Далее находим поле перемещений и напряжений.

Рассмотренный выше алгоритм позволило создать эффективное программное обеспечение для расчета прочности, жесткости конструкций зеркал антенных устройств, которые представляют собой пространственные рамные и ферменные конструкции, содержащие тысячи узлов.

1. Аргирис Дж. Современные достижения в методах расчета конструкций с применением матриц. М.: Стройиздат, 1968.
2. Кормилицын О.П. Обобщенный алгоритм расчета стержневых систем. VI Международная научно-техническая конференция ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ МАШИН (МК-111-90), ноябрь 2010г. г. Пенза. Сборник статей. 35-37с.
3. Кормилицын О.П. «Особенности построения алгоритма анализа прочности и жесткости конструкций приборостроения». THE SCIENTIFIC HERITAGE, №7, P3, 93-97с., Budapest, 2016.

Лавров В.В.¹, Рындин Ю.Г.¹, Тестов А.В.¹, Тюрин В.С.², Аукин М.К.³
Адаптивный робастный алгоритм выделения треков низкоорбитальных космических объектов на одиночном снимке звёздного неба

¹ПАО Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел»

²Акционерное общество «Астрономический научный центр»

³ООО «Научно-методический центр «информатика риска»
(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-10-2019-12

idsp: ljjournal-10-2019-12

Аннотация

Рассматривается задача обнаружения и оценки информативных параметров (параметров треков) движущихся объектов на оптических изображениях звездного неба (ОИЗН), формируемых в наземных телескопах, в ситуации, когда яркость объектов сравнима с уровнем фонового излучения. Предлагается её решение с использованием процедуры факторизации множеств путём решения трёх частных задач в составе выделения на ОИЗН локально однородных и изотропных областей фонового излучения, выделения на них изображений ярких звезд и их фильтрацию с последующим решением основной задачи. Для решения каждой частной задачи конкретизируется структура бинарного отношения линейной связности. Предлагается архитектура обобщенного алгоритма решения отдельных задач, а также приведены результаты обработки ОИЗН, полученных в реальных условиях.

Ключевые слова: Архитектура обобщённого алгоритма, бинарное отношение линейной связности, оптическое изображение звездного неба, трек, факторизация, фильтрация.

Abstract

The problem of detecting and evaluating informative parameters (track parameters) of moving objects in optical images of the starry sky (OI) formed in ground-based telescopes in a situation where the brightness of the objects is comparable with the level of background radiation is considered. It is proposed to solve it using the set factorization procedure by solving three particular problems, consisting of isolating locally homogeneous and isotropic regions of background radiation on the OI, highlighting bright star images on them and filtering them with the subsequent solution of the main problem. To solve each particular problem, the structure of the binary relation of linear connection is specified. The architecture of a generalized algorithm for solving individual problems is proposed, as well as the results of processing OI obtained in real conditions.

Keywords: The architecture of the generalized algorithm, the binary relation of linear connectivity, the optical image of the starry sky, track, factorization, filtering.

Введение

Одна из задач определения орбитальных параметров неизвестных движущихся околоземных объектов по совокупности цифровых ОИЗН, формируемых в наземных телескопах в барьерном режиме, заключается в обнаружении их тусклых следов (треков) в условиях, когда формирование телескопом одиночных снимков осуществляется в режиме длительной экспозиции. Характерной особенностью таких ОИЗН является то обстоятельство, что яркость отдельных формирующих трек пикселей невелика, т. е. отношение сигнал/фон в них сравнимо с единицей. Поэтому решение данной задачи является нетривиальным. ОИЗН формируется в условиях распространения оптического излучения в турбулентной атмосфере, оказывающей влияние на структуру функции рассеяния точки (ФРТ), наличия свечения неба и собственных шумов фотоприёмного устройства телескопа. Свечение неба в общем случае характеризуется двумя компонентами: внеатмосферным, которое связано с прямым излучением ярких звёзд, и атмосферным (фоновым) излучением, которое условно формируется излучением неярких звезд и свечением атмосферы, связанным с рассеянием света земного и неземного происхождения. Следовательно, задачу выделения трека на ОИЗН приходится решать в условиях, когда вероятностное описание яркости на снимке априори неизвестно. В настоящее время поиску алгоритмов решения данной задачи в таких условиях уделяется достаточно большое внимание [1÷8].

Наиболее полно поставленная задача рассмотрена в [6]. В работе предлагается компромиссный подход для выделения протяженных следов движущихся объектов и одновременного обнаружения неподвижных объектов, заключающийся в замене задач выделения треков задачей обнаружения их фрагментов фиксированной длины с последующим их группированием. Одновременно решается задача обнаружения и идентификации звезд. При этом фрагменты следов и звезд обнаруживаются в скользящем по изображению пространственном окне с классификацией их по признаку «неподвижный объект/фрагмент следа объекта». Накопление сигналов вдоль гипотетических фрагментов следов проводится в пределах пространственного окна. Число группируемых фрагментов при этом оказывается значительно меньше числа выделенных пороговой обработкой пикселей при традиционном подходе.

