Р. А. САРКИСЯН

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ АСТРОНОМИЧЕСКИХ СНИМКОВ В КОГЕРЕНТНОМ СВЕТЕ

1. Введение. В современной наблюдательной астрономии чрезвычайно важно выявление слабых точечных объектов, а также слабых частей и структур известных протяженных объектов. Решение этих задач при фотографических наблюдениях встречается с трудностями, связанными с наличием природного (общий фон ночного неба), искусственного (освещение городов и населений) и инструментальных (зернистость, неоднородность чувствительной поверхности фотоэмульсии) шумов. Некоторые из этих трудностей могут быть преодолены посредством цифровой обработки астрономических снимков на ЭВМ [1—3]. Но цифровые методы обработки изображений ограничены малыми размерами обрабатываемых участков, длительным временем ввода и обработки изображений. Эти недостатки могут быть частично преодолены при оптической обработке информации (аналоговые методы), а также при одновременном применении цифровых и аналоговых методов обработки информации. Эти методы не исключают, а наоборот, во многих вопросах дополняют друг друга. Только в некоторых случаях, в зависимости от специфики поставленной задачи, предпочтение отдается одному из них. Конкретно, при количественном анализе целесообразно проводить обработку информации в цифровом виде.

Известен ряд работ по применению когерентного света для обработки изображений, основанной на Фурье-преобразовании с фильтрацией пространственных спектров, что позволяет выделить отдельные характеристики объектов, улучшить контраст изображений, выделить контуры объектов [4—6].

В настоящей работе рассмотрено применение когерентного света для обработки астрономических снимков на основе использования сравнительно несложных высокочастотных и низкочастотных пространственных фильтров, а также суперпозиции снимков с одновременной фильтрацией и фиксированием результата обработки при помощи видикона. Описана схема устройства для обработки, выбраны и изготовлены фильтры и приведены результаты экспериментальной обработки астрономических снимков.

2. Пространственная фильтрация двумерных Фурье-спектров. Рассмотрим общий подход к решению задачи обработки информации на основе двумерных пространственных Фурье-спектров. Астрономический снимок можно представить в виде совокупности сигналов $S_i(x, y)$ от отдельных объектов и помех $N_i(x, y)$, т.е. $A(x, y)=\sum_i S_i(x, y)+\sum_i N_i(x, y)$. Здесь под сигналами понимаются почернения от точечных (звезды, квазары) или протяженных (галактики, туманности) объектов, а к помехам относятся природные, искусственные и инструмен-

тальные шумы, указанные выше, мешающие наблюдению слабых объектов, яркость которых ниже определенного порога обнаружения. В этом случае пространственный Фурье-спектр изображения можно представить в виде:

$$\bar{A}(\omega_x, \omega_y) = \sum_i \bar{S}_i(\omega_x, \omega_y) + \sum_i \bar{N}_i(\omega_x, \omega_y), \tag{1}$$

где $\bar{S}_i(\omega_x, \omega_y)$ и $\bar{N}_i(\omega_x, \omega_y)$ —пространственные спектры сигнала и помехи соответственно. Основной особенностью обработки астрономических снимков является то, что пространственные спектры сигналов и помех отличаются друг от друга по распределению энергии на различных частотах. Кроме того, пространственные спектры на различных снимках с одного и того же участка неба для сигналов имеют более или менее регулярно повторяющийся характер, а для помех носят случайный характер.

С целью улучшения отношения сигнал/шум использовался метод пространственной фильтрации, который фактически сводится к умножению амплитуд Фурье-спектра (1) на частотную характеристику пространственного фильтра:

$$\left\{\sum_i \bar{S}_i(\omega_x, \omega_y) + \sum_i \bar{N}_i(\omega_x, \omega_y)\right\}\bar{H}(\omega_x, \omega_y).$$

В результате обратного преобразования Фурье получается изображение обработанного участка снимка, восстановленного по модифицированному спектру:

$$\sum_i S_i(x, y) \oplus H(x, y) + \sum_i N_i(x, y) \oplus H(x, y), \tag{2}$$

где $\oplus$—знак свертки.

