

УДК 621.396.77

Д.П. Пашков

Национальная академия обороны Украины, Киев

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕМЕННОЙ ШИРИНЫ В ВИДЕОСПЕКТРОМЕТРАХ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В настоящей 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 решения целевых задач.

Ключевые слова: видеоспектрометр, канал, спектр, изображение, система.

Введение

В последнее время в области дистанционного зондирования Земли в видимом диапазоне спектра исключительно широкое применение нашли спектрометры с различным, заранее определенным числом и шириной спектральных интервалов чувствительности [1]. С самого начала было ясно, что дистанционные исследования земной поверхности позволяют решения различных задач в данной области, определения состояния атмосферы, а также идентификации объектов. Для решения поставленных задач необходимо различное количество спектральных каналов, а также необходимая ширина канала электромагнитного спектра, которая позволит обеспечить оптимальное распознавание исследуемых природных образований.

Анализ литературы. Из источников литературы [2] известно, что разработаны программируемые многоканальные спектрометрические системы видимого спектра. Данные системы дают возможность выбирать гибкое число каналов, ширину канала и положение каждого интервала чувствительности в рабочем спектральном диапазоне. При этом, существующие системы могут работать в трех возможных режимах, а именно: **первый режим** реализуется максимальное число каналов и постоянная ширина интервала каждого канала, что соответствует максимальной спектральной разрешающей способности в используемом диапазоне; **второй режим**: реализуется ограниченное число каналов с заданной шириной спектра; **третий режим**: реализуется ограниченное число каналов с различной шириной спектра.

Во втором и третьем случаях число интервалов, их расположение в спектральном диапазоне и ширина канала определяются конкретной постановкой задачи. Спектральная разрешающая способность системы определяется числом каналов в линейной структуре, а размер исследуемого пикселя – параметрами оптической системы, допустимым смазом и временем наклонения.

На современном этапе развития техники существующая элементная база позволяет получать ширину каждого канала порядка нескольких нанометров. Это дает возможность задавать (строить) каналы переменной ширины (осуществлять перенастройку канала в зависимости от исследования заданного спектра объекта). Кроме этого, анализ литературы [1] показал, что одним из перспективных направлений построения видеоспектрометров является на основе перестраиваемых акустооптических фильтров, которые обладают рядом свойств, создавать аппаратную функцию произвольной формы за счет подачи управляющего высокочастотного сигнала требуемого амплитудно-частотного состава, а также возможность регистрировать изображение целиком (без сканирования по пространству). При этом отдельные каналы и ширины каналов выбираются с помощью методов и устройств спектральной фильтрации изображений, а ширина – посредством спектральной селекции изображения фрагментов изображений, отличающихся спектральными признаками [3, 4]. Преимуществом данной системы является возможность легкого и практически мгновенного изменения режимов работы видеоспектрометра.

Цель статьи: решение задачи выбора спектральных каналов с произвольной шириной или перенастраиваемой шириной спектра в системах дистанционного зондирования, когда основная получаемая информация носит спектроскопический характер.

Изложение основного материала

Как уже отмечалось, стремление использовать в космических системах дистанционного зондирования Земли предельно узкие спектральные интервалы вызвано желанием обеспечить максимальную независимость весовых функций, соответствующих отдельным измерениям [1]. В то же время сужение каналов уменьшает отношение сигнал/шум в каждом отдельном канале и, как следствие, ухудшает возможность восстановления искомым параметров исследуемого объекта. Следовательно, должна существовать опти-

мальна ширина спектрального інтервала, когда ухудшение обусловленности обратной задачи компенсируется увеличением полезного сигнала [4].

Одна из первых попыток явно включить указанный эффект в алгоритм оптимизации спектральной системы предпринята в работе [2]. В ней рассматривалась задача оптимизации каналов спектро-радиометра с селективной модуляцией для восстановления профиля температуры по спектру.

Решение задачи оптимизации состоит в выборе функций $(a_j, j = 1, 2, \dots, n)$, характеризующих спектральную чувствительность j -го канала из условия максимума некоторого критерия. В качестве такового критерия в работе [2] предлагается использовать шенноновскую информацию. Это позволит сразу увязать объем передаваемой информации с объемом спектральных характеристик объекта. Продолжая рассуждения, приходим к тому, что структура каждого канала должна быть выбрана в виде двухоконного или однооконного фильтра, симметричного относительно центра и полосы.

В действительности, в каждом канале предполагается наличие знания спектральных характеристик объекта, что также служит параметром оптимизации (своим для каждого канала). Спектральная характеристика объекта должна находиться в библиотеке сигналов фона и объекта, а также библиотеке спектральных признаков объектов.