В работе [7] задача выделения неизвестных треков решается с использованием быстрого дискретного преобразования Радона в предположении, что поперечное гауссово сечение треков накладывается на распределённый по Пуассону фон. Показано, что такой подход позволяет существенно увеличить быстродействие алгоритма согласованной фильтрации треков по всем возможным угловым направлениям и существенно снизить порог их обнаружения при заданном уровне ложных тревог.

В этой статье рассматривается адаптивный робастный метод решения задачи выделения треков движущихся удалённых объектов и оценки их орбитальных параметров на ОИЗН длительной экспозиции (≥ 0.1 сек) на одиночном снимке, который базируется на процедуре полного цикла обработки однобайтовых ОИ невысокого качества [9], когда на каждом этапе обработки решается вытекающая из общей постановки одна частная задача, и процедуре факторизации элементов множества при заданном отношении эквивалентности [10]. В качестве априорной информации используется информация о выбранном барьерном режиме наблюдения телескопа и ожидаемом диапазоне возможного изменения длины треков l , заданном количеством значимых элементов ПЗС $l \in [l_{\min}, l_{\max}]$.

Постановка задачи

Оцифрованное ОИЗН длительной экспозиции, формируемое телескопом в барьерном режиме, можно представить в следующем матричном виде

$$Y = Y_o + Y_z + Y_\phi \quad (1)$$

где Y – матрица суммарного ОИ размерности $N_x * N_y$, а входящие в ее состав матрицы Y_o, Y_z, Y_ϕ отражают вклад в ОИ, вносимый движущимися ИЗС, прямым излучением звёзд, яркость которых выше порогового значения $S_{\text{п}}$, и фоновым излучением. Заметим, что введя взаимно однозначное преобразование $|Y\rangle = P(Y)$ (например, записав последовательно элементы столбцов матрицы Y) можно использовать векторный аналог (1), $|Y\rangle$ – вектор столбец размерности $N = N_x * N_y$. Конкретизируем структуру отдельных компонент ОИЗН и уточним соответствующие задачи по их анализу.

ОИ фонового излучения Y_ϕ в силу сказанного выше формируется совокупностью реализаций локально однородного и изотропного поля, основной характеристикой которых является структурная функция $D(\rho)$ [11]. Будем считать что для её максимального характерного размера ρ справедливо условие $\rho \geq O(l_{\text{max}})$. Следовательно, возникает необходимость оценки областей $Y(i) \in Y, \bigcup_{i=0}^l Y(i) = Y$, в которых яркость фонового излучения $\sigma(i)$ примерно постоянна.

Считая звёзды точечными источниками в каждой найденной области $Y(i)$ (далее без потери общности опускаются индексы (i)) компоненту Y_z можно представить в виде $|Y_z\rangle = \sum_{j=1}^{m_z} s(j) |\delta(j)\rangle \otimes |h(j)\rangle \quad j \in [0, m_z)$, где $s(j)$ – яркость j звезды, $|\delta(j)\rangle$ – вектор размерности N , у которого единственный равный 1 элемент соответствует индексу, связанному с положением источника на снимке, $|h(j)\rangle$ – функция рассеяния точки в системе “атмосфера - телескоп” (ФРТ) [12], которая в общем случае может зависеть от координат источника излучения, $\otimes$ – операция прямой свертки, учитывающая процесс рассеяния излучения в атмосфере, $m_z \ll N$ – априори неизвестное количество звезд в области $Y(i)$. В данном случае оценке подлежат количество точечных источников $\widehat{m}_z$, их яркости и характерный размер функции рассеяния точки в ОИЗН, определяемый числом разрешённых пикселей $\widehat{n}_h(j)$.

По аналогии с $|Y_z\rangle$ для ОИ искусственного спутника Земли (ИСЗ) имеем $|Y_o\rangle = \sum_{j=1}^{m_o} |\mu(j)\rangle \otimes |h(j)\rangle$, где вектор $|\mu(j)\rangle$ представляет ОИ проекции орбиты движущегося за время экспозиции j ИСЗ на картинную плоскость в направлении наблюдения телескопа. Значимые компоненты $|\mu(j)\rangle$ равны накопленным уровням яркости $s_k(j) \quad k \in [0, L(j))$ рассеянного от ИСЗ поля, а $m_o \ll N$ априори неизвестно. Оценка сверху формы трека на ОИ показывает, что хорошей его аппроксимацией является отрезок прямой, положение и ориентация которого неизвестны.

В работе предпринята попытка синтеза робастного алгоритма фильтрации треков ИСЗ с оценкой их числа $\widehat{m}_o$ и параметров $\widehat{\lambda}_j \quad j \in [0, \widehat{m}_o)$, где истинные параметры λ_j на снимке задаются в виде $\lambda_j = \langle r_0(j), r_1(j) |$ условных координат начала и конца выделенного трека или в представлении уравнения прямой $\lambda_j = \langle r_0(j), a, l, \theta |$, a – расстояние по нормали к прямой относительно начала выбранной системы координат (СК), l – длина трека, а θ – угол его ориентации относительно выбранного направления Ох (строк ОИ) в выбранной системе координат.