Фильтрацию по формуле (2) можно, в частности, осуществить посредством ослабления и устранения постоянной составляющей и части низкочастотных компонент—спектра. Это приводит к выделению контуров изображения. Для объектов с размерами порядка ≈ 100 мкм контуры при этом превращаются в расплывчатые пятна, а на восстановленное изображение накладывается функция преобразования Фурье-фильтра, которая уменьшает яркость общего фона изображения. В результате фильтрации происходит переход от негатива к позитиву и увеличение контраста изображения [7].

В данной работе для выявления слабых объектов изображения на фоне помех были применены три типа фильтров: фильтры низких частот ($H_{нч}$), фильтры высоких частот ($H_{вч}$) и полосовые фильтры ($H_{пс}$), которые имеют частотные характеристики:

$$\begin{aligned}
\bar{H}_{нч}(r) &= \begin{cases} 1 \text{ при } r \leqslant r_1 \\ 0 \text{ при } r > r_1, \end{cases} \\
\bar{H}_{вч}(r) &= \begin{cases} 1 \text{ при } r \geqslant r_2 \\ 0 \text{ при } r < r_2, \end{cases} \\
\bar{H}_{пс}(r) &= \begin{cases} 0 \text{ при } r < r_1 \\ 1 \text{ при } r \leqslant r \leqslant r_2 \\ 0 \text{ при } r > r_2, \end{cases}
\end{aligned} \tag{3}$$

где $r=\sqrt{\omega_x^2+\omega_y^2}$, а r_1 и r_2 выбираются исходя из граничной частоты при фильтрации. Величины r_1 и r_2 могут быть определены из формулы [8], т.е.

$$\bar{A}_1(r) = 1{,}77\,\frac{a\sqrt{E}}{\lambda}\left[\frac{2I_1(kar)}{kar}\right], \tag{4}$$

где a—радиус изображения исследуемого объекта S_1; E—полная энергия, падающая на объект, $K=\frac{2\pi}{\lambda}$—волновое число, $\lambda=0{,}63$ мкм, а I_1—функция Бесселя первого рода первого порядка. Выбирая r_1 и r_2 в соответствии с (4) можно выделить те пространственные частоты, на которых сосредоточена основная часть информации исследуемых объектов на изображении.

При обработке слабых протяженных объектов с расплывчатыми краями задача сводится к улучшению контраста, что достигается посредством применения полосовых фильтров, размеры которых выбираются исходя из размеров обрабатываемого участка. Так как при применении таких фильтров нужно до обработки усреднить случайные помехи, желательно применить принцип суперпозиции снимков, что дает возможность при суперпозиции n снимков увеличить отношение сигнал/шум в $\sqrt{n}$ раз [9].

При обработке астрономических снимков необходимо оценить достоверность полученных результатов. Если при машинной обработке снимков можно воспользоваться статистическими методами [3], то при оптической применим сопоставительный анализ результатов, основанный на исследовании основных источников получения ложных результатов и методике исключения ошибок. Кроме того, можно использовать схему телевизионного контроля с выделителем строк, что позволяет осуществить количественный контроль результатов и последующую обработку на ЭВМ.

Прежде всего должны быть исключены случайные помехи, которые в результате обработки могут быть ошибочно классифицированы как полезные сигналы. К числу таких помех относятся дефекты фотопластинок, искажения оптической системы, ложные сигналы контрольной телевизионной системы. Кроме того, нужно исключить методические ошибки, возникающие, например, при неправильном выборе типа фильтра.

Методика исключения случайных помех основывается на обработке нескольких снимков и сопоставлении полученных результатов. Погрешности когерентного оптического канала исключаются посредством применения параллельных каналов. Методические ошибки исключаются посредством применения различных фильтров и анализа полученных результатов.

3. Эксперимент и обсуждение результатов. Экспериментальная обработка астрономических снимков выполнялась на установке, блок-схема которой приведена на рис. 1.

В эксперименте использовался гелий-неоновый лазер типа 125А фирмы «Spectra physics».

