

А.А. Чилингарян

Методы повышения достоверности наблюдения точечных источников  $\gamma$ -излучения с помощью черенковских оптических телескопов

На примере анализа данных наблюдения Крабовидной туманности Уитпловским телескопом, проводится сравнение методов многомерного анализа и нейронной классификации черенковских изображений.

Задача достоверного определения точечных источников  $\gamma$ -квантов является самой важной в наблюдательной астрофизике очень высоких и сверхвысоких энергий.

Традиционная методика проверки статистических гипотез заключается в принятии или отклонении так называемой нулевой гипотезы, которая заключается в отсутствии сигнала. То есть предполагается, что наблюдаемое превышение числа отсчетов при наведенном на источник телескопе, над числом отсчетов телескопа, смотрящего в "пустое" пространство,  $N_{on} - N_{off}$  – обусловлено флуктуациями фона. Для доказательства факта существования источника необходимо отвергнуть эту гипотезу, и чем меньше будет вероятность справедливости нулевой гипотезы, тем выше будет достоверность вывода о наличии сигнала.

В условиях равенства времен наблюдения источника и контрольного наблюдения и при достаточно большем числе отсчетов в каждой серии наилучшим статистическим критерием является [1]:

$$\sigma = \left( N_{on} - N_{off} \right) / \sqrt{N_{on} + N_{off}} . \quad (1)$$

где  $N_{on}$  – число отсчетов при наблюдении источника, а  $N_{off}$  – при наблюдении области звездного неба, где источники заведомо отсутствуют. Вероятность справедливости нулевой гипотезы равна интегралу от  $\sigma$  до  $+\infty$  стандартного нормального распределения и она тем меньше чем больше  $\sigma$ .

Увеличения значения  $\sigma$  можно достичь, произведя классификацию экспериментальных событий по какой-либо методике, с целью подавления фона от протонов и ядер космических лучей (cr), одновременно стараясь не очень сильно подавить полезный сигнал (изображения, инициированные  $\gamma$ -квантами).

Используя высокое качество изображений, полученных на 10-метровом рефлекторе Уитпловской обсерватории [2], удалось перейти к рассмотрению каждого индивидуального экспериментального события (изображения). Параметры изображения вычисляются с помощью метода моментов распределения сигналов ФЭУ вокруг центроида

восстановленного методом наименьших квадратов эллипса потемнения.

Классифицируя экспериментальные изображения, можно значительно уменьшить число фоновых событий (одновременно будет потеряна и часть полезных событий). Новое значение критерия будет равно:

$$\tilde{\sigma} = (\tilde{N}_{\text{on}} - \tilde{N}_{\text{off}}) / (\tilde{N}_{\text{on}} + \tilde{N}_{\text{off}})^{0.5}, \quad (2)$$

где  $\tilde{N}_{\text{on}}$ ,  $\tilde{N}_{\text{off}}$  – число "выживших" после классификации событий.

В настоящее время в коллаборации Уиппл проводятся работы по поиску наилучших дискриминирующих параметров изображения, по данным наблюдения Крабовидной туманности в 1988 – 1989 гг [3]. Эти данные состоят из 66 двадцативосьминичутных ON/OFF сканов – всего 10 миллионов событий, и достоверность факта наличия сигнала до распознавания изображений (по исходным данным с применением только аппаратурного триггера 2 канала из  $91 > 40$  фотоэлектронов) составило  $\sigma = 4.8$  (см. первую строку таблицы).

Проведение классификации изображений по параметру AZWIDTH, учитывающему как размер, так и ориентацию изображения, позволило в 4 раза улучшить достоверность ( $\sigma = 20$ ), и довести отношение сигнал/шум до 0.22 (вторая строка таблицы).

Таблица

Результаты применения различных методик подавления фона к данным наблюдения Крабовидной туманности Уиппловским телескопом.