Структура обобщённого метода построения алгоритмов решения частных задач.

Поставленная задача выделения треков ИСЗ и оценки их параметров подразумевает поиск алгоритма преобразования исходной функции яркости ОИ в его представление в образы однородных объектов и является нелинейной. В соответствии с предложенным в [9] подходом предлагается решать её поэтапно, взяв за основу процедуру факторизации элементов множества [12]. Структура обобщенного алгоритма

решения частной задачи (шаблон алгоритма) в виде диаграммы деятельности [13] приведена на рис. 1. Остановимся на реализации процесса обработки в общем случае.

Рассмотрим анализируемое оцифрованное ОИ Y как множество отдельных пикселей (элементов), атрибутами которых являются их координаты на плоскости $k = (i, j)$ и значения яркости $y(i, j), i \in [0, N_x), j \in [0, N_y)$ при наличии априорной (дополнительной) информации U_{apr} в результате инициализации формируем совокупность начальных элементов множества $Y(0) = \{Y_k(0): 0 \leq k < N; Y_{k_1}(0) \cap Y_{k_2}(0) = \emptyset: k_1 \neq k_2; Y = \bigcup_{k=0}^{N-1} Y_k(0)\}$.

Проводится предварительная фильтрация элементов $Y_k(0)$, в результате которой формируются оценки параметров, использующиеся при проверке справедливости отношения эквивалентности R в процессе построения фактор множества.

Рис 1. Структура обобщенного алгоритма решения частных задач (диаграмма деятельности)

Центральное место в алгоритме обработки ОИ отводится определению *бинарного отношения линейной связности* для каждой частной задачи, задаваемого на множестве элементов ОИ как транзитивное замыкание отношения соседства S [12]. Отношение соседства — это произвольное рефлексивное и симметричное бинарное отношение, структура которого определяется решаемой задачей.

Процедура *построения фактор* множества может быть реализована одним из алгоритмов [12] путем оперативного изменения состояния текущего анализируемого элемента по результатам принятия положительного решения о его объединении с найденным элементом множества.

Ввиду вероятностной структуры ОИЗН в процессе *классификации* найденных элементов фактор множества решается задача их отнесения к истинным или ложным с возможной оценкой их информативных параметров, значения которых необходимы на последующих этапах обработки с использованием алгоритма проверки совокупности дуальтернативных гипотез, структура которого получена в [14].

Детализируем реализацию отдельных шагов алгоритма при решении частных задач.

Реализация отдельных алгоритмов.

Далее условимся сохранять без изменения принятые обозначения сущностей для всего ОИ Y при описании отдельных элементов вводимых множеств.

Предварительная обработка изображения

На данном этапе решаем задачу выделения на ОИЗН однородных и изотропных областей с оценкой уровня яркости σ их фонового излучения.

Исходное изображение – поступившее на обработку ОИЗН Y .

Дополнительная информация – максимально ожидаемая длина трека l_{max} .

Результат инициализации – априорное разбиение Y на совокупность непересекающихся квадратных матриц (элементов множества) $Y(0) = \{\bar{l} \in [0, N_x/m], \bar{j} \in [0, N_y/m], k = (\bar{l}, \bar{j}); Y^m(k = (\bar{l} * m \leq i < (\bar{l} + 1) * m) \wedge (\bar{j} * m \leq j < (\bar{j} + 1) * m)\}$, исходный размер которых $m = 2l_{max}$. Здесь без потери общности для простоты считаем, что такое разбиение существует (т. е. не учитываем возможные краевые эффекты, обусловленные истинными размерами ОИЗН).

Отношение соседства будем считать выполненным, если для выбранных областей ОИ справедливо следующее отношение

$$Y^m(k_1)SY^m(k_2) \Leftrightarrow (|\bar{l}_1 - \bar{l}_2| + |\bar{j}_1 - \bar{j}_2|) \leq 1 \wedge \frac{l(J(k_1) \cap l(J(k_2)))}{l(J(k_1) \cup l(J(k_2)))} > C_0,$$

где $l(J(k))$ – функция вычисления длины интервальных оценок $J(k) = [\hat{\sigma}_-(k), \hat{\sigma}_+(k)]$ интенсивности фонового излучения при их пересечении или объединении, а $C_0 \in [0, 1]$ – значение порога для принятия положительного решения.

Предварительная фильтрация

Для каждой области $Y^m(k)$ строим оценку доверительного интервала уровней интенсивностей $J(k)$, соответствующую наиболее вероятному уровню появления фоновых отметок (0,68). Граничные значения интервала, вычисленные относительно оценки интенсивности, плюс/минус её дисперсия.

В силу справедливости неравенств $m_3 \ll N$ и $\sum_{j=1}^{m_o} l_j \ll N$ на основании теории больших чисел плотность распределение яркости фона в диапазоне максимально вероятных значений на ОИ, полученных при длительной экспозиции, можно аппроксимировать нормальным законом.

