\lambda(h) = \int A_\lambda(h, p)x(p)dp, \quad (2)$$

де $x(p)$ – висотний профіль поглинаючої або розсіювальної компоненти; $\varphi_\lambda(h)$ – висотний профіль поглинаючої або розсіювальної компоненти λ ; $A_\lambda(h, p)$ – вагова функція, параметрично залежна від довжини хвилі випромінювання λ .

Передбачається, що сканування поверхні проводиться досить вузьким полем у вузькому спектральному інтервалі, тому компоненту корисного сигналу можна записати у вигляді [6 – 8]:

$$z_j = k_j \varphi_\lambda(h_j), \quad (3)$$

де k_j – множник, що характеризує абсолютну чутливість фотометричної системи, зокрема до його складу входить ефективний фотометричний інваріант.

Під час застосування математичного апарату обчислення кількості інформації $I(x, y)$, що міститься у яскравісному розрізі компонента об'єкта, який зацікавив, результат буде залежати від фіксованої довжини хвилі λ .

Далі проводять аналіз інформаційного змісту та інформаційної забезпеченості випромінювань за допомогою виразу (1). Цей підхід наочний та особливо корисний, коли мова йде про вибір одного вузького спектрального інтервалу зондування із заздалегідь відо-

мою шириною діапазону. При цьому для розпізнавання об'єкта необхідний вибір трьох спектральних каналів довільної ширини, тому пропонуються методи оптимального вибору спектральних каналів як при фіксованій, так і при змінній (довільній) ширині [8]. Основною складністю для вибору оптимальної ширини спектрального каналу є вимога, пов'язана із гранично високим спектральним розрізненням вимірювальної апаратури. Для вибору спектральної ширини фіксованого каналу в роботі використовувався підхід, що передбачає можливість забезпечити розумну точність реєстрації випромінювання в кожному окремому спектральному інтервалі. При цьому необхідно вибирати досить невелику кількість каналів (до 3) у спектральному діапазоні (для необхідного варіювання), що є цікавим для розглянутого завдання спостереження. Діапазон розбивають на ділянки необхідної ширини, і вибір каналів може бути розглянутий як вибір “відлікових точок” у спектрі випромінювання, тобто [8]:

$$z_j = k\varphi(v_j), \quad j=1,2,\dots,n, \quad (4)$$

$$\text{або} \quad K_{ji} = w_i k A(v_j, p_i), \quad i=1,2,\dots,m, \quad (5)$$

тобто матриця основного оператора зворотної задачі формується безпосередньо з вагових функцій $b_j(p) = A(v_j, p)$, що характеризують внесок вимірюваного параметра (температури, вологості і т.д.) на рівні p у випромінювання на частоті v_j . Очевидно, що внесок кожної окремої відлікової точки v_{j0} в загальну інформативність тим більший, чим менша лінійна залежність відповідної вагової функції $b_{j0}(p)$ від інших. Хоча зі збільшенням n точність розв'язання завдання безупинно зростає, внесок кожної наступної відлікової точки в загальну інформативність експерименту, починаючи з деякого n^* , швидко зменшується, тому необхідно враховувати складність і вартість системи спостереження. При цьому як критерій оптимізації вимірювальної системи використано кількість інформації Шеннона

$$\tilde{I}(x, y) \Rightarrow \max. \quad (6)$$

Критерій (6) досить складний для безпосереднього обрахування (необхідно щоразу обчислювати визначник порядку n), тому в роботі реалізований послідовний вибір відлікових точок, коли величину $\tilde{I}(x, y)$ обчислюють на кожному етапі як функцію однієї чергової відлікової точки за умови, що “оптимальні” точки, обрані раніше, фіксовані. У результаті кожної серії розрахунків фіксується положення чергової точки, для якої величина $\tilde{I}(x, y)$ максимальна. Цей алгоритм дозволяє вибирати до 10 відлікових точок у широкому діапазоні частот. У разі послідовного виборі n каналів із загальної кількості N можливих положень кожного каналу критерій обчислюють усього $nN - n(n-1)/2$ разів.

Зростання інформативності у разі розширення спектральних каналів привело до висновку, що у процесі оптимізації необхідно варіювати не тільки

положення каналів, а й ширину спектральних каналів, тому в роботі досліджений вибір спектральних каналів змінної ширини. Як зазначено вище, прагнення використовувати в системах зондування гранично вузькі спектральні інтервали викликано бажанням забезпечити максимальну незалежність вагових функцій, що відповідають до окремим вимірюванням. У той же час звуження каналів зменшує відношення сигнал/шум у кожному окремому каналі та як наслідок погіршує можливість відновлення шуканих параметрів об'єкта. Отже, має існувати оптимальна ширина спектрального інтервалу, коли погіршення компенсується збільшенням корисного сигналу.

