

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ АСТРООБЪЕКТОВ НА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ УЧАСТКОВ ЗВЕЗДНОГО НЕБА В СИСТЕМАХ АСТРООРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Балухто А.Н.

Научный центр нейрокompьютеров

Существуют различные методы идентификации астрообъектов в бортовых системах астроориентации космических аппаратов (КА). Одним из перспективных направлений в повышении эффективности решения этой задачи является использование нейросетевого подхода. Ниже рассматривается метод идентификации астрообъектов на цифровых изображениях участков звездного неба, получаемых с помощью широкопольной бортовой оптико-электронной камеры (БОЭК) наблюдения, основанный на использовании нейросетевых систем, представимых  $H$ -сетями Петри [1]. В отличие от других методов данный метод предполагает исходную постановку задачи как задачи целочисленного программирования, которая может быть сформулирована следующим образом.

Пусть  $G$  есть изображение некоторой области небесной сферы, полученное с помощью БОЭК на текущий момент наблюдения, по результатам обработки которого образован кадр наблюдения, задаваемый множеством измерений  $K_G = \{(\alpha_1, \delta_1, g_1), (\alpha_2, \delta_2, g_2), \dots, (\alpha_m, \delta_m, g_m)\}$ , где  $(\alpha_i, \delta_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m$ , - угловые координаты (в приборной системе координат)  $i$ -го точечного объекта, выделенного на изображении  $G$ , а  $g_i$  - его интегральная яркость;  $m$  - общее число объектов, выделенных на изображении. В общем случае в качестве таких точечных объектов (ТО) могут выступать астрообъекты, космические объекты, находящиеся на околоземных орбитах, или ложные образования на изображении, обладающие свойствами одного из указанных типов объектов.

Поставим в соответствие кадру наблюдения  $K_G$  некоторый фрагмент  $K^*$  бортового астрокаталога, используемый для идентификации астрообъектов, присутствующих в кадре наблюдения  $K_G$ . Размер и координаты участка звездного неба, задаваемого фрагментом  $K^*$  бортового астрокаталога, определяются размерами кадра наблюдения  $K_G$  и прогнозными оценками параметров угловой ориентации оптической оси БОЭК в системе координат, в которой определен бортовой астрокаталог. В дальнейшем такую систему координат условно будем называть "каталожной" (КСК) и считать, что центр ее связан с центром приборной системы координат, а ее оси параллельны соответствующим осям абсолютной геоцентрической системы координат.

Обозначим через  $x_{ij} \in \{0, 1\}$  - двоичную переменную, единичное значение которой указывает на то, что  $i$ -й объект, обнаруженный на изображении, есть  $j$ -й астрообъект из фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога, а нулевое значение указывает на отсутствие такого соответствия.

Требуется найти такое значение  $x^*$  вектора  $x$ , в качестве элементов которого выступают переменные  $x_{ij}$ ,  $i=1, 2, \dots, m$  и  $j=1, 2, \dots, n$ , которое обеспечивало бы минимум целевой функции

$$c(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n r_{ik,il} x_{ij} x_{kl} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

при ограничениях:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, \quad i = 1, \dots, m, \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1, \quad j = 1, \dots, n,$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = R, \quad R \leq m, \quad R \leq n,$$

где  $m$  - общее число объектов, выделенных на изображении  $G$ ;  $n$  - общее число астрообъектов фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога;  $R$  - общее число идентифицируемых астрообъектов; коэффициенты  $r_{ik,jl}$  определяются в соответствии с выражением:

$$r_{ik,jl} = \text{abs}(d_{ik}^{(1)} - d_{jl}^{(2)}),$$

где  $d_{ik}^{(1)}$  - угловое расстояние между  $i$ -м и  $k$ -м объектами, выделенными на изображении  $G$ ,  $d_{jl}^{(2)}$  - угловое расстояние между  $j$ -м и  $l$ -м объектами фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога; коэффициенты  $s_{ij}$  определяются по формуле:

$$s_{ij} = \text{abs}(g_i^{(1)} - g_j^{(2)}),$$

где  $g_i^{(1)}$  - интегральная яркость  $i$ -го объекта, выделенного на изображении  $G$ ;  $g_j^{(2)}$  - интегральная яркость  $j$ -го объекта фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога (полагается, что яркости  $g_i^{(1)}$  и  $g_j^{(2)}$  определены в одних и тех же единицах измерения).

Выбор целевой функции оптимизации в виде (1) обусловлен тем, что угловые расстояния между астрообъектами и их яркости являются величинами стабильными и могут рассматриваться как постоянные.

