

УДК 520.88

КОМПЛЕКС АЛГОРИТМОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО ОПТИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ, ОЦЕНКИ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ И ПАРАМЕТРОВ ОРБИТ

Колесса А. Е.¹, Пругло А. В.², Равдин С. С.³, Ким А. К.⁴, Лукьянов А. П.⁵

COMPLEX OF ALGORITHMS FOR AUTOMATIC DETECTION OF SPACE OBJECTS FROM OPTICAL IMAGES, EVALUATION OF ANGULAR COORDINATES AND ORBITAL PARAMETERS

Kolessa A. E., Pruglo A. V., Ravdin S. S., Kim A. K., Lukyanov A. P.

Software and algorithmic complex is created for processing frames in real-time while providing the sensitivity and accuracy close to the potentially achievable. The use of the complex allowed implementing 3 modes of observation: sidereal tracking, accurate satellite tracking, detection of new objects and their tracking.

Keywords: low-orbit satellites, high elliptical satellites, a network of telescopes, image processing, task management.

Введение

В рамках работ, проводимых ОАО «МАК “Вымпел”», был создан комплекс программ и алгоритмов, обеспечивающих выполнение следующих задач:

- 1) Фильтрация входных кадров, выделение и классификация изображений космических объектов (КО) и звезд;
- 2) Измерение параметров изображений, уточнение светимостей и положений выделенных объектов;
- 3) Отождествление выделенных изображений звезд со звездным каталогом;
- 4) Определение параметров преобразования из линейных координат сенсора в угловые координаты;
- 5) Объединение угловых замеров, принадлежащих одной траектории;

6) Построение начальной орбиты по объединенным угловым замерам;

7) Идентификация наблюдаемых объектов с каталогом КО;

8) Построение уточненной траектории объекта с использованием выбранной процедуры прогноза движения и обновление каталога КО;

9) Прогнозирование положений КО каталога на выбранный момент времени и составление плана дальнейших наблюдений.

Созданный программно-алгоритмический комплекс обеспечивает обработку кадров в реальном масштабе времени при обеспечении чувствительности и точности, близких к потенциально достижимым. Применение комплекса позволило реализовать 3 режима наблюдения: режим часового ведения (в нескольких точках вдоль трека КО); режим сопровождения (ведение КО во время экспо-

¹Колесса Алексей Евгеньевич, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры информационных системы Московского физико-технического института, начальник научно-технического отдела ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: kolessa@yandex.ru.

²Пругло Алексей Витальевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: my@dinfo.ru.

³Равдин Сергей Семенович, канд. техн. наук, преподаватель кафедры информационных систем Московского физико-технического института, старший научный сотрудник ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: wurf@yandex.ru.

⁴Ким Андрей Климентьевич, начальник сектора по технологии моделирования ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: kimkum@yandex.ru.

⁵Лукьянов Александр Петрович, д-р техн. наук, доцент кафедры информационных системы Московского физико-технического института, начальник сектора по сбору и обработке оптических наблюдений ОАО «МАК “Вымпел”»; e-mail: kikolo@mail.ru.

зиции); режим обнаружения-уточнения орбит новых объектов (с досопровождением на интервале времени максимально возможной длины). Последний режим может работать как на одном телескопе, переводимом из режима обнаружения в режим сопровождения, так и на двух (нескольких), функции которых разделены.

1. Обработка кадров в режиме часового ведения

Входной кадр с ПЗС-матрицы имеет неоднородный фон из-за облаков, подсвечиваемых Луной, рассеянным солнечным излучением (в сумерках) и близлежащими населенными пунктами и другими источниками искусственной подсветки. Имеются и аппаратные причины, вызывающие неоднородность фона в кадре. Поэтому требуется дополнительная обработка, чтобы оценить истинные яркости точечных источников в каждой точке, которую будем называть «обелением» кадра, имея в виду удаление пространственно-коррелированной компоненты фона. Одним из простейших, но в то же время робастных алгоритмов, является оценка параметров известной модели функции рассеяния точки (ФРТ), как правило, Гауссовой, минимизацией среднеквадратического отклонения от модельного представления сигналов звезд.

Обозначим через K_i значение i -го пикселя профиля ФРТ. Поставим задачу найти оптимальную в среднеквадратическом смысле оценку величины амплитуды данного профиля в заданном месте изображения.