Метод анализа	$N_{\text{on}}$	$N_{\text{off}}$	Diff	$\sigma$	$\tilde{\sigma}/\sigma$	$P_{\text{cr} \rightarrow \gamma}$	$P_{\gamma \rightarrow \gamma}$	$\frac{\text{Diff}}{N_{\text{on}}}$
raw data	506255	501408	4847	4.8	–	–	–	0.01
AZWIDTH cut	14622	11389	3233	20.4	4.23	0.0227	0.67	0.22
Wedge cut	6017	3381	2636	27.2	5.67	0.0067	0.54	0.44
Supercut	4452	1766	2686	34.3	7.1	0.0035	0.56	0.60
Neural*	6278	2858	3420	35.8	7.5	0.0057	0.70	0.55

\*результаты получены по 1/4 экспериментальных данных, а затем пересчитаны для полного экспериментального материала.

Дальнейшее улучшение достоверности наблюдения сигнала связано с переходом к многомерному корреляционному анализу черенковских изображений. Подход развитый в работах [4,5], позволяет найти наилучшую комбинацию измеряемых параметров черенковского изображения и полностью использовать всю селективную

(различительную) информацию.

Быстрота алгоритма многомерной классификации позволила провести оптимизацию по всем экспериментальным событиям и выбрать наилучшие размеры многомерной области  $\gamma$ -изображений в трёхмерном пространстве параметров  $AZWIDTH$ ,  $WIDTH$  и  $LENGTH$  ( $\gamma$ -кластер) [6]. Решение о том, что анализируемое изображение принадлежит  $\gamma$ -кванту принималось при попадании в указанных параметров в заранее очерченную трёхмерную клиновидную область (клип - WEDGE):

$$\begin{array}{ll} AZWIDTH & \begin{array}{l} < 0.16 \text{ для зон 2,3} \\ < 0.15 \text{ для зон 4,5} \end{array} \\ LENGTH & < 0.3 \\ WIDTH/AZWIDTH & < 0.92 \end{array} \quad (3)$$

После этой демонстрации очевидных преимуществ многомерного анализа в коллегии Уипл была проведена дальнейшая работа по оптимизации области  $\gamma$ -кластера. Была переведена в явную форму зависимость от прицельного параметра и ориентации изображения относительно центра поля зрения телескопа - был добавлен параметр  $DIST$ , а соотношение  $WIDTH/AZWIDTH$  заменено параметром  $ALFA$ . Таким образом, область  $\gamma$ -кластера представляет собой четырёхмерный параллелепипед (метод назвали *supercut* [7]):

$$\begin{array}{ll} 0.510 < DIST < 1.10 & 0.073 < WIDTH < 0.15 \\ 0.180 < LENGTH < 0.30 & 0.000 < ALFA < 0.28 \end{array} \quad (4)$$

Всё большее увеличение критерия  $\sigma$  необходимо не только для получения большей достоверности существования сигнала от Крабовидной туманности, но прежде всего для поиска слабых, ещё неизвестных источников и быстрого сканирования звёздного неба.

Что и подтвердилось при открытии второго источника  $\gamma$ -излучения - эллиптической галактики Markarian 421, с применением параметров процедуры распознавания черенковских изображений, оптимизированных с помощью данных наблюдения Крабовидной туманности [8].

Однако оставался открытый вопрос: вся ли различительная информация используется и является ли выбранная форма  $\gamma$ -кластера (четырёхмерный параллелепипед) наилучшей.

Исследования многомерных распределений параметров черенковских изображений попавших в область  $\gamma$ -кластера, проведенное М. Коули, позволило выявить значительные различия между ON и OFF сканами. С другой стороны, следует ожидать, что наилучшая область принятия решения имеет более сложную форму, чем прямоугольный параллелепипед.

Поэтому, дальнейшие попытки увеличить достоверность источника ведутся с использованием новой мощной дискриминационной техники -

математических моделей нейронных сетей [9]. Нейронные сети представляют собой специальный класс статистических классификаторов, способных обучаться на предъявляемых примерах и, обеспечивающих сложные нелинейные области принятия решения.