Поэтому в каждой области в качестве робастной оценки $\sigma(k)$ предварительно выбираем полученные по гистограмме интенсивности $G(Y)$ либо медианную оценку $\sigma_{med}(k)$ либо её оценку по моде распределения $\sigma_{mod}(k)$

$$\hat{\sigma}_{med}(k) = median(G(Y)) \text{ и } \hat{\sigma}_{mod}(k) = moda(G(Y)).$$

По гистограмме определяем оценки граничных значений интенсивностей интервала, соответствующего ожидаемому значению дисперсии

$$\hat{\sigma}_{\mp}(k) = G(N(\hat{\sigma}_*(k)) \mp 0.34N)$$

где $N(\hat{\sigma}_*(k))$ – положение соответствующей оценки на гистограмме интенсивности.

За оценку интервала выбираем оценку, удовлетворяющую соотношению

$$J(k) = \min_{J_{med}(k), J_{mod}(k)} \{\Delta \hat{\sigma}_{med}, \Delta \hat{\sigma}_{mod}\}, \text{ где } \Delta \hat{\sigma}_* = |2\hat{\sigma}_* - \hat{\sigma}_-(k) - \hat{\sigma}_+(k)|$$

Результатом факторизации Y является разбиение исходного ОИ на совокупность блочных ОИ $Y = \bigcup_{k=1}^{\hat{m}_\Phi} Y_\Phi(k); Y_\Phi(k_1) \cap Y_\Phi(k_2) = \emptyset$ при $i \neq j$, представление которых дополнительно содержит оценки яркости фонового изображения и его дисперсии $(\hat{\sigma}, D(\hat{\sigma}))$ или её интервальную оценку.

Выделение звёзд и оценка структуры функции рассеяния точки

На данном этапе решаем задачу выделения на однородных и изотропных областях $\bigcup_{i=0}^{\hat{m}_\Phi} Y_\Phi(i)$ ОИ звезд с оценкой параметров ФРТ $h(*)$. Рассмотрим решение задачи при обработке конкретного ОИ $Y=Y_\Phi(i); i \in [1, \hat{m}_\Phi]$.

Исходное изображение – поступившее на обработку ОИЗН Y .

Дополнительная информация – яркость фона и его дисперсия $(\hat{\sigma}, D(\hat{\sigma}))$ (для простоты рассмотрим случай точечной оценки $\hat{\sigma}$).

Инициализация и предварительная фильтрация. Считаем распределение фоновое изображение в Y нормальным. Задав значение вероятности получения ложных фоновых отметок $p_{\text{лт}}$ в битовом ОИ B найдём пороговое значение интенсивности $s_{\text{п}}$ для формирования B из Y в представлении булевой матрицы. Полагаем $Y_3 = B$. На этапе предварительной фильтрации B находим односвязные интервалы значимых пикселей на отдельных строках B [12] $b_u = (k_u, j_u, l_u), u \in [0, \hat{m}_3(0))$, где параметрами b_u являются соответственно номер строки, номер столбца первого значимого пикселя, а также его длина, а $\hat{m}_3(0)$ – количество найденных интервалов. Это исходное разбиение множества B на элементы.

За *отношение связности* в данном случае принимаем транзитивное замыкание отношения соседства по квадрату S_q на соседних строках B [12].

Факторизацию множества Y_3 проведем с использованием предложенного в [12] алгоритма. В результате получим фактор множества $\tilde{Y}_3$ с элементами $\tilde{b}_u, u \in [0, \hat{m}_3(0))$ (линейно-связными сегментами), содержащими следующий набор параметров: набор линейно-связных битовых векторов и обрамляющий их прямоугольник, координаты верхнего левого угла которого задаются в системе координат снимка, определяемой индексацией элементов матрицы B .

Классификация. На данном этапе обработки решается задача определения параметров ФРТ $h(*)$. Будем считать, что в локально однородной области $\tilde{Y}_3$ структура $h(*)$ постоянна, и в силу оцифровки и малой области определения близка квадратной форме. Ввиду стохастической структуры ОИЗН в составе фактор множества $\tilde{Y}_3$ возможно наличие ложных элементов.

Классификацию элементов множества $\tilde{Y}_3$ на относящиеся или не относящиеся к ОИ звезд (к множеству $\hat{Y}_3$) проведем с использованием нормированного значения показателя компактности $\mu(\tilde{b}_u)$ [12], оценка которого для оцифрованных сегментов ОИ с приемлемой точностью вычисляется по формуле

$$\mu(\tilde{b}_u) = 16 * \text{card}(\tilde{b}_u) / p^2(\tilde{b}_u) \quad (2)$$

где $\text{card}(\tilde{b}_u)$ – мощность элемента $\tilde{b}_u$, а его суммарный периметр $p(\tilde{b}_u)$ вычисляется по формуле $p(\tilde{b}_u) = 2(\text{card}(\tilde{b}_u) + n(\tilde{b}_u) - iC(\tilde{b}_u))$. Здесь $n(\tilde{b}_u)$ – общее количество выделенных односвязных интервалов в $\tilde{b}_u$, а iC – параметр, учитывающий количество связных между собой значимых пикселей в $\tilde{b}_u$ между выделенными односвязными интервалами, расположенными на соседних строках элемента $\tilde{b}_u$.