Для пошуку оптимальних значень параметрів використовувалася програма безградієнтної мінімізації. Залежність кількості одержуваної інформації від кількості каналів виявила тенденцію до насичення. Такий максимум повинен існувати завжди, тому що передбачається, що зі збільшенням кількості каналів рівень шуму (дисперсія) у кожному каналі зростає пропорційно до кількості каналів. Це відповідає умові, що сумарний час вимірювання зі збільшенням кількості каналів не збільшується і канали опитуються по черзі.

Усі оптимальні конфігурації мають широкі області спектральної чутливості, кожна з яких займає значну частину смуги. При цьому порівняння з діючими радіометрами, що мають вузькі смуги (до 1 Гц), виявило значну перевагу оптимальних систем (за кількістю інформації). Оптимізація смуги каналу полягає у використанні неспеціалізованого алгоритму пошуку максимуму цільової функції. Це спричиняє істотні обчислювальні труднощі, перешкоджаючи застосуванню на практиці. У той же час обчислювальні труднощі, пов'язані з пошуком оптимуму за критерієм (6), можуть бути ефективно подолані на основі методів, розвинутих у теорії планування експериментів. Відмінною рисою завдання планування експерименту в постановці Кіфера є можливість управління точністю кожного окремого вимірювання. При цьому необхідне виконання двох основних умов [6, 9]:

1. Функцію чутливості $a_j(v)$ для кожного каналу вибирають з деякого сімейства функцій чутливості, визначених із точністю до невідомих параметрів

$$a(v) = a(v, q), \quad q = (q_1, \dots, q_k). \quad (7)$$

Таким чином, функцію чутливості j -го каналу можна одержати, фіксуючи певним чином значення зазначених параметрів

$$a_j(v) = a(v, q^{(j)}). \quad (8)$$

2. Критерій оптимізації $\phi(G)$ повинен бути опуклою функцією матриці G , що визначає "первинні" інформаційні властивості об'єкта. Друга із цих умов виконується для всіх критеріїв оптимізації.

Структура каналів (8) задавалася у вигляді "спектрального вікна" [6, 9]:

$$a_j(v) = \begin{cases} 1, & v_j \leq v \leq v_j + \Delta_j; \\ 0, & v < v_j, v \leq v_j + \Delta_j, \end{cases} \quad (9)$$

де параметри v_j, Δ_j , визначають положення і ширину кожного каналу. Застосовувалася ітераційна процедура В.В. Федорова, модифікована для врахування апріорної статистичної інформації та заданих критеріїв. Суть цієї процедури полягає в тому, що на кожному кроці відшукують максимум деякої функції $g(v, \Delta)$, що залежить від поточного спектра каналу. При цьому за рахунок умови нормування $\sum p_j = 1$ включення нового каналу спричиняє, убування ваг для каналів. У результаті послідовних ітерацій і "заохочення" вдалих каналів їх вага наближається до деяких стаціонарних значень, тоді як вага "зайвих" каналів, що потрапили у вибірку на окремих етапах процесу, наближається до нуля. Можна показати, що в ідеальному випадку зазначена процедура дає оптимальний алгоритм відповідно до обраного критерію чутливості каналів (7). В обчислювальному відношенні зазначена процедура поєднує переваги послідовного вибору (на кожній ітерації вибирають тільки один канал) з оптимальністю результату, який відповідає повному перебору. Деякі труднощі виникають на заключних етапах: необхідно "вичистити" "залишки" зайвих каналів і перерозподілити відповідним чином ваги.

Крім цього, необхідно розглянути особливості оптимального вибору спектральних каналів довільної структури. Це можливо зробити наступним чином. Основне обмеження строгих методів оптимізації полягає в апріорній регламентації структури каналів (див. (7)), тобто більш-менш довільному звуженні класу вимірювальних систем, у якому відбувається пошук оптимуму.

У той же час структура каналів повинна бути погоджена зі структурою тих варіацій спектрів випромінювання, які несуть корисну інформацію про вимірювані параметри. Таким чином, цілком природно відмовитися від параметричного виразу (8) і шукати оптимальні системи в максимально широкому класі спектральних приладів, канали яких підкоряються тільки обмеженню

$$0 \leq a(v) \leq 1. \quad (10)$$

На відміну від виразу (7) обмеження (10) непараметричне і має очевидний фізичний зміст: енергія випромінювання в кожному спектральному інтервалі не зростає під час проходження через оптичну систему відеоспектрометра.

При цьому встановлена властивість спектральних каналів оптимальної системи як

$$a(v)[1 - a(v)] \equiv 0, \quad (11)$$

тобто функція пропускання $a(v)$ кожного з каналів оптимальної системи має лише два значення: нуль або одиницю. Тоді вихідним кроком буде співвідношення квадратурної апроксимації, що пов'язує спектральний розподіл $\phi(v)$ випромінювання з вектором x стану зондувального об'єкта

$$\phi(v) = \sum_{i=1}^m \omega_i A(v, p_i) x_i, \quad v \in [v_1, v_2]. \quad (12)$$

Із (12) передбачається виключення величин, що належать до номінального (середнього) стану. За допомогою розподілу (12) і матриці апіорних коваріацій вектора x може бути обчислена коваріаційна функція спектрів випромінювання

$$D^*(v, v^*) = E\varphi(v)\varphi(v^*) = \sum_{i,k=1}^m \omega_i \omega_k A(v, p_i) A(v, p_k) D_{ik}, \quad (13)$$

де $\{D_{i,k}\}$ – елементи матриці D .