В большинстве расчетов была использована двухпараметрическая схема, ибо пробные расчеты показали, что хотя информативность схемы с 3-параметрическими каналами несколько выше, выигрыш не настолько велик, чтобы оправдать усложнения расчетов. Для поиска оптимальных значений параметров использовалась программа безградиентной минимизации [6]. Вычисления проводились для $n=2, 4, 6, 8$ каналов для двух уровней приведенной случайной ошибки. Оказалось, что оптимальная конфигурация каналов мало чувствительна к уровню шума. Зависимость количества получаемой информации от числа каналов обнаружила тенденцию к насыщению. В одном случае был обнаружен даже максимум информативности при некотором числе каналов. Строго говоря, такой максимум должен существовать всегда, так как предполагается, что с ростом числа каналов уровень шума (дисперсия) в каждом канале растет пропорционально числу каналов. Это соответствует условию, что суммарное время измерения с ростом числа каналов не увеличивается, и каналы опрашиваются по очереди.

Все оптимальные конфигурации имеют широкие области спектральной чувствительности, каждая из которых занимает значительную часть полосы. При этом сравнение с действующими системами, имеющими узкие полосы (10 см^{-1}), обнаружило значительное превосходство оптимальных систем (по количеству информации). К сожалению, практическое применение весьма ограничено. Это связано с чрезвычайно грубым приближением. Однако хочет-

ся отметить, что полученные выводы в целом, верны и отражают общие свойства космических систем дистанционного зондирования.

Одно из слабых мест в предложенном методе оптимизации в работе [5] состоит в использовании неспециализированного алгоритма поиска максимума целевой функции. Это приводит к существенным вычислительным трудностям, что препятствует применению этого метода в более реалистичных вариантах. В то же время вычислительные трудности, связанные с поиском оптимума по критерию информации Шеннона или, что эквивалентно для конечно-мерных задач, критерию минимизации апостериорной обобщенной дисперсии, могут быть эффективно преодолены на основе методов, развитых в теории планирования регрессионных экспериментов [7].

Отличительной особенностью задачи планирования регрессионного эксперимента в постановке Кифера [7] является возможность управления точностью каждого отдельного измерения. Действительно, в схеме регрессии решения обратной задачи и основанных на ней схемах оптимизации дисперсионная матрица ошибок Σ предполагалась заданной, как правило, в виде

$$\Sigma = \sigma_n^2 I_n, \quad (1)$$

где σ_n^2 – дисперсия отдельного измерения, может быть зависящая от полного числа каналов n ; I_n – единичная матрица порядка n .

В отличие от (1) в теории планирования эксперимента матрица Σ определяется соотношением

$$\Sigma^{-1} = \text{diag}(p_1 Q, p_2 Q, \dots, p_n Q), \sum_{i=1}^n p_i = 1, p_i > 0, \quad (2)$$

где p_1, \dots, p_n – относительные веса измерений, интерпретируемые как относительные длительности (или относительные частоты повторения) каждого измерения; Q – полный измерительный ресурс системы, пропорциональный общему времени измерения и обратно пропорциональный мощности шума в канале регистрации.

Относительные веса измерений $\{p_i\}$ вместе с параметрами отдельных каналов служат переменными оптимизации при поиске максимума минимизации апостериорной обобщенной дисперсии.

Для применения вычислительных методов «классической» теории планирования регрессионных экспериментов [7] необходимо выполнение двух основных условий:

1. Функции чувствительности $a_j(v)$ для каждого канала выбираются из некоторого семейства функций чувствительности, определенных с точностью до неизвестных параметров

$$a(v) = a(v, q), q = (q_1, \dots, q_k). \quad (3)$$

Таким образом, функцию чувствительности j -го канала можно получить, фиксируя определенным образом значения указанных параметров

$$a_j(v) = a(v, q^{(j)}). \quad (4)$$

2. Критерий оптимизации $\phi(G)$ должен быть выпуклой функцией матрицы G , определяющей «первичные» информационные свойства эксперимента. Второе из этих условий выполняется для всех приведенных естественных критериев оптимизации.

В работе [7] приведены результаты расчетов оптимальных каналов в модельной задаче температурного зондирования атмосферы. Структура каналов (3) задавалась в виде «спектрального окна»

$$a_j(v) = \begin{cases} 1, v_j \leq v \leq v_j + \Delta_j; \\ 0, v < v_j, v \leq v_j + \Delta_j, \end{cases} \quad (5)$$

где параметры v_j , Δ_j , определяют положение и ширину каждого канала.