Соответствующее решающее правило принятия положительного решения об отнесении элемента $\tilde{b}_u$ к ОИ звезды принимает вид

$$\begin{cases} \text{при } \mu(\tilde{b}_u) \geq (C \approx 0.8) \Rightarrow \hat{b}_u = \tilde{b}_u \in \hat{Y}_3 \\ \text{иначе } \tilde{b}_u \notin \hat{Y}_3 \end{cases} \quad (3)$$

За оценку структуры ФРТ $\hat{h}(*)$ принимаем структуру, связанную с медианным значением $\mu(*)$ для элементов $\hat{b}_u \in \hat{Y}_3$, а точнее её размер $a(\hat{h})$, поскольку область определения $\hat{h}(*)$ близка к круговой. В случае необходимости находим соответствующую интервальную оценку.

Выделение треков на изображении

На данном этапе решаем задачу выделения треков в отдельных однородных и изотропных областях при наличии оценки параметров ФРТ h^* с учётом возможного наблюдения флуктуирующего ИСЗ.

Исходное изображение – поступившее на обработку ОИЗН Y в заданной области

Дополнительная информация – яркость фона и его дисперсия $(\hat{\sigma}, D(\hat{\sigma}))$, оценка размеров ФРТ h^* , пороговый уровень интенсивности s_n , ожидаемый диапазон длин треков $l \in [l_{min}, l_{max})$, допустимый минимальный пороговый уровень отношения сигнал/фон q_n , при котором достигается требуемая вероятность правильного обнаружения трека определённой длины, пороговый уровень яркости углового отрезка фильтра ε .

Инициализация.

Определяем нижний пороговый уровень интенсивности $s_0 = \max(\hat{\sigma} * q_n / \sqrt{l_{max}}, \sigma_{min})$, где σ_{min} – минимальное значение яркости среди значимых пикселей ОИ. Формируем предварительное ОИ Y_0 с использованием режекторной фильтрации Y в диапазоне значимых интенсивностей $[s_0, s_n]$. Формируем фильтр угловых направлений, который представляет собой отрезки прямых u_i радиуса $r = 4 l_{max} / \pi$, проходящие через центр круга под разными угловыми направлениями с равномерным шагом по углу. Количество таких отрезков согласно теореме Котельникова с учетом структуры ФРТ $L = 2 l_{max} / a(\hat{h})$. В качестве исходных элементов множества рассматриваем совокупность значимых пикселей $p_i, i[1, N)$ сформированного Y_0 .

Для каждого значимого пикселя p проводим *предварительную фильтрацию*, восстанавливая “векторную” угловую диаграмму с использованием робастного алгоритма фильтрации угловых направлений, центр которого располагаем в пикселе p .

В результате фильтрации с каждым пикселем ассоциировано не одно число, а параметры вектора наиболее яркого направления в составе: индекса самого яркого углового направления u и относительной яркости отрезка фильтра $P(p, u)$ в направлении u в заданном пикселе относительно локального фона; относительная яркость вычисляется по формуле

$$P(p, u) = (med(u) - s_0) / (\hat{\sigma} - s_0) \quad (4)$$

Здесь $med(u)$ – медианное значение яркости на отрезке u .

В окончательный состав Y_0 включается множество пикселей по заданному порогу ε яркости направления: $Y_0 = \{p: P(p, u) > \varepsilon\}$.

Отношение соседства в данном случае определяется следующим образом:

$$p_1 S_p p_2 \Leftrightarrow (p_1 S_q p_2) \cap (p_1 S_s p_2): p_1 \rightarrow P(p_1, u_1); p_2 \rightarrow P(p_2, u_2),$$

где S_q – отношение соседства пикселей «по квадрату», а S_s – отношение соседства отрезков фильтра по направлению, которое считается справедливым, если их направления отличаются не более чем на один шаг фильтра по углу.

Проводим *факторизацию* множества Y_0 . В результате получим факторное множество $\tilde{Y}_0$ потенциально возможных треков, элементы которого помимо указанных параметров содержат сегментное описание области их локализации $\tilde{b}_u$.

Классификация. Ранее отмечалась стохастическая структура ОИ. Поэтому на данном этапе обработки решается задача классификации найденных элементов факторного множества $\tilde{Y}_0$ на множество возможных треков ИСЗ $\hat{Y}_0$ и ложных элементов. Решение принимается с использованием соотношений (2) и (3). При этом положительное решение о выделении трека принимается при нахождении значения $\mu(\tilde{b}_u)$ в интервале $\mu(\tilde{b}_u) \in [C_0, C_1)$. Значения C_0 и C_1 вычисляются по формуле

$$C_i = 4 * l_i / (l_i + a(\hat{h}))^2; \text{ где } l_0 = l_{max}, \text{ а } l_1 = l_{min}$$

В случае принятия положительного решения проводим адаптивное уточнение значения s_0 с учетом оценки длины трека, и при его увеличении корректируем структуру $\hat{b}_u$.