Далі для параметризації спектрів випромінювання використовувалося відоме розкладання Карунена-Лоєва, обумовлене за допомогою власних функцій коваріаційного оператора

$$\int_{v_1}^{v_2} D^*(v, v') U_k(v') dv' = \lambda_k U_k(v), \quad k=1,2,\dots,m. \quad (14)$$

Тут $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$ – властиві числа, упорядковані у порядку убуття, $U_1(v), \dots, U_m(v)$ – відповідні властиві функції. Сама параметризація спектрів проводилася в усіченій формі

$$\varphi(v) = \sum_{k=1}^n \Theta_k U_k(v), \quad n \leq m, \quad (15)$$

де початковий порядок апроксимації $n = n_1$ вибирається з умови

$$n_1 = \min n : \left\{ \max [D^*(v, v) - \sum_{k=1}^n \lambda_k [U_k(v)]^2]^{1/2} \leq \varepsilon \right\}, \quad (16)$$

де ε – необхідна точність апроксимації.

Умова (16) гарантує певну “рівномірну” точність апроксимації, однак за наявності втрат потенційно інформативних, але вузьких ділянок спектра.

Параметри $\Theta_1, \dots, \Theta_n$ можуть бути обрані як нові параметри зворотної задачі, оскільки інформативність будь-якого об'єкта, оцінена стосовно нових параметрів при якомусь $n = n^*$, збігається з інформативністю вихідних параметрів (x_1, \dots, x_m) .

При цьому розрахунки обмежуються оптимізацією рівноточної насиченої кількості невідомих, що дорівнює кількості вимірюваних величин.

МЕТОДИКА ВИБОРУ ШИРИНИ ОПТИМАЛЬНИХ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ У КОСМІЧНИХ СИСТЕМАХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Д.П. Пашков

В статті пропонується шлях визначення оптимальної ширини спектрального каналу для бортових пристроїв космічних апаратів оптико-електронного спостереження. Представлені результати досліджень, що дозволяють визначити ширину спектральних каналів оптимально по вибраним параметрам. Застосування отриманих рішень дозволяє спростити визначення необхідних об'єктів.

Ключевые слова: оптико-електронные системы, спектральный интервал, космическая система наблюдения.

METHOD FOR CHOOSING OPTICAL SPECTRAL CHANNELS WIDTH IN SATELLITE SYSTEMS FOR OPTICAL-AND-ELECTRONIC SURVEY

D.P. Pashkov

This article proposes ways of optimal spectral channel width determination for space vehicles on-board devices for optical-and-electronic survey. The research results enable determination of spectral channels optimal width relative to preset parameters are presented. The application of these solutions will simplify determination of necessary objects.

Keywords: optical-and-electronic systems, spectral range, satellite survey system.

Висновки

Таким чином, у статті запропоновано підхід до вибору спектральних каналів у багатоспектральних системах, які залежать від певного рівня апіорної інформації про шукані характеристики об'єкта спостереження, що дозволить вирішити завдання їх розпізнавання та визначити їх місцезнаходження. Окрім цього, необхідне урахування сезонних і географічних прив'язок оптимальних систем, а також дослідження їх стійкості до сезонних і географічних варіацій апіорної статистики.

Список літератури

1. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року. – К.: ДКА України, 2012. – 48 с.
2. Закон України від 5 вересня 2013 р. № 439-VII «Загальнодержавна цільова науково-технічна космічна програма України на 2013-2017 роки».
3. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования / У.Г. Рис. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
4. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
5. Чандра А.М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А.М. Чандра, С.К. Гош. – М.: Техносфера, 2008. – 312 с.
6. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / [В.І. Лялько, О.Д. Федоровський та ін.]. – К.: Наук. думка, – 2006. – 357 с.
7. Космічні системи дистанційного зондування Землі подвійного призначення / І.Д. Варламов, В.В. Зуйко, А.М. Козуб, Д.П. Пашков. – К.: НУОУ, 2014. – 196 с.
8. Пашков Д.П. Метод определения спектральных каналов переменной ширины видеоспектрометрах космических систем дистанционного зондирования Земли / Д.П. Пашков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2009. – Вип. 4 (22). – С. 50-52.
9. Пашков Д.П. Метод оптимального вибору спектральних каналів довільної структури у видеоспектрометрах / Д.П. Пашков // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2010. – Вип. 5 (86). – С. 114-117.

Надійшла до редколегії 25.08.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.А. Машков, Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління, Київ.