

УДК 621.396.77

Д.П. Пашков

Національний університет оборони України, Київ

## МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ ДОВІЛЬНОЇ СТРУКТУРИ У ВІДЕОСПЕКТРОМЕТРАХ

*У статті розглядаються деякі питання визначення каналу змінної структури у відеоспектрометрах. Робиться спроба оцінити необхідність розвитку даного напрямку і визначення спектральних каналів змінної ширини. Доцільність дослідження даного напрямку дозволить полегшити вирішення цільових завдань.*

**Ключові слова:** відеоспектрометр, канал, спектральний прилад, космічна система.

### Вступ

Стрімкий розвиток космічних систем спостереження (КСН) безперервно розширює круг завдань їх вживання за рахунок створення багатоканальних оптико-електронних систем і зокрема відеоспектрометра. Під відеоспектрометрами розумітимемо оптико-електронні системи, що дозволяють отримувати інформацію як про просторовий розподіл яскравості спостережуваної сцени (по координатах  $x$  і  $y$ ), так і про спектральний склад випромінювання, що приходить від окремих ділянок сцени (по довжині хвилі  $\lambda$ ) [1].

Найважливішою умовою створення відеоспектрометрів є здобуття цифрового зображення місцевості одночасно в декількох спектральних каналах. Вибір числа і робочого діапазону спектральних каналів відеоспектрометра залежить від ряду чинників, в першу чергу від кількості спостережуваних об'єктів, а також від числа рівнів квантування (розрізняних градацій) сигналу, що приймається, на виході системи в межах одного спектрального каналу. Тому від вибору кількості і ширини спектральних каналів залежить вирішення функціональних завдань КСН.

**Аналіз научної області.** Аналіз літератури [2, 3] показав, що якість функціонування оптико-електронних пристроїв КСН залежить від виділення корисного сигналу на тлі перешкод. При цьому, виявлення рухомих об'єктів є порівняння послідовно спостережуваних кадрів, тобто зображень поля, що переглядається. Здійснюючи вибірку за часом значень поля яркостей або освіщенностей і віднімаючи значення сигналів, що отримуються в кожному попередньому кадрі (вибірці), із значень сигналів в «поточному» кадрі, можна компенсувати (мінімізувати) сигнали (яскравості, освітленості), що не змінюються в часі, і навпаки, виділити сигнали (зображення), що змінюються від кадру до кадру. Проте залишаються не вирішені питання, пов'язані з оптимальним вибором числа каналів, а також його ширина.

**Мета статті.** На основі проведеного аналізу літератури [1, 3] і матеріалу статті [4], пропонується метод оптимального вибору спектральних каналів довільної структури у відеоспектрометрах КСН, що і є метою даної статті.

### Виклад основного матеріалу

Основне обмеження строгих методів оптимізації спектральних каналів полягає в апіорній регламентації їх структури, тобто більш менш довільному звуженні смуги вимірювальної системи, в якому відбувається пошук оптимуму. Системи, що існували раніше, показували [3, 4], що структура каналів має бути погоджена із структурою тих варіацій спектрів вирушаючого випромінювання, які несуть корисну інформацію про вимірювані параметри (відбивна здатність по максимуму). Таким чином, представляється природним відмовитися від фіксованого параметричного представлення структури і шукати оптимальні системи в максимально широкому класі спектральних приладів, канали яких підкоряються обмеженню

$$0 \leq a(v) \leq 1, \quad (1)$$

де  $a(v)$  – функція чутливості.

Обмеження (1) непараметричне і має очевидний фізичний сенс, а саме, що енергія випромінювання в кожному спектральному інтервалі не зростає при проходженні через оптичну систему спектрометра. Аналіз літератури [2, 3] показав, що властивість спектральних каналів оптимальної системи відповідає виразу

$$a(v)[1 - a(v)] \equiv 0, \quad (2)$$

тобто функція пропускання  $a(v)$  будь-якого з каналів оптимальної системи набуває лише два значення: нуль або одиницю.

Систематичний виклад математичній теорії оптимального планування при непараметричних обмеженнях типа (1) стосовно різних завдань дистанційного зондування міститься в роботі [5].