Снимки были получены на 40″ телескопе системы Шмидта Бюраканской астрофизической обсерватории АН Армянской ССР на фотопластинках Kodak OaII без фильтра (рис. 2). Для обработки был выбран участок на снимке, охватывающий систему М-51 (NGC 5195+NGC 5194) и объекты a, b, c, показанные стрелками на рис. 2. Заме-

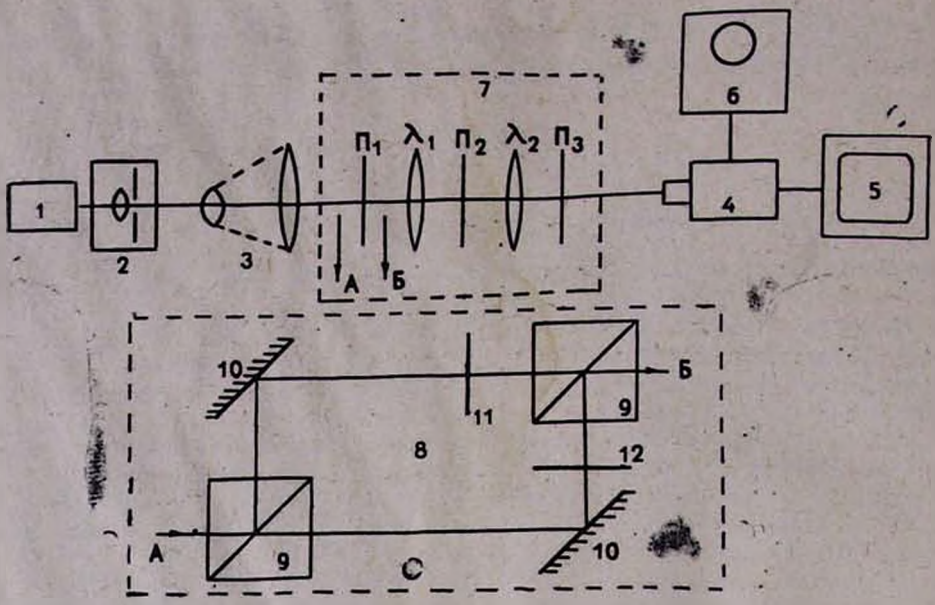

Рис. 1. Блок-схема эксперимента: 1—оптически квантовый генератор, 2—устройство «очистки» пучка, 3—коллиматор, 4—видикон, 5—монитор, 6—осциллограф с выделителем строк; 7—схема фильтрации: $П_1$—плоскость изображения, $П_2$—плоскость фильтра: $Л_1$—$Л_2$—линзы, выполняющие прямое и обратное преобразование Фурье с фокусным расстоянием $f_1=f_2=36$ см., $П_3$—результирующая плоскость. Пунктиром выделена схема суммирования для двух каналов, включаемая в схему фильтрации 7 в точки А—Б. В состав схемы 8 входят: 9—полупрозрачные разделительные кубики, 10—зеркала, 11 и 12—плоскости размещения изображений.

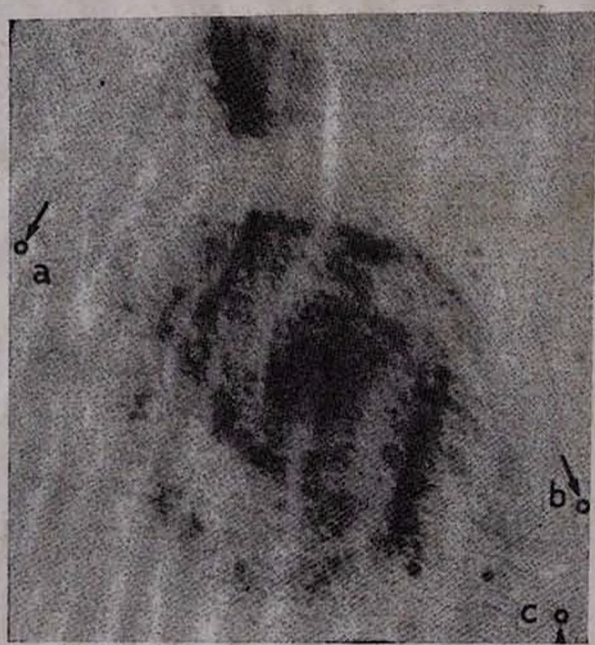

Рис. 2. Фотография М 51, полученная с экрана монитора до обработки.