Пусть соответствующие пиксели изображения обозначаются как I_i . Необходимо получить оценку величины амплитуды A и смещения B таких, что

$$E = \sum_i [I_i - AK_i - B]^2 \rightarrow \min.$$

Взяв производные E по A и B , и приравняв их выражения к нулю, несложно получить следующие оптимальные в среднеквадратическом смысле оценки яркости и смещения

$$\tilde{A} = \frac{N \sum_i I_i K_i - \sum_i I_i \sum_i K_i}{N \sum_i K_i^2 - \left(\sum_i K_i \right)^2}$$

$$\tilde{B} = \frac{\sum_i I_i - \tilde{A}}{N}$$

Применив данный фильтр в каждом пикселе входного изображения, получим кадр оценок амплитуды \tilde{A} . Этот кадр свободен от постоянной составляющей и, при правильном выборе ожидаемого профиля звезды, дает значения амплитуды с учетом функции рассеяния точки.

После «обеления» кадра проводится его сегментация, включающая три этапа:

1) Адаптивная пороговая обработка, включающая определение дисперсии шума при помощи итеративного исключения аномальных точек.

2) Выделение связанных областей с учетом возможной слабой связанности (допускаются несоседние точки)

3) Классификация выделенных областей по признаку формы и размера на звезды и засечки КО.

Следующим этапом работы алгоритма является оценка параметров звезд и засечек КО.

Профиль звезды аппроксимируется 2D гауссоидой

$$F_{\text{ФРТ}}(r, A, \sigma) = Ae^{\frac{r^2}{\sigma^2} 4 \ln(2)}$$

Засечка КО аппроксимируется линейной гауссоидой

$$F_{\text{ТРК}}(x, y, A, \sigma, l) = F_{\text{ФРТ}} \left(\sqrt{\left(s \left(|x| - \frac{l}{2} \right) \right)^2 + y^2}, A, \sigma \right),$$

где l — длина засечки.

Параметры модельного профиля оцениваются с помощью нелинейного метода наименьших квадратов и алгоритма Маркварда-Левенберга [1].

2. Обработка кадров в режиме сопровождения космических объектов

В режиме сопровождения КО подход, использованный при обработке кадров, полученных в режиме звездного ведения, не применим из-за того, что треки звезд тусклые и перекрываются друг другом, что приводит к

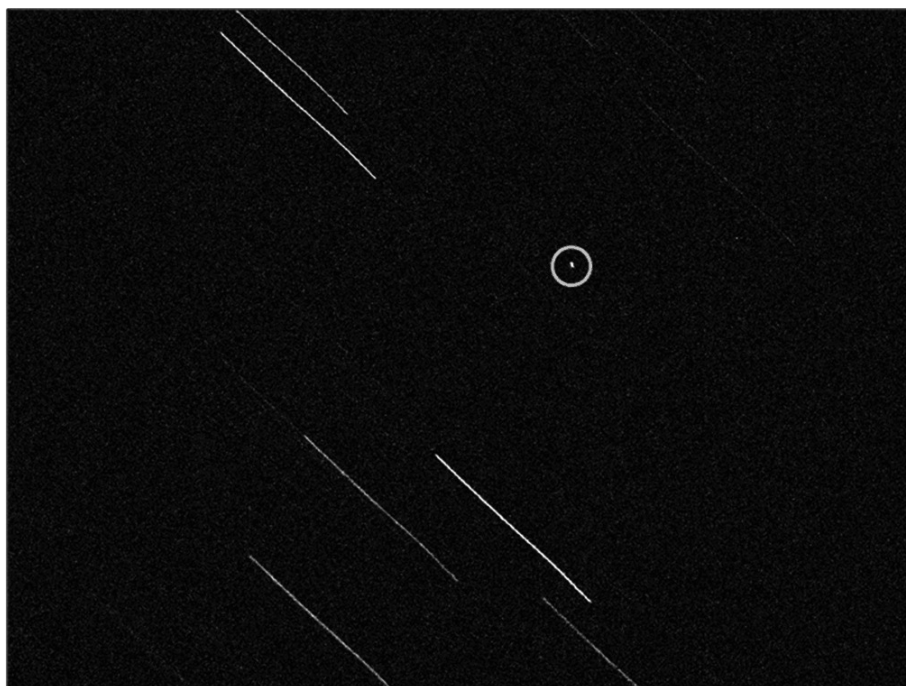


Рис. 1. Слежение за спутником. Звезды — черточки, КО — точечный объект

невозможности разделения регионов, относящихся к разным звездам. Также очень сложно точно определить концы звездных треков для привязки к звездному каталогу (рис. 1).