Для элементов фактор множества $\hat{Y}_0$ методом наименьших квадратов находим оценки наилучших параметров прямых и/или его отрезков, а также их корреляционных матриц. Соответствующие формулы для реализации вычислительного процесса приведены ниже.

Вывод формул для оценки параметров прямой, минимизирующих её отклонения относительно множества точек на плоскости.

Постановка задачи

Пусть на плоскости задано множество эмпирических N точек $|p_i\rangle = u_i |r_i\rangle$; $i \in [0, N)$, где $|r_i\rangle$ – двумерный вектор координат, а u_i – скалярный весовой коэффициент.

Требуется найти параметры прямой $y = a + kx$ наилучшим образом аппроксимирующей заданное множество точек. Известно, что одно из представлений прямой на плоскости можно задать направлением единичного вектора $|e(\varphi)\rangle$, где угол φ определяет направление перпендикуляра к прямой относительно выбранной оси системы координат, и параметром a , равным расстоянию по нормали к прямой относительно начала координат.

Ставим задачу определения оценки этих параметров $\langle \lambda | = \langle a, \varphi$ и корреляционной матрицы $R(|\lambda\rangle)$ с использованием метода минимума квадратичной оценки.

$$F(|e(\varphi)\rangle, a) = \sum_{i=1}^N (\langle p_i | e(\varphi) \rangle - a)^2$$

Дифференцируя $F(*)$ по a и φ с учетом равенства $\partial |e(\varphi)\rangle / \partial \varphi = |e_\perp(\varphi)\rangle$, где $\langle e_\perp(\varphi)_i | e(\varphi) \rangle = 0$ получаем оценку

$$\hat{a}(N) = \langle P(N) | e(\varphi(N)) \rangle / N, \text{ где } \langle P(N) | = \sum_{i=1}^N \langle p_i |$$

и следующее уравнение для поиска оценки $\hat{\varphi}(N)$

$$\langle e_\perp(\varphi(N)) | D(N) - |P(N)\rangle \langle P(N)| / N | e(\varphi(N)) \rangle = 0, \text{ где } D(N) = \sum_{i=1}^N |p_i\rangle \langle p_i|.$$

Из последнего уравнения следует, что существуют вектора, для которых справедливо указанное равенство. Они совпадают с собственными векторами матрицы $|D(N) - |P(N)\rangle \langle P(N)| / N|$, причём за оценку $e(\hat{\varphi}(N))$ надо взять вектор, связанный с минимальным собственным числом матрицы. Оценка $\hat{\varphi}(N)$ находится с помощью известного тригонометрического соотношения.

Для оценки уточнённых значений требуемых параметров $\langle \lambda(N) | = \langle \hat{a}(N), \hat{\varphi}(N) |$ по совокупности эмпирических данных воспользуемся методом складного ножа [П1]. Согласно этому методу строят N оценок $|\lambda_i(N-1)\rangle$, $i \in [1, N)$, где индекс i указывает на то, что из эмпирических данных удалено i -е измерение, тогда уточнённую оценку требуемых параметров находим по формуле

$$|\hat{\lambda}(N)\rangle = N * |\lambda(N)\rangle - (N-1) * \left(\sum_{i=1}^N |\lambda_i(N-1)\rangle / N \right);$$

а оценку корреляционной матрицы по формуле

$$\hat{R}(|\hat{\lambda}(N)\rangle) = \frac{N-1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{\lambda}(N) - \lambda_i(N-1)\rangle \langle \hat{\lambda}(N) - \lambda_i(N-1)|$$

При необходимости получить описание отрезка прямой с использованием других параметров (например, его начальной и конечной точек) используется аналогичный подход, который здесь опущен.

Примеры выделения треков низкоорбитальных космических объектов на снимках звёздного неба

Алгоритм был программно реализован на языке программирования C++ и опробован на большом количестве снимков, представляющих собой 16-битные изображения, записанные в fit-файлы и содержащие тусклые треки. В некоторых случаях для визуального определения трека требуется предварительная обработка снимка с помощью интервального фильтра яркостей.

Остановимся на результатах, имеющих отношение к решению основной задачи – обнаружению треков и оценке их информативных параметров. Алгоритм выделения треков тестировался при следующих наборах параметров, используемых при выделении трека (см. Таблицу 1).

Таблица 1

Выбранные параметры фильтра угловых направлений, используемые при исследовании возможностей решения задачи выделения треков

Номер варианта	Параметр фильтра направлений L	Порог яркости направления ϵ	
1	4	0.3	0.5
2	6	0.3	0.5
3	8	0.3	0.5
4	10	0.3	0.5
5	12	0.3	0.5
6	16	0.3	0.5

При проведении тестов фильтр по гистограмме направлений множеств не применялся, т. к. ставилась задача проанализировать все потенциальные треки и исследовать их гистограммы направлений.

Исследование показало, что время вычислений сильно зависит от величины фильтра L . При $L=4$ время вычислений составило порядка 10 секунд, а при $L=16$ время вычислений доходило до 6 минут. Оценки получены в одно потоковом режиме вычислений на ПЭВМ со следующими характеристиками:

- тактовая частота – не менее 2 ГГц;
- количество ядер – не менее 4;
- объем постоянной памяти – не менее 50 Гбайт;
- объем оперативной памяти – не менее 4096 Мбайт;
- монитор с разрешением не ниже 1920x1080.