тим, что предельной величиной для данного снимка является звездная величина, $\approx 20^{m}.5$ (объект а), изображение которого не может быть признано достоверным без дополнительной обработки.

При обработке снимок устанавливался в плоскости $П_1$ и его участок с радиусом 0.2÷2 см освещался коллимированным пучком света. В плоскости $П_2$, в которой получался пространственный спектр освещенного участка снимка, размещался пространственный фильтр, а результат восстановления модифицированного спектра при помощи линзы $Л_2$, выполняющей обратное преобразование Фурье, получался в плоскости $П_3$.

Линейные размеры фильтров ориентировочно выбирались на основе вычисления по формуле (4), а более точно выбор осуществлялся экспериментально по максимальному отношению сигнал/шум. Для измерения отношения сигнал/шум $K = B_{об}/B_{ф}$ на изображение объекта накладывалась сетчатка, состоящая из 3×3 элементов с шагом 20 мкм и вычислялась интегральная яркость объекта $B_{об}$, а вокруг объекта выбирались участки с такими же размерами и вычислялось среднее значение фона $B_{ф}$. Эффективность обработки определялась как отношение $\eta = K_1/K_2$, где индексы 1 и 2 относятся к отношению сигнал/шум до и после обработки соответственно.

Результаты обработки объектов a, b, c (рис. 2) приведены в таблице. В столбце $d_{вч}-d_{нч}$ приведены размеры фильтров, применяемых при обработке, в следующих столбцах приведены значения K_1, K_2 и η, полученные при использовании соответствующих фильтров. Как видно из таблицы, выигрыш, полученный в результате обработки, составляет 1,70÷6,0 в зависимости от объекта и применяемых фильтров.

Таблица

Объекты	Фильтры $d_{вч}-d_{нч}$ мкм	$K_1=\frac{B_{об}}{B_{ф}}$ до обработки	$K_2=\frac{B_{об}}{B_{ф}}$ после обработки	$\eta=\frac{K_2}{K_1}$
a	200 7000	1,39	3,10	2,2
	600 7000		4,27	3,1
	1200 7000		6,18	4,5
	1500 7000		5,49	4,0
	2200 7000		3,00	2,2
b	400 7000	1,53	3,48	2,3
	700 7000		6,70	4,4
	800 7000		7,80	5,0
	1200 7000		4,62	3,0
	1500 7000		2,60	1,7
c	400 7000	1,76	4,87	2,8
	600 7000		10,50	6,0
	800 7000		6,36	3,6

Результаты обработки для объектов a и b были сфотографированы с экрана выделителя строк. На рис. 3а и 3а′ приведены фотографии, полученные с экрана выделителя строк при выделении строки, проходящей примерно через центр объекта a до и после обработки соответственно. Из сравнения рис. 3а и 3а′ следует, что в результате обработки сигнал, соответствующий объекту a увеличился на фоне помех.

Для объекта b была выполнена суперпозиция изображений от двух снимков по схеме 8 (рис. 1) и после суперпозиции осуществлена фильтрация с высокочастотным фильтром $d_{вч}=800$ мкм и низкочастотным фильтром $d_{нч}=7000$ мкм, что дало возможность не только улучшить соотношение сигнал/шум, но и исключить искажения, вызванные отсутствием эмульсии на отдельных участках пластинок. На рис. 3b приведена фотография, полученная с экрана выделителя строк до суперпозиции, на которой видны два сигнала, соответствующие