Обработка кадра начинается с оценки направления и длины треков звезд, необходимой для точной координатной привязки. Из-за низкого отношения сигнал/шум каждого отдельного трека звезды, определение этих параметров затруднено. Однако, эти параметры одинаковы для всех треков, поэтому переход к пространственным частотам с помощью БПФ, позволяет объединить сигнал всех треков [2]. Ориентация определяется нахождением максимума преобразования Радона БПФ-кадра, а длина — по частоте «звона» в перпендикулярном направлении (рис. 2).

На втором шаге работы алгоритма проводится фильтрация кадра, согласованная с ожидаемым сигналом звезд. Идея согласованной фильтрации состоит в рекурсивной свертке с ожидаемой формой сигнала от звезды и взятии минимума из свертки и предыдущего шага рекурсии. Таким образом, подавляются все сигналы, форма которых отличается от ожидаемой. В данном случае подавляются все сигналы, кроме треков звезд, поэтому разница входного кадра и отфильтрованного содержит изображения спутников и остаточный шум фильтрации (рис. 3).

Третий шаг алгоритма — выделение концов звездных следов. Для этого проводится свертка результата согласованной фильтрации с направленной функцией включения Хэвисайда. На выходном кадре после свертки определяются координаты локальных экстремумов, которые соответствуют началам и концам треков звезд и обеспечивают проведение координатной привязки (рис. 4).

Последний, четвертый шаг алгоритма — вычитание результата согласованной фильтрации из входного кадра, в результате которого в кадре остается только сигнал КО и шум (рис. 5).

3. Режим обнаружения новых КО с их последующим сопровождением

Этот режим является объединением двух изложенных выше. Его основной особенностью является отсутствие априорной информации об орбите наблюдаемого КО и необходимостью ее оценивания. Очевидно, что реализация такого режима возможна только, если обработка кадров и получение координат КО проводится в реальном масштабе времени. Алгоритм решения задачи рекуррентного оценивания орбиты по получаемым измерениям работает следующим образом.