При небольших значениях $L=4, 6$ обнаруживается большое количество «ложных» треков. При известной минимальной длине трека «ложные» треки удастся относительно легко селективировать. Как показали тесты, **«ложные» треки полностью пропадают при размере фильтра $L=10$** . Но слишком большой размер фильтра L приводит к тому, что перестают обнаруживаться настоящие треки малой длины.

Рассмотрим конкретный вариант выделения трека. На рисунке 2 в уменьшенном масштабе приведен фрагмент ОИЗН (размер исходного ОИ $\approx 4000 \times 2500$ пикселей), на котором наблюдается наличие всех упомянутых особенностей исходного ОИЗН.

Рис 2. Фрагмент исходного оптического изображения звёздного неба.

Результаты, полученные на основных этапах обработки ОИ, приведены на рисунке 3, где слева направо приведены: а) ОИ фрагмента в исходном масштабе, содержащего выделенный в результате обработки трек, после формирования оценок параметров фона в локальной однородной области, фильтрации звезд и предварительного преобразования исходных значений яркости к относительному уровню с использованием отношения (4); б) увеличенное ОИ предварительно выделенного трека с максимальным числом значимых пикселей на угловом направлении, равном 135.00 (подробная гистограмма количества значимых пикселей на угловых направлениях с шагом, равным 5.60, приведена на рисунке 4.); в) увеличенное исходное ОИ с нанесенной на него красным цветом окончательной оценкой координат концевых точек трека $\langle \hat{r}_0, \hat{r}_1 \rangle = \langle (1154.4, 316.7), (1178.6, 294.3) \rangle$.

Рис. 3. Фрагменты ОИ, формируемые на отдельных этапах обработки ОИЗН: а) формирование относительного уровня “яркости” б) предварительное выделение трека; в) формирование окончательной оценки.

Рис. 4. Диаграмма угловых направлений выделенного трека. Его основные параметры: $N=96$; $\hat{\phi} = 134.56^\circ$; $\hat{l} = 43.116$; ширина трека ≈ 7.82 пикселей.

Приведённый пример, а также другие полученные результаты показали относительно хорошее качество обнаружения и оценки параметров тусклых треков даже в ситуации, когда отношение “сигнал/фон” в единичном пикселе $q \approx 1$.

Заключение

В работе рассмотрены задача обнаружения треков неизвестных движущихся объектов на оптических изображениях звёздного неба, формируемых в наземных телескопах в барьерном режиме в условиях сложной фоновой обстановки и задача оценки информативных параметров обнаруженных треков. Характерная особенность таких изображений – наличие тусклых треков, в которых отношение “сигнал/фон” близко к единице. Синтезирован алгоритм решения поставленной задачи в три последовательных этапа, включающий в себя оценки структуры локально однородных и изотропных областей фонового излучения, структуры функции рассеяния точки по изображениям ярких звезд и решения целевой задачи с использованием найденных оценок.

Для решения отдельных задач разработана структура единого обобщенного алгоритма с использованием процедуры факторизации множеств, реализация которой для конкретного алгоритма связана с определением бинарного отношения линейного соседства. Синтезирован алгоритм формирования оценок параметров треков по эмпирическим данным с использованием метода складного ножа в предположении, что параметры трека на ОИ задаются отрезком прямой.

Приведены примеры обработки изображений, полученных в реальных условиях, с использованием программной реализации алгоритма на языке программирования C++, которые показали относительно хорошее качество обнаружения и оценки параметров тусклых треков. Дальнейшее направление работы связано с оценкой поведения характеристики обнаружения в условиях, приближенных к реальной ситуации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект, № 19-07-00225 А).

1. Определение отношения сигнал/шум по космическим снимкам М. А. Боярчук, В. В. Некрасов, АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва Тезисы докладов Шестой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – 146 с.
2. Выделение в цифровом изображении следов тусклых космических объектов с неизвестными орбитами А.Е. Колесса, Кузовов К.Д. kolessa @ yandex.ru, Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел», Московский физико-технический институт [Электронный ресурс] <https://docplayer.ru/37371882-Vydelenie-v-cifrovom-izobrazhenii-sledov-tusklyh-kosmicheskikh-obektov-s-neizvestnymi-orbitami.html> (Дата обращения: 25.09.2019).
3. А.Е.Колесса, В.Г.Репин Робастный адаптивный алгоритм выделения отметок от целей в цифровом изображении Межгосударственная акционерная корпорация «Вымпел» [Электронный ресурс] <https://docplayer.ru/51026878-Robastnyy-adaptivnyy-algoritm-vydeleniya-otmetok-ot-celey-v-cifrovom-izobrazhenii.html> (Дата обращения: 25.08.2019).
4. M. Chittapur, “Track-Before-Detect Technique for Mitigating Sea Clutter Based on Hough Transform”, IJCSN International Journal of Computer Science and Network, Volume 3, Issue 3, 66-70, June 2014.
5. M. Uney, B. Mulgrew, D Clark, “Maximum Likelihood Signal Parameter Estimation via Track Before Detect”, Conference: Sensor Signal Processing for Defence, At Edinburgh, Volume: 1, 2015.
6. A.G. Tartakovsky, A. E. Kolessa, A. P. Ivanov, A. P. Lukyanov, and V. A. Radchenko, “Efficient Estimation and Decision-Making Methods for Short Track Identification and Orbit Determination,” Proceedings of the 1st NEO and Debris Detection Conference, Darmstadt, Germany, 22-24 January 2019, published by the ESA Space Safety Programme Office, Ed. T. Flohrer, R. Jehn, F. Schmitz (<http://neo-sst-conference.sdo.esoc.esa.int>, January 2019, pp. 1-10).
7. P. Hickson, “A fast algorithm for the detection of faint orbital debris tracks in optical images”, preprint, 2018. [Электронный ресурс] https://www.researchgate.net/publication/327434972_A_fast_algorithm_for_the_detection_of_faint_orbital_debris_tracks_in_optical_images (Дата обращения: 25.08.2019).