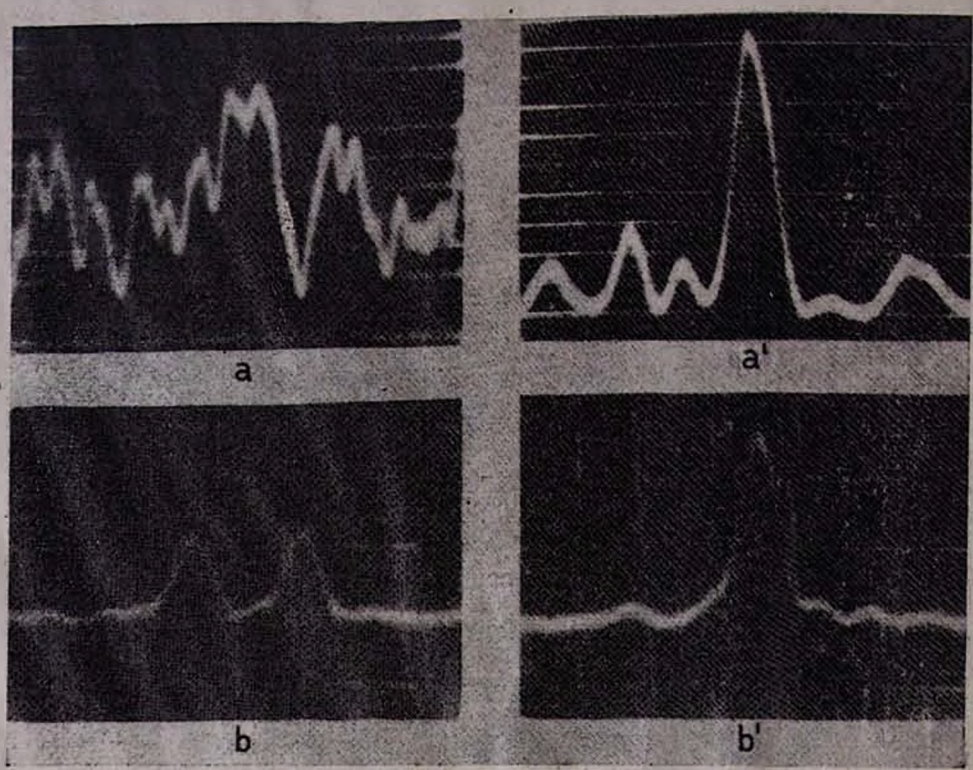

Рис. 3. Осциллограммы видеосигналов объектов a и b, снятые с экрана выделителя строк до и после обработки соответственно (масштаб сигнала a в три раза больше, чем сигнала b).

объекту b на двух снимках, причем изображения были смещены для наглядности. Результаты суперпозиции с последующей фильтрацией для объекта b приведены на рис. 3b′. По вышеприведенной схеме в принципе может быть осуществлена суперпозиция требуемого числа изображений посредством включения нескольких параллельных каналов суперпозиции, но пока практически это осуществимо для не более двух снимков из-за малой мощности источника когерентного света и неоднородности пучков света разных каналов.

В астрономической практике применялась суперпозиция снимков освещением пакета наложенных друг на друга снимков, либо посредством последовательного суммирования снимков. В обоих случаях результат фиксировался на фотопластинке. Отметим, что при фиксации результатов на фотопластинке вносятся дополнительные поме-

хи, определяемые неравномерностью проявки освещения при экспозиции, толщины эмульсии. При наложении пакета снимков результирующее изображение размазывается за счет рассеяния света от снимка к снимку, кроме того, совмещение снимков в последовательном пакете является достаточно сложной операцией. При последовательном суммировании снимков на фотопластинке число суммируемых снимков ограничено, так как каждый последовательно суммируемый снимок требует большего времени экспозиции [9].

В примененной в настоящей работе схеме суперпозиции в когерентном свете с фиксацией результата на видиконе отпадают шумы результирующей фотопластинки. Наблюдение на мониторе позволяет сравнительно легко совмещать изображения, появляется возможность количественного контроля результата на основе наблюдения интересуемых объектов при помощи выделителя строк. Одновременно отметим, что ограничением применяемой схемы является малое разрешение видикона и телевизионной установки, что приводит к обработке небольших участков изображения.