По первым двум засечкам оценивается 4 параметра круговой орбиты, которая могла

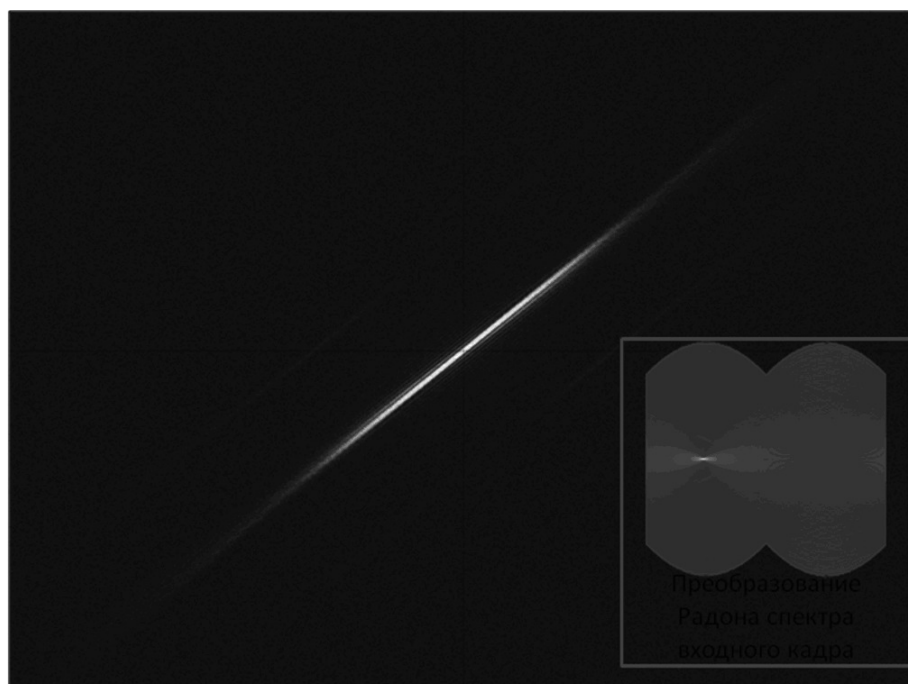


Рис. 2. Преобразование Фурье входного кадра

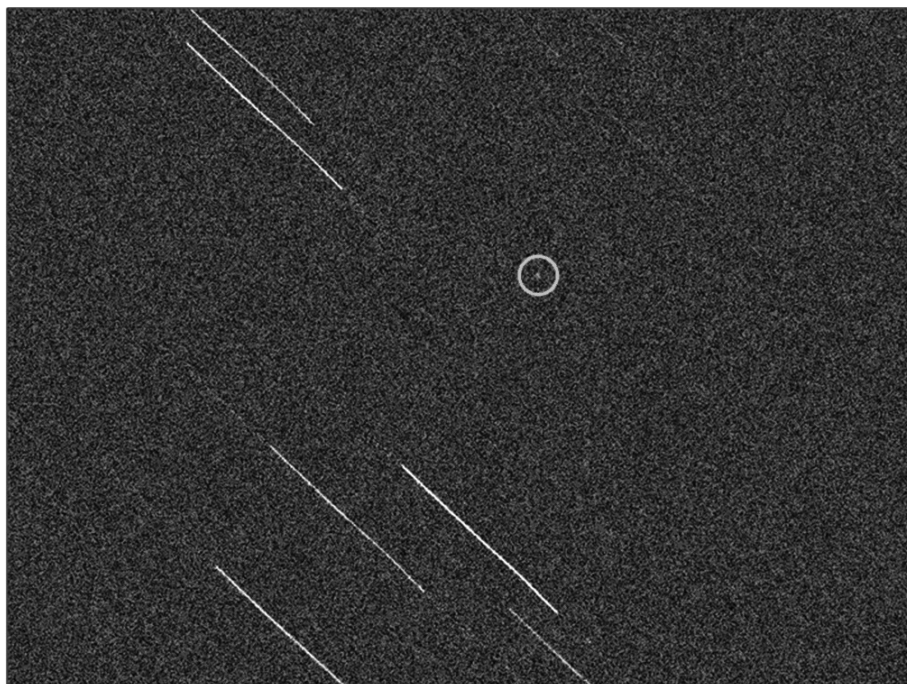


Рис. 3. Результат фильтрации, согласованной с сигналом звезд

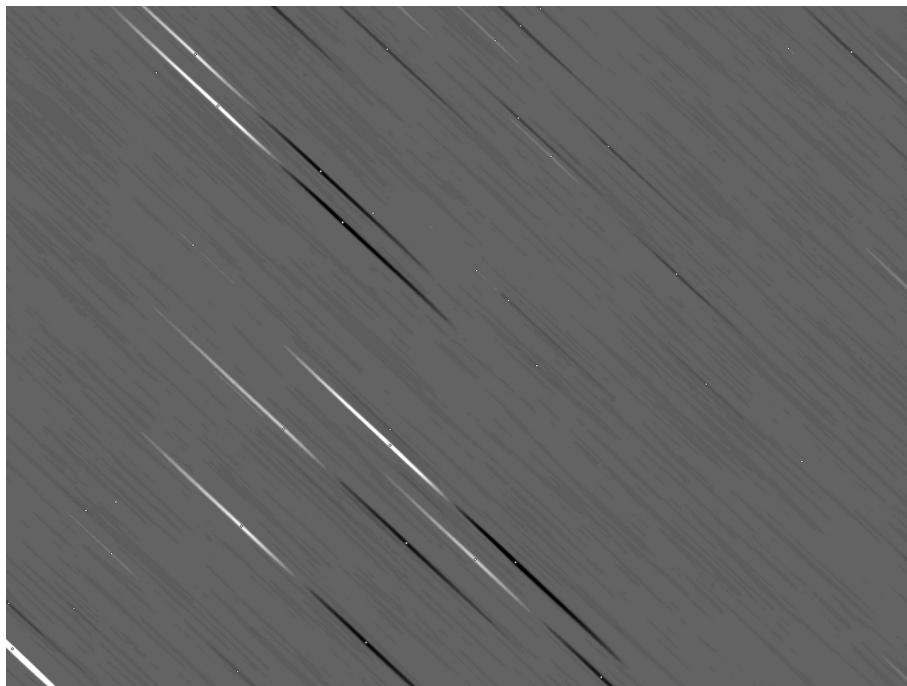


Рис. 4. Изображение, свернутое с направленной функцией включения Хэвисайда, имеет экстремумы на обоих концах треков

