

АЛГОРИТМ СКАНИРОВАНИЯ ЭФЕМЕРИД В СИСТЕМЕ ДАЛЬНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ МАЛЫХ НЕБЕСНЫХ ТЕЛ

А.С. Алексеев, Б.М. Пушной, Н.В. Кайсина

Вычислительный центр СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Раннее обнаружение малых небесных тел, приближающихся к Земле, представляется достаточно важной задачей. Необходимо дальнейшее обнаружение, за десятки и сотни суток до сближения, чтобы провести эффективное наблюдение для уточнения обстоятельств сближения и организовать противодействие, если это необходимо. Малый диаметр тел и высокая скорость углового движения по небесной сфере препятствуют дальнему обнаружению.

Видимое движение по небесной сфере является основным информативным признаком при обнаружении астероидов. Изображение астероида имеет форму короткого штриха и его контрастность не возрастает с увеличением времени экспонирования, что препятствует обнаружению малых астероидов. Предлагается алгоритм компьютерного преобразования числовых массивов, получаемых от ПЗС-матрицы, в пространство параметров орбитального движения. В этом пространстве изображения тел, движущихся по эфемеридам заданного класса, представляются неподвижными, что позволяет использовать длительное экспонирование.

Движение тел в гравитационном поле Солнца описывается шестью параметрами, так что телу, которое движется по любой орбите, соответствует точка в шестимерном пространстве, координатами которой являются численные значения этих параметров. Нас интересуют тела, которые в момент наблюдения находятся в поле зрения телескопа и при своем дальнейшем движении сближаются с Землей, которая движется по своей орбите. Этому условию удовлетворяют не все орбиты, а весьма узкий класс. Для их определения достаточно четырех параметров: большой полуоси эллипса, эксцентриситета, наклона орбиты и интервала времени между наблюдением и сближением.

В поле зрения телескопа могут наблюдаться движения в различных направлениях, с разными угловыми скоростями и на различных удалениях. Но те, которые движутся к Земле, будут характеризоваться определенными соотношениями между координатами, скоростями и направлениями. Этим телам в четырехмерном пространстве будут соответствовать точки, то есть отдельные элементы четырехмерного цифрового массива в памяти ЭВМ. В этих элементах будет происходить накопление сигналов, возбужденных фотонами от движущегося тела. Сигналы от тел, движущихся в иных направлениях, по другим орбитам, будут распределяться по разным элементам массива и эффект накопления проявляться не будет.

Физическая сущность алгоритма дальнего обнаружения состоит в осуществлении специального сканирования ПЗС-матрицы. Нужно считывать заряды фотоэлектронов с тех пикселей матрицы, на которые в данный момент соответствии с математической моделью движения могут попасть фотоны от приближающегося тела. При этом считанные заряды нужно направлять для суммирования (накопления) в элементы четырехмерного массива (пространства параметров), соответствующие различным вариантам орбит определенного нами класса.

Программная реализация алгоритма иллюстрируется простой структурной схемой.

Структурная схема алгоритма обнаружения



Узел *параметры эфемериды* вычисляет эфемериды, которые используются как адреса при сканировании двумерного массива данных, считываемого с ПЗС-матрицы, и выдает параметры этих эфемерид, которые служат адресами для размещения (и накопления) этих данных в четырехмерном массиве.

Нормировка — вычисление весовых коэффициентов, с которыми должны осредняться данные, подлежащие накоплению. Они определяются ожидаемой скоростью видимого движения гипотетических тел непосредственно по матрице, положением эфемериды на ней, количеством пикселей матрицы, по которым она прошла, с учетом пикселей, “засвеченных” звездами. Учитывается также неравномерность небесного фона по пространству и по времени.

В узле *обработка изображений* производится считывание матрицы по традиционному алгоритму с визуальным обнаружением штриховых следов крупных небесных тел, оценка изменений прозрачности атмосферы во времени и компенсация пространственной неоднородности матрицы.

Статистическая обработка — это реализация собственно обнаружения с привлечением методов теории статистических решений. Обнаружение сводится к поиску наиболее “яркой” точки в четырехмерном пространстве параметров.

Дискретная структура CCD-матриц требует задания дискретного множества возможных движений (эфемерид) в поле зрения телескопа. Количество эфемерид определяется практическими ограничениями, соответствующими конкретной задаче наблюдения. Исследована численным моделированием эффективность алгоритма обнаружения малых тел, которые во время наблюдения находятся в поле зрения телескопа и при своем дальнейшем орбитальном движении сблизятся с Землей.

Данный алгоритм использует математическую модель орбитального движения для избирательного сканирования (считывания) зарядов с пикселей ПЗС, как раз в те моменты, когда на них воздействует свет, излучаемый движущимся малым телом. Показано, что обнаружение “закона движения” более эффективно, чем обнаружение последовательности отдельных положений движущегося небесного тела.