Заметим, что целевая функция (1) не является единственной. Так, при наличии прогнозной оценки параметров ориентации приборной системы координат в КСК указанная целевая функция может быть записана в следующем модифицированном виде:

$$c(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n r_{ik,il} x_{ij} x_{kl} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n s_{ij}^* x_{ij} \quad (2)$$

где коэффициенты  $s_{ij}^*$  определяются следующим выражением:

$$s_{ij}^* = \left( \sum_{k=1}^3 (\gamma_{ik} - \gamma_{jk})^2 \right)^{0.5}$$

где  $\gamma_{ik}$ ,  $k=1,2,3$ , - прогнозные оценки направляющих косинусов, определяющих направление единичного вектора в КСК на  $i$ -й объект кадра наблюдения  $K_G$ ;  $\eta_{jk}$ ,  $k=1,2,3$ , - направляющие косинусы  $j$ -го объекта фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога. Очевидно, что чем точнее осуществляется прогноз значений параметров ориентации приборной системы координат в КСК, тем меньше будет вероятность ошибки выделения на изображении астроориентиров и их идентификации.

Частным случаем функций (1) и (2) является функция

$$c(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m \sum_{l=1}^n r_{ik,il} x_{ij} x_{kl} \quad (3)$$

Вид целевых функций (1), (2), (3) явным образом указывает на то, что рассмотренная выше постановка задачи выделения на изображении опорных астрообъектов и их идентификации может быть решена с использованием нейронных сетей, минимизирующих свою энергию, в частности, с использованием подкласса таких сетей, представимых  $H$ -сетями Петри.

Общий вид  $H$ -сети Петри, соответствующий рассмотренной выше постановке решаемой задачи, представлен на рис. 1. Индексы позиций, в обозначении которых присутствует символ  $q$ , интерпретируются как номера объектов, выделенных на изображении. Индексы позиций, в обозначении которых присутствует символ  $v$ , интерпретируются как номера объектов фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога. число переходов сети  $L=m \cdot n$ , где  $m$  - общее число объектов, выделенных на изображении;  $n$  - общее число объектов фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога.

Функция энергии для данной сети имеет вид:

$$E(x) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L w_{ij} x_i x_j - \sum_{i=1}^L b_i x_i \quad (4)$$

где  $w_{ij}$  и  $b_i$ ,  $i, j=1, 2, \dots, L$ , - некоторые коэффициенты.

Сравнивая выражение (4) с одним из выражений (1), (2), (3), получим, что

$$w_{ij} = -abs(d_{\mu(i),\mu(j)}^{(1)} - d_{\xi(i),\xi(j)}^{(2)}), \quad i, j = 1, 2, \dots, L,$$

где  $\mu(i)$  - номер объекта, выделенного на изображении  $G$  и равного индексу входной позиции перехода  $t_i$ , в обозначении которой присутствует символ  $q$ ;  $\xi(i)$  - номер объекта из фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога равный индексу входной позиции перехода  $t_i$ , в обозначении которой присутствует символ  $v$ ;  $d_{\mu(i),\mu(j)}^{(1)}$  - угловое расстояние между  $\mu(i)$ -м и  $\mu(j)$ -м объектами, обнаруженными на изображении  $G$ ;  $d_{\xi(i),\xi(j)}^{(2)}$  - угловое расстояние между  $\xi(i)$ -м и  $\xi(j)$ -м объектами фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога; коэффициенты  $b_i$  определяются по одному из следующих выражений :

$$b_i = -abs(g_{\mu(i)}^{(1)} - g_{\xi(i)}^{(2)}) \quad \text{или} \quad b_i = -\left( \sum_{k=1}^3 (\gamma_{\mu(i),k} - \eta_{\xi(i),k})^2 \right)^{0.5}$$

где  $g_{\mu(i)}^{(1)}$  - интегральная яркость  $\mu(i)$ -го объекта кадра наблюдения  $K_G$ ,  $g_{\xi(i)}^{(2)}$  - интегральная яркость  $\xi(i)$ -го объекта фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога;  $\gamma_{\mu(i),k}$ ,  $k=1,2,3$ , - прогнозные оценки направляющих

косинусов  $\mu(i)$ -го объекта кадра наблюдения  $K_G$  в «каталожной» системе координат;  $\eta_{\xi(i),k}$  – направляющие косинусы  $\xi(i)$ -го объекта фрагмента  $K^*$  бортового астрокаталога.