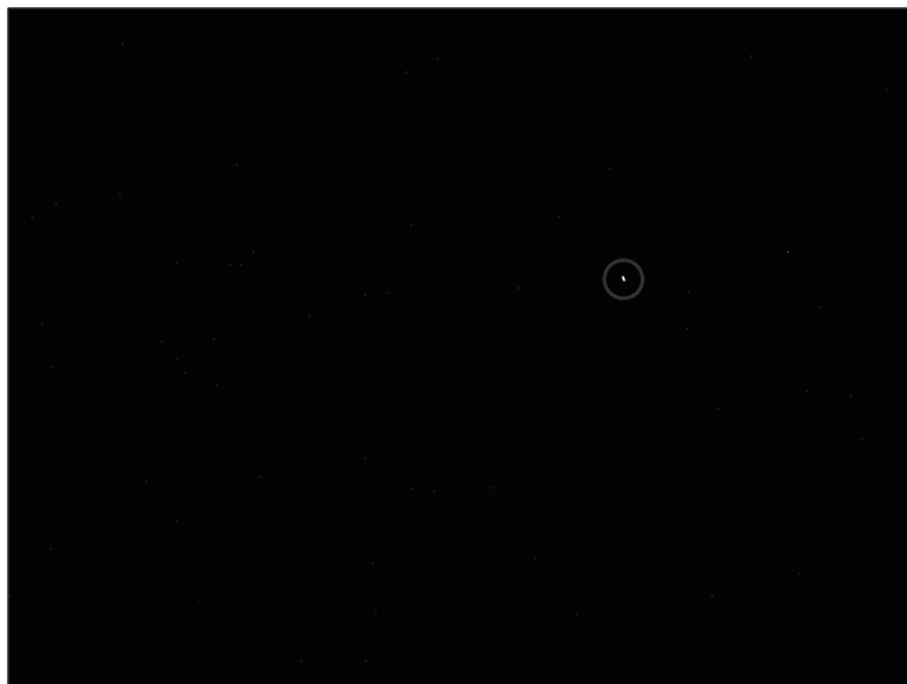


Рис. 5. На выходном кадре присутствуют только КО и изолированные шумовые пиксели

бы пройти через них, и прогнозируется угловое положение следующей засечки.

После получения третьей засечки оценивается полный вектор орбитальных параметров и прогнозируется угловое положение следующей засечки.

По каждой новой засечке уточняется орбита и прогноз наблюдений следующей засечки.

Для реализации сопровождения новых КО результаты оценок их орбит используются для перевода оптической оси телескопа в прогнозируемые направления движения КО.

4. Реализация и экспериментальная отработка различных режимов работы

В ОАО «МАК «Вымпел» были созданы оптические комплексы со специализированным программным обеспечением, позволяющие реализовать все три режима наблюдения космических объектов, описанные выше.

В 2012 г. были проведены автономные проверки функционирования этих комплексов в Тирасполе и Москве. Это позволило в конце 2012 г. произвести установку и третьего комплекса в Кисловодске. С начала 2013 г. проводится их тестовое использование в автоматическом режиме. Результаты измерений передаются в ИПМ им. М. В. Келдыша для поддержания каталога космического мусора.

В процессе тестового использования в течение 15 мес. в были получены измерения координат и фотометрии по более чем 3000 различных КО, позволившие уточнить их орбиты.

Экспериментально установлена предельная проникающая способность созданных комплексов. Она составляет 11 звездную ве-

личину на апертуре 12,5 см в режиме часового ведения (Кисловодск, Тирасполь) и достигает 15 звездной величины на апертуре 25 см (Москва) в режиме сопровождения КО.

Точность угловых замеров верифицирована по эталонным спутникам. СКО ошибок измерения углов находится на уровне единиц угловых секунд.

Все сеансы наблюдения проводятся и обрабатываются автоматически в реальном масштабе времени на стандартных персональных компьютерах.

Выводы

Созданный программно-алгоритмический комплекс обеспечивает обработку кадров в реальном масштабе времени при обеспечении чувствительности и точности, близких к потенциально достижимым. Применение комплекса позволило реализовать 3 режима наблюдения:

- в режиме часового ведения (ступенчатое сопровождение)
- в режиме точного сопровождения спутника
- в режиме обнаружения новых объектов с последующим уточняющим сопровождением. Этот режим реализуется как на одном телескопе, переводимом из режима обнаружения в режим сопровождения, так и на двух (нескольких), функции которых разделены.

Литература

1. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. М: Мир, 1985. 509 с.
2. Лагуткин В.Н. Частотные алгоритмы адаптивной нелинейной фильтрации последовательности изображений // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. №5. С. 27–36.

Ключевые слова: низкоорбитальные спутники, высокоэллиптические спутники, сеть телескопов, обработка изображений, задача управления.

Статья поступила 24 октября 2013 г.

Московский физико-технический институт, г. Москва
ОАО «МАК «Вымпел»», г. Москва

© Колесса А. Е., Пругло А. В., Равдин С. С., Ким А. К., Лукьянов А. П., 2013