Розрахунки оптимальних каналів в цій роботі проводилися головним чином за допомогою загального прийому. Вихідним кроком служило співвідношення

$$\varphi(s) = \sum_{i=1}^m w_i A(s, p_i) x_i,$$

що зв'язує спектральний розподіл  $\varphi(v)$  вирушаючого випромінювання з вектором  $x$  стану зондованого середовища

$$\varphi(v) = \sum_{i=1}^m \omega_i A(v, p_i) x_i, \quad v \in [v_1, v_2]. \quad (3)$$

З (3) передбачається виключеними величини, що відносяться до номінального (середнього) стану. За допомогою розподілу (3) і матриці  $D$  апіорних коваріацій вектора  $x$  може бути обчислена коваріаційна функція спектрального випромінювання

$$D^*(v, v^*) = E\varphi(v)\varphi(v^*) = \sum_{i,k=1}^m \omega_i \omega_k A(v, p_i) A(v, p_k) D_{ik}, \quad (4)$$

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

Далі, для параметризації спектрів вирушаючого випромінювання використовувалося відоме розкладання Карунену-Лоева [3], визначуване за допомогою власних функцій коваріаційного оператора

$$\int_{v_1}^{v_2} D^*(v, v') U_k(v') dv' = \lambda_k U_k(v), \quad k=1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

Тут  $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m$  – власні числа, впорядковані в порядку убуття;  $U_1(v), \dots, U_m(v)$  – відповідні власні функції. Сама параметризація спектрів вироблялася в усіченій формі

$$\varphi(v) = \sum_{k=1}^n \Theta_k U_k(v), \quad n \leq m, \quad (6)$$

де  $\varepsilon$  – початковий порядок апроксимації  $n=n_1$  вибирається з умови

$$n_1 = \min \left\{ n : \max \left[ D^*(v, v) - \sum_{k=1}^n \lambda_k [U_k(v)]^2 \right]^{1/2} \leq \varepsilon \right\}, \quad (7)$$

$\varepsilon$  – необхідна точність апроксимації.

Умова (7) гарантує в певному значенні «рівномірну» точність апроксимації, виключаючи втрату потенційно інформативних, але вузьких ділянок спектру.

Параметри  $\Theta_1, \dots, \Theta_n$  можуть бути вибрані як нові параметри зворотного завдання, оскільки, як було показано в роботі [4], інформативність будь-якого експерименту, оцінена по відношенню до нових параметрів, при деякому  $n = n^*$  збігається з інформативністю до вихідних параметрів  $(x_1, \dots, x_m)$ .

Вираз (6) використовується безпосередньо в схемі оптимізації [5]. Критерієм оптимізації служить визначник «інформаційної матриці»  $\bar{G}$ , складеної для параметрів  $\Theta_1, \dots, \Theta_n$ :

$$\bar{G} = \bar{K}^T \sum^{-1} \bar{K}, \quad (8)$$

де матриця

$$\bar{K}_{jk} = \int a_j(v) U_k(v) dv, \quad j=1, \dots, r; k=1, \dots, n \quad (9)$$

«нового» ядра складена з елементів.

Зазвичай розрахунки обмежувалися оптимізацією рівноточного насиченого плану ( $r = n$ ) – кількість невідомих дорівнює числу вимірюваних величин), коли критерій може бути записаний у вигляді

$$|\det \bar{K}| \Rightarrow \max. \quad (10)$$

Як показано в роботі [5], рішення екстремальної задачі (10) при обмеженнях (1) досягається на системі функцій  $\{\bar{a}_i(v)\}_{i=1}^n$ , тих, що володіють наступними властивостями:

1. Функції  $\bar{a}_i(v)$  набувають лише два значення – нуль або одиницю, тобто кожен спектральний канал є об'єднанням деякого числа спектральних «вікон», розташованих усередині основного (базового) діапазону  $[v_1, v_2]$ .

2. Для кожної функції можна знайти константи,  $c_k^{(i)}$ ,  $k=1, \dots, n$  так, що

$$\bar{a}_i = 1, \quad \text{коли} \sum_{k=1}^n c_k^{(i)} u_k(v) > 0, \quad \text{та}$$

$$\bar{a}_i(v) = 0, \quad \text{коли} \sum_{k=1}^n c_k^{(i)} u_k(v) \leq 0,$$

тобто структура спектральних каналів погоджена із структурою (осциляційними властивостями) базисних функцій.

3. Система  $\{\bar{a}_i(v)\}_{i=1}^n$ , інваріанта відносно лінійних перетворень базисних функцій.

В принципі, з кожним розкладанням (6)  $n = n_1, n_1 + 1, \dots, m$  зв'язана своя система оптимальних

каналів  $\{\bar{a}_i^{(n)}(v)\}_{i=1}^n$ . Ця серія оптимальних систем

остаточно оцінюється по критеріях інформативності відносно основних шуканих параметрів ( $x_1, \dots, x_m$ ) в рамках завдання [4].