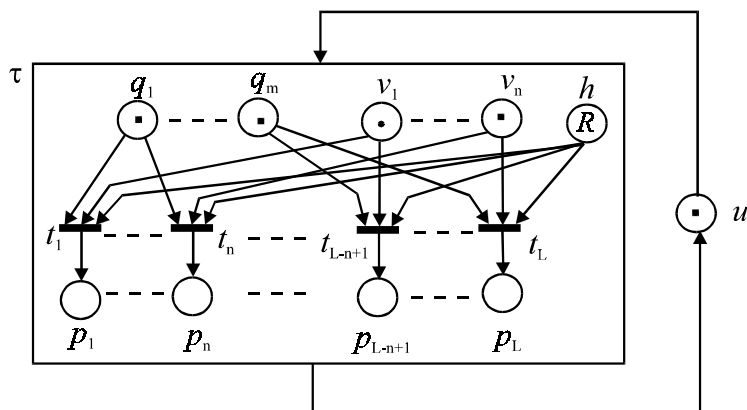


Рис. 1.  $H$ -сеть, используемая при решении задачи выделения на изображении опорных астрообъектов и их идентификации.

Решение задачи осуществляется путем запуска сети на функционирование, в процессе которого ее энергетическое состояние стремится к состоянию, соответствующее минимуму функции энергии (4). Ограничения, в условиях которых решается задача, отображаются структурой сети и ее начальной разметкой. Предельное энергетическое состояние сети и является искомым решением задачи.

Результаты проведения машинных экспериментов показали достаточно высокую эффективность предложенного метода. Так, например, при средней плотности обнаруживаемых астрообъектов  $\lambda_{ao}=1 \text{ гр}^{-2}$ , среднеквадратической погрешности определения в КСК угловых координат астрообъектов  $\sigma_{ao}=0.5 \text{ гр}$ . и числе идентифицируемых астрообъектов  $n_{ao}=3$  вероятность правильной идентификации астрообъектов  $p_{ao}$  равна 0.99 при использовании функции энергии (2). Заметим, что особенностью данной функции является то, что для ее вычисления необходима только угломерная информация.

Как уже отмечалось ранее, при решении рассматриваемой задачи в качестве целевой функции оптимизации может использоваться и функция вида (1), для вычисления которой помимо угломерной информации необходимо иметь и измерения интегральной яркости обнаруживаемых точечных объектов. Позитивной особенностью использования целевой функции оптимизации (1) является то, что вероятность  $p_{ao}$  в этом случае слабо зависит от среднеквадратической ошибки прогноза параметров ориентации ПСК в КСК.

В ходе проведения машинных имитационных экспериментов каких-либо неустойчивостей в работе  $H$ -сетей обнаружено не было. Решение задачи осуществлялось за два-три такта работы  $H$ -сети.

Важно также отметить, что  $H$ -сети могут быть использованы не только для решения рассмотренной выше задачи, но и при решении ряда других задач, связанных с обработкой спутниковых изображений различных типов, например, при совмещении двух изображений участка земной поверхности по заданным узловым точкам или привязке изображений к местности.

Возможны и другие подходы к решению в нейросетевом базисе задачи идентификации астрообъектов, основанные на использовании различных парадигм нейронных сетей. В частности, поиск экстремума целевой функции (1) в условиях заданных ограничений может быть осуществлен с использованием сетей Хопфилда. Алгоритм решения этой задачи с использованием сетей Хопфилда имеет много общего с изложенным выше алгоритмом. Однако при этом возникают определенные сложности, связанные с построением соответствующей функции энергии сети, которая должна учитывать не только целевую функцию оптимизации, но и ограничения, в условиях которых должна решаться задача. Напомним, что в  $H$ -сетях Петри указанные ограничения учитываются на структурно-логическом уровне сети, а не в функции энергии сети. Для решения рассмотренной задачи может быть также использован нейросетевой подход, основанный на использовании обучающихся многослойных нейронных сетей [2]. Суть этого подхода заключается в следующем. На основе астрокаталога формируется база данных "созвездий", например, триплетов (совокупностей из трех звезд). Каждое такое созвездие содержит одну из наиболее ярких звезд и несколько наиболее близко расположенных к ней других каталогизированных звезд. Далее нейронная сеть обучается распознаванию таких базовых "созвездий". В качестве признаков, определяющих образ созвездия, также могут выступать угловые расстояния между звездами и их яркости. Поскольку измерения указанных признаков осуществляется с определенными погрешностями, то в процессе обучения входные сигналы целесообразно предварительно зашумлять. Такого рода обучающиеся нейросетевые системы идентификации астрообъектов наиболее целесообразно использовать в следящих системах астроориентации, поскольку в этом случае уменьшается потребное число распознаваемых астрообъектов.

Литература

1. Балухто А.Н. Нейронные сети, минимизирующие свою энергию, и решение задач целочисленного программирования с булевыми переменными // Нейрокомпьютер. – 1997. – № 3, 4. – С. 7–16.
2. Clarc S. Lindsey, Thomas Lindblad. A method for star identification using neural networks // SPIE. – 1997. – V. 3077. – P. 471–478.