С целью выбора наиболее эффективных фильтров по результатам обработки (таблица) был проведен анализ зависимости η от $d_{вч}-d_{нч}$. Из таблицы следует, что для объекта *a* (диаметр≈40 мкм), имеющего широкий пространственный спектр, был выбран фильтр $d_{вч}=1200$ мкм, для объекта *b* (диаметр≈60 мкм) фильтр $d_{вч}=800$ мкм, а для объекта *c* (диаметр≈80 мкм) — фильтр $d_{вч}=600$ мкм. Во всех случаях фильтром низких частот, выбранным по максимальному значению η, оказался фильтр с размерами 7000 мкм.

Результат обработки протяженного объекта (система М 51) приведен на рис. 4. При обработке на основании ориентировочного расчета по формуле (4) и экспериментальной проверки с целью выбора фильтров более четко выделяющих структуру галактики был выбран фильтр размером $d_{вч}=470$ мкм, но в центральной части фильтра имелось отверстие с $d_0=40$ мкм, которое частично пропускало низкие частоты, что улучшало контраст и давало возможность выявить тонкие структуры лучше, чем при использовании фильтра, полностью срезающего низкие частоты. Из рассмотрения рис. 4, полученного с экрана монитора после обработки видно, что в результате обработки подчеркиваются контуры галактик и более четко видна структура области, в которой, примерно, находится ядро галактики. На рис. 4, кроме полезного сигнала, видны случайные помехи, исключение которых осуществлено при помощи сопоставления нескольких снимков (того же участка).

Особый интерес представляет выявление перемычек между компонентами М 51, а также между спиральными ветвями внутри галактики NGC 5194. Выявленные перемычки состоят из дискретных светлых сгущений и в отдельных случаях имеют почти равномерное строение, причем толщина перемычек иногда бывает весьма мала (толщина≈5″). Из рис. 4 видно, что перемычка А начинается из точки A_1, проходит до точки A_2 и почти перпендикулярно проходит к северу (точка A_3); затем перемычка разветвляется на три направления—одно из них примыкает к точке A_6 во внутреннем рукаве, второе и третье направления примыкают соответственно в точках A_4 и A_5 к рукаву, идущему к спутнику NGC 5195. Перемычка В, находящаяся в западной части галактики NGC 5194 начинается от точки B_1 и после разветвления (B_2—B_3, B_1—B_4) двумя почти параллельными направлениями доходит до внешнего рукава. Из точки B_4 через точку B_5 пе-

перемычка проходит зигзагом к точке B_6. В центральной части галактики NGC 5194 видна перемычка E, напоминающая букву λ, а в северной части галактики между рукавами видна перемычка D. На рис. 4 также видна широкая перемычка C, имеющая ширину примерно в 30″. Перемычка C выходит из галактики NGC 5195 (точка C_1) и тянется почти параллельно восточному рукаву галактики NGC 5194 до точки C_2.