Применялась итерационная процедура В.В. Федорова [7], модифицированная для учета априорной статистической информации и критериев минимизации апостериорной обобщенной дисперсии, эквивалентный минимизации средней ошибки восстановления искомого профиля. Суть этой процедуры состоит в том, что на каждом шаге отыскивается максимум некоторой функции $g(v, \Delta)$, зависящей от текущего плана эксперимента (под планом понимается набор каналов $a_j(v)$ и соответствующих весов p_j) и определяющей степень возрастания (убывания) критерия при переносе нагрузки в соответствующую «точку» (v, Δ) т.е. при включении нового канала с этими параметрами в план эксперимента. При этом за счет условия нормировки $\sum p_j = 1$ включение нового канала влечет за собой, вообще говоря, убывание весов для каналов, уже имеющих в плане. В результате последовательных итераций и «поощрения» удачных каналов веса этих каналов стремятся к некоторым стационарным значениям, тогда как веса «лишних» каналов, попавших в план на отдельных этапах процесса, стремятся к нулю. Можно показать, что в пределе указанная процедура дает строго оптимальный план, соответствующий выбранному критерию и структуре каналов (3) [7]. В вычислительном отношении указанная процедура соединяет достоинства последовательного выбора (на каждой итерации выбирается только один канал) с оптимальностью результата, соответствующей полному перебору. Некоторые трудности возникают на заключительных этапах – необходимо «вычистить» предельный план от «остатков» лишних каналов и перераспределить соответствующим образом веса. Строгих правил здесь дать нельзя, но обычно это удается сделать, тем более что существуют вполне проверяемые критерии близости плана к строго оптимальному, не требующие знания последнего.

В ходе проведения расчетов каналов было выявлено, что при меньшей величине ресурса Q выявило тенденцию к увеличению Δ (расширению каналов) при уменьшении общей точности измерений. С ростом протяженности каналов по спектру спектральные зоны отдельных каналов начинают, вообще говоря, перекрываться. Это согласуется с выводами работы [1, 5], относящимися к другой модельной задаче, и видимо, характерно для оптимальных спектрорадио-

метрических систем. К работам [1, 6, 7] примыкает работа [2], в которой на основе анализа спектров уходящего излучения, измеренных с помощью Фурье-спектрометров, установленных на спутниках «Метеор», показано, что система из 6 оптимальных каналов эквивалентна по информативности (по точности предсказания квазинепрерывного спектра) фурье-спектрометру, регистрирующему весь спектр с высоким разрешением. Автор [7] отмечают связь расположения оптимальных каналов со структурой первых шести собственных векторов ковариационной матрицы аппроксимируемых спектров излучения.

В целом можно прийти к выводу, что применение методов теории планирования регрессионных экспериментов к оптимизации видеоспектральных систем открывает интересные перспективы совершенствования методов дистанционного зондирования.

Выводы

Сочетание в оптико-электронных системах новых методов перенастройки каналов с переменной шириной, а также выбор количества каналов при наличии новых вычислительных средств с очень большой скоростью обработки многомерной информации, получаемой от этих систем, позволяет в реальном масштабе времени достаточно надежно решать задачи обнаружения, распознавания, классификации и идентификации самых различных объектов.

Список литературы

1. *Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды* / В.И. Козинцев, В.И. Орлов, М.Л. Белов и др.; под ред. В.Н. Рождественского. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 580 с.
2. Мишев Д. Дистанционные исследования Земли из космоса: Пер. с болг. / Д. Мишев. – М.: Мир, 1985. – 232 с.
3. Купченко Л.Ф. Информационная селекция изображений в видеоспектрометрах дистанционного зондирования Земли, оснащенных акустооптическими фильтрами / Л.Ф. Купченко, Д.П. Пашков, Г.В. Рыбалка, Е.Л. Черкашина // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2005. – Вип. 8 (48). – С. 55-64.
4. Акустооптические эффекты при сильном взаимодействии. Теория и эксперимент (Метод непрерывных дробей при решении акустооптических задач): монография; под ред. Л.Ф. Купченко. – Х.: Эдена, 2009. – 264 с.
5. Рис У. Основы дистанционного зондирования / У. Рис. – М.: Техносфера, 2006. – 336 с.
6. Успенский А.Б. Планирование спектроскопических экспериментов / А.Б. Успенский, В.В. Федоров // Вопросы кибернетики. Вып. 47. Математико-статистические методы анализа и планирования эксперимента. – М., 1978. – С. 137-148.
7. 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.

Поступила в редколлегию 30.11.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.В. Козелков, ГП «Центральный НИИ навигации и управления», Киев.

**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ КАНАЛІВ ЗМІННОЇ ШИРИНИ У ВІДЕОСПЕКТРОМЕТРАХ
КОСМІЧНИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ**

Д.П. Пашков

У справжній 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 рішення цільових задач.

Ключові слова: відеоспектрометр, канал, спектр, зображення, система.

**METHOD OF DETERMINATION OF SPECTRAL CHANNELS OF VARIABLE WIDTH IN THE
VIDEOSPECTROMETERS
OF SYSTEMS OF SPACES REMOTE SENSING OF EARTH**

D.P. Pashkov

In the real article some questions of determination of channel of variable structure are examined in videospectrometers. Given it a shot to estimate the necessity of development of this direction and determination of spectral channels of variable width. Expedience of research of this direction will allow to facilitate the decisions of having a special purpose tasks.

Keywords: videospectrometer, channel, spectrum, image, system.