Предлагается своеобразная компьютерная поддержка известного в наблюдательной астрономии метода гидирования телескопа по эфемериде, в соответствии с предсказанным движением наблюдаемого тела. Этот метод также обеспечивает удлинение экспонирования и эффективное накопление энергии слабого излучения. Но в компьютеризованной системе гидирование осуществляется в форме сканирования числового массива и притом по многим различным эфемеридам. Собственно телескоп в нашем случае гидируется обычным образом по “часовой” оси.

Продолжительность накопления не ограничивается временем прохождения изображения обнаруживаемого тела по полю зрения телескопа, то есть по матрице. Если используются телескопы с многоматричными блоками или несколько телескопов, расположенных в различных местах, то пространство параметров в этом случае должно быть общим. Процесс экспонирования в нем может продолжаться после неизбежных перерывов наблюдения.

Это свойство алгоритма требует объединения средств наблюдения в систему с общим компьютером и пространством параметров для повышения эффективности обнаружения.

Для обеспечения возможности дальнего обнаружения мы вводим астродинамику непосредственно в процесс наблюдения, непосредственно в астрономический прибор и производим вычисление параметров движущегося тела до его фактического обнаружения. Тем самым мы автоматизируем процесс визуального анализа изображений. Кроме того, обнаружение в нашем случае имеет “заказной” характер: обнаруживается то, что нас интересует. К тому же это существенно упрощает программную реализацию алгоритма.

Характерная особенность алгоритма состоит в том, что обработка информации переносится в основном на исходные числовые массивы, получаемые непосредственно от ПЗС–матрицы в реальном времени. Это позволяет производить “редактирование” массивов с целью отбора для последующего анализа только тех фрагментов изображения звездного неба, на которых отсутствует интенсивная засветка от звезд, планет, крупных астероидов, космических аппаратов, а также бликов и других оптических помех. Это возможно, так как интенсивность полезного излучения при дальнем обнаружении существенно ниже уровня небесного фона. Кроме того, открывается возможность отслеживать изменчивость уровня небесного фона и прозрачности атмосферы во времени. Все это позволяет обеспечить необходимую стационарность квантового “шума” по пространству и времени для осуществления особо продолжительного экспонирования движений вдоль заданных эфемерид.

В этих условиях справедлива простейшая оценка эффективности системы дальнего обнаружения. Она основана на соотношении между временем экспонирования в обычной и “компьютеризованной” системах. Если в обычной системе движущийся астероид освещает один пиксел матрицы в течение одной минуты и переходит на соседний, то в данном алгоритме экспозиция пропорциональна числу пикселов, по которым прошло изображение астероида за время наблюдения. Полезный эффект накопления нарастает пропорционально квадратному корню от продолжительности экспонирования. В течение 5 часов астероид может пройти 300 пикселов ПЗС–матрицы. Это соответствует 16–кратному уменьшению количества света, отражаемого наблюдаемым телом. Таким образом, если обычная система уверенно обнаруживает тела диаметром 200 м в поясе астероидов, на расстоянии 300 млн. км, то компьютерной системе будут доступны для обнаружения в тех же условиях тела диаметром 50 м. Сближение такого астероида с Землей может произойти через год и более, что зависит от параметров его орбиты (возможно движение астероида к перигелию и приближение к Земле с “дневной” стороны). Если на таком расстоянии будет обнаружена комета, то ее сближение произойдет не ранее, чем через 2–3 месяца. Вычислительный процесс в алгоритме должен заранее настраиваться на определенный диапазон расстояний и при работе на меньших расстояниях его эффективность будет лучше.

Для обеспечения высокой надежности обнаружения предусматривается режим последующего отслеживания (сопровождения) движения по той же или нескольким “подозрительным” эфемеридам до достижения практически достоверного результата. Точность результатов первоначального обнаружения недостаточна для прогноза столкновения тела с Землей. Необходимая точность может быть получена при отслеживании движения тела пока оно не пройдет примерно половину пути к Земле.

Понятно, что реальная система обнаружения опасных небесных тел должна обеспечивать регулярный обзор значительной части небесной сферы. Исследования показали, что можно ограничиться областью наблюдения, сосредоточенной вдоль некоторой линии на небесной сфере, направленной ортогонально эклиптике. Любое тело, приближающееся к Земле, должно прежде эту линию пересечь. Место, направление, скорость и момент пересечения определяются параметрами движения тела. Характерно, что в этом случае интервал времени между обнаружением и фактическим сближением будет существенно зависеть от орбиты тела и расположения области наблюдения.

Литература

1. Алексеев А.С., Пушной Б.М., Кайсина Н.В. О методе дальнего прогноза сближений малых небесных тел с Землей. “Астрономический вестник”, 1994. Т. 28, № 4–5, с. 223–231. “Наука”, Москва.