Як правило, починаючи з деякого  $n^*$ , характеристики інформативності (головні інформаційні власні числа) виявляють тенденцію до швидкої стабілізації, тобто додавання нових вимірів стає практично даремним. Аналогічну поведінку виявляють і характеристики точності (діагональні елементи матриці  $X^{-1}$ ), так що оптимальне число каналів  $n^*$  (і відповідна система каналів) визначається практично однозначно.

Зупинимося тепер коротко на обчислювальних можливостях описаного вище алгоритму для відшукування оптимального плану експерименту, тобто рішення екстремальної задачі (10). На перший погляд

може здатися, що завдання в обчислювальному відношенні набагато складніше, ніж, наприклад, вибір заданого числа з фіксованим дозволом. Дійсно, повний перебір  $n$  вузьких «каналів» включає  $N!/n!(M-n)!$  варіантів ( $N$  – число елементів дозволу в базовому діапазоні), тоді як лише число різних об'єднань елементарних інтервалів (каналів в новому сенсі слова) рівне і вибір  $n$  таких каналів шляхом повного перебору пов'язаний з розглядом  $N!/n!(M-n)!$   $M=2^N$  варіантів. Проте спеціальна структура критерію (10) робить вельми ефективною просту модифікацію градієнтного методу пошуку екстремуму.

## Висновки

У роботі досліджені оптимальні умови виміру вирушаючого випромінювання в смугах випромінювання об'єктів або процесів для визначення стану. Аналіз оптимальної системи при меншому числі каналів і приблизно на порядок меншої чутливості приймача випромінювання, використаної при оцінках, помітно перевершують по точності оптико-електронний пристрій високого дозволу, при цьому система, отримана в результаті непараметричної оптимізації, дає істотніший вигрощ. У останньому випадку можна відмітити також тенденцію до вирівнювання точності на всіх рівнях, що виявляється і в інших випадках. Оптимальна система каналів відповідна задоволенню умов (6). Видно, що «вікна» чутливості каналів займають значну частину смуги (порядку 50% і більш), причому разом з «одновіконними» каналами з'являються і «двовіконні». Канали оптимальної системи істотно перекриваються між собою.

## Список літератури

1. *Оптико-електронные системы экологического мониторинга природной среды / В.И. Кодинцев, В.И. Орлов, М.Л. Белов и др.; под ред. В.Н. Рождественского. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 580 с.*
2. *Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-електронных приборов / Ю.Г. Якушенков. – М.: Логос, 1999. – 480 с.*
3. *Планирование эксперимента в технике / В.И. Барабацук, Б.П. Креденцер, В.И. Мирошниченко; под ред. Б.П. Креденцера. – К.: Техніка, 1984. – 200 с.*
4. *Покровский О.М. Выбор оптимальных спектральных интервалов для измерений отраженной солнечной радиации в области 0,4 – 0,85 мкм с целью идентификации природных образований / О.М. Покровский, С.И. Быков // Метеорология и гидрология. – 1975. – № 12. – С. 34-42.*
5. *Мишев Д. Дистанционные исследования Земли из космоса: Пер. с болг. / Д. Мишев. – М.: Мир, 1985. – 232 с.*

Надійшла до редколегії 22.04.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, ДП "Центральний НДІ навігації і управління", Київ.

## МЕТОД ОПТИМАЛЬНОГО ВЫБОРА СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ ПРОИЗВОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРАХ

Д.П. Пашков

В статье рассматриваются некоторые вопросы определения канала переменной структуры в видеоспектрометрах. Делается попытка оценить необходимость развития данного направления и определения спектральных каналов переменной ширины. Целесообразность исследования данного направления позволит облегчить решение целевых заданий.

**Ключевые слова:** видеоспектрометр, канал, спектральный прибор, космическая система.

**A METHOD OF OPTIMUM CHOICE OF SPECTRAL DUCTINGS  
OF ARBITRARY STRUCTURE IS IN VIDEOSPECTROMETERS**

D.P. Pashkov

*In the article some questions of determination of channel of variable structure are examined in videospectrometers. An attempt to estimate the necessity of development of this direction and determination of the spectral ductings of variable width is done. Expedience of research of this direction will allow to facilitate the decision of having a special purpose tasks.*

**Keywords:** *videospectrometer, channel, spectral device, space system.*