8. Kolessa, A. E. "Detection of Faint Space Debris Elements with Unknown Orbits". In 6th European Conference on Space Debris, volume 723 of ESA Special Publication, page 143, 2013. [Электронный ресурс]
https://www.researchgate.net/publication/282973729_DETECTION_OF_FAINT_SPACE_DEBRIS_ELEMENTS_WITH_UNKNOWN_ORBITS (Дата обращения: 25.08.2019).
9. Лавров В. В., Лучкин Р. С., Немыкин О. И., Прохоров М. Е., Рындин Ю. Г., Тюрин В. С. Методы и алгоритмы полного цикла обработки последетекторного мало контрастного оптического изображения // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 3. С. 99–107. [Электронный ресурс]
<https://vre.instel.ru/jour/article/view/255> <https://elibrary.ru/item.asp?id=32627981> (Дата обращения: 25.08.2019).
10. Гусева А.И., Тихомирова А.Н. Дискретная математика для информатиков и экономистов: Учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. [Электронный ресурс]
<http://znanium.com/catalog/product/562823> (Дата обращения: 25.08.2019).
11. Технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения/ К.Н. Свиридов. - М.: Изд. "Знание", 2005 – 452 с. - ISBN 5-07-002998-3.
12. Лавров В. В., Лучкин Р.С., Прохоров М. Е. Рындин Ю. Г., Тестов А.В. Сегментация низкокачественных ОИ неизвестных объектов с использованием робастных методов [Электронный ресурс]
<http://nauchoboz.ru/wp-content/uploads/2019/07/%D0%9C%D0%B5%D0%B6%D0%B4%D1%83%D0%BD%D0%B0%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D1%84%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%BC-%D0%9D%D0%90%D0%A3%D0%9A%D0%90-%D0%98-%D0%98%D0%9D%D0%9D%D0%9E%D0%92%D0%90%D0%A6%D0%98%D0%98-28-%D0%B8%D1%8E%D0%BD%D1%8F-2019-%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C-1.pdf> (Дата обращения: 25.08.2019).
14. Dennis, A. Systems Analysis and Design: An Object-Oriented Approach with UML/ Alan Dennis, Barbara Haley Wixom, David Tegarden. - 5th edition - New York: John Wiley & Sons Inc, 2015. – 544 p. - ISBN-10: 1118804678.
15. Лучкин Р. С., Немыкин О. И., Прохоров М. Е., Рындин Ю. Г., Тюрин В. С. Байесов алгоритм выделения конструктивных элементов на мало контрастном последетекторном изображении удалённого объекта. [Электронный ресурс] <https://elibrary.ru/item.asp?id=35210509> (Дата обращения: 25.08.2019).
16. Харинов. М. В. Обобщение трех подходов к оптимальной сегментации цифрового изображения. Труды СПИИРАН. 2013. Вып. 2(25). ISSN 2078-9181
17. Эфрон, Б. Нетрадиционные методы многомерного статистического анализа/ Б. Эфрон. - М.: Финансы и статистика, 1988.- 263 с. - ISBN 5-279-00277-11.

Малянова Л.И., Сергеева М.А.

Методы предварительного обследования конструкций зданий и сооружений

*Чебоксарский институт (филиал) Московского Политехнического Университета
(Россия, Чебоксары)*

doi: 10.18411/lj-10-2019-13

idsp: ljjournal-10-2019-13

Аннотация

Обследование технического состояния строительных конструкций является самостоятельным направлением строительной деятельности. Оно охватывает комплекс вопросов, связанных с обеспечением эксплуатационной надежности зданий, с проведением ремонтно-восстановительных работ, а также с разработкой проектной документации по реконструкции зданий и сооружений.

Ключевые слова: дефектоскопия, строительные конструкции, неразрушающий контроль, разрушающий контроль, повреждающий метод, обследование зданий.

Abstract

Inspection of the technical condition of building structures is an independent direction of construction activity. It covers a range of issues related to ensuring the operational