Обучение сети производится путём обработки событий с известной принадлежностью и последовательной модификацией коэффициентов сети. После каждого цикла итерационного процесса, вычисляется функция качества:

$$Q = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{M_k} (\text{OUT}_i^k - \text{OUT}_{\text{true}}^k)^2, \quad (5)$$

где  $\text{OUT}_i^k$  – значение выходного нейрона сети для  $i$ -го события  $k$ -го класса,  $M_k$  – число событий в обучающей выборке  $k$ -го класса,  $K$  – число классов,  $\text{OUT}_{\text{true}}^k$  – "истинное" значение выхода для событий  $k$ -го класса. Значение выхода следует выбирать таким образом, чтобы максимально раздвинуть альтернативные классы.

Обучив сеть с помощью фоновых изображений (OFF скан) и моделированных  $\gamma$ -событий, удалось получить довольно высокие характеристики подавления фона [10], однако при обработке реальных ONN, OFF пар значение  $\sigma$  оказалось меньше, чем полученное с помощью многомерного анализа. Это обстоятельство можно объяснить неизбежными упрощениями и неточностями моделирования, так что результаты полученные в рамках выбранной статистической модели, значительно ухудшаются при переходе к реальным экспериментальным данным. Поэтому нами была разработана новая методика обучения нейронных сетей, использующая только экспериментальную информацию. Используя коэффициенты сети, полученные с применением функции качества (5) как первое приближение, дальнейшее обучение сети проводится с использованием ONN, OFF пар и новой функции качества – (2). То есть непосредственно оптимизируется форма  $\gamma$ -кластера.

Для сокращения времени обучения сети, было произведена преселекция событий – для обучения отбирались события попавшие в четырёхмерный параллелепипед со сторонами в 1.5 раз большиими чем приведенные в (4). После 20000 итераций удалось получить конфигурацию сети, обеспечивающую улучшение достоверности наличия источника, по сравнению с методом *supercut* (см. последнюю строчку таблицы).

В заключение автор выражает благодарность М.Коули в сотрудничестве с которым создавались и применялись новые методы анализа информации с черенковского телескопа Уппловской обсерватории.

## Литература

1. Zhang S.N., Ramsden D., Statistical data analysis for  $\gamma$ -ray astronomy, *Exp. Astronomy* 1, p.145, 1990.
2. Cawley M.F., Fegan D.J., et al, A high resolution imaging detector for tev  $\gamma$ -ray astronomy, *Exp. Astronomy* 1, p.173, 1990.
3. Vacanti G., Cawlew M.F., et. al., Gamma - ray observations of the Crab nebula at Tev energies, *Ap. J.* 377, p.467, 1991.
4. Chilingarian A.A., Statistical decisions under nonparametric apriori information, *Comp. Phys Comm.* 54, p.381, 1989.
5. Aharonian F.A., Chilingarian A.A., et al. A multidimensional analysis of the Cherenkov images of air showers induced by very high energy  $\gamma$ -rays and protons, *Nucl. Ins.& Methods* A302, p.522, 1991.
6. Chilingarian A.A., Cawlew M.F., Application of multivariate analysis to atmospheric cherenkov imaging data from the crab nebula, *Proc. 22 ICRC v.1*, p.460, Dublin, 1991.
7. Punch M., Akerlof C.W., Cawley M.F., et. al., Supercuts: an improved method of selecting gamma-rays, *Proc. 22 ICRC v.1*, p.464, Dublin, 1991.
8. F.Halzen, Photons from hell, *Nature*, August, 1992.
9. Чилингарян А.А., Математические модели нейронных сетей как системы распознавания образов, Препринт ЕФИ-1350(45), 1991.
10. Chilingarian A.A., Neural net classification of the  $\gamma$ - and  $\pi$ -images registered with atmocpheric cherenkov technique, random search learning in feed - forward networks, *Proc. 22 ICRC v.1*, p.540, Dublin, 1991.