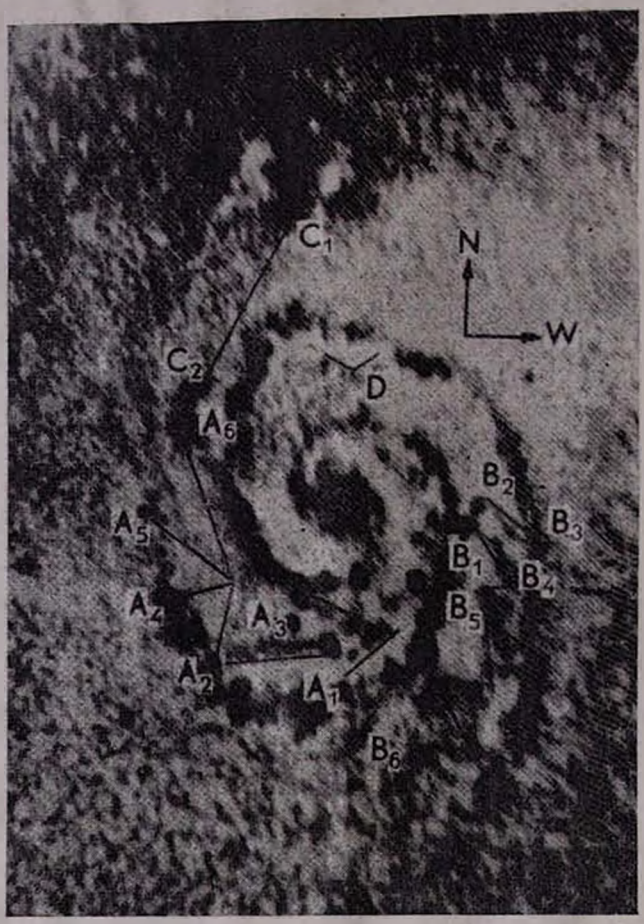

Рис. 4. Фотография M 51, полученная с экрана монитора после обработки.

Вышеприведенные результаты еще раз подтверждают то обстоятельство, что между компонентами двойной системы M 51 имеется связь, в виде волокон и перемычек [10]. Кроме того, было получено подтверждение о наличии сложной структуры рукавов, которые связаны между собой при помощи перемычек, идущих в различных направлениях (рис. 4).

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность академику В. А. Амбарцумяну за постановку задачи и постоянное внимание к работе, а также сотрудникам Института радиофизики и электроники АН Арм. ССР за помощь при проведении эксперимента на когерентной оптической установке.

21 октября 1977 г.

Ռ. Հ. ՍԱՐԳՍՅԱՆ

ԿՈՀԵՐԵՆՏ ԼՈՒՅՍՈՒՄ ԱՍՏՂԱԳԻՏԱԿԱՆ ՊԱՏԿԵՐՆԵՐԻ ՄՇԱԿՄԱՆ ՕՊՏԻԿԱԿԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ԿԻՐԱՌՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ամփոփում

Դիտարկված է կոհերենտ լույսում աստղագիտական պատկերների մշակման օպտիկական մեթոդների կիրառությունը։ Մասնավորապես դիտվում են պատկերների ֆուրյե ձևափոխությունը, տարածական հաճախականությունների զտումը և վերադրումը։ Որոշված են զտիչները բնութագրող մեծությունների այն պահանջները, որոնց դեպքում ինֆորմացիայի փորձնական մշակումը ամենաարդյունավետն է։ Վերոհիշյալ զտիչների կիրառությունը թույլ է տվել հայտնաբերել սահմանային թույլ կետային օբյեկտ (a), ինչպես նաև թույլ կամարներ M 51-ի բաղադրիչների միջև (C) և NGC 5194 գալակտիկայի պարուրաձև թևերի միջև (ABDE) (նկ. 4)։

R. A. SARKISSIAN

THE APPLICATION OF THE OPTICAL METHODS IN ASTRONOMICAL IMAGES PROCESSING ON THE BASIS OF COHERENT LIGNT

Summary

The application of the optical methods in astronomical images processing on the basis of coherent light is considered. In particular operations of Fourier transformation, filtering of spatial frequencies and superposition of images are considered. Requirement was determined for filter parameters at which effective results of informative processing are experimentally obtained. The use of the developed filters made it possible to reveal limiting faint object (a) and also to reveal the crosspieces between the components of M 51 (C) and spiral branches of galaxies NGC 5194 (A,B,D,E,) (fig. 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Р. А. Саркисян*, Сообщ. Бюраканской обс., 46, стр. 135, 1975.
2. *Р. А. Саркисян*, Сообщ. Бюраканской обс., 46, стр. 145, 1975.
3. *R. A. Sarkissian, V. S. Khitova*, Proceed. of the Fourth International CODATA Conf., Paris, 96, 1974.
4. *А. Франсон, М. Марешаль*, Структура оптического изображения, М., «Мир», 295, 1964.
5. *А. С. Островский*, Материалы I Всесоюзной школы по голографии, Л., «Наука», 273, 1971.
6. *A. R. Shulman*, Optical Data Processing, N. Y., Wiley, 710 1970.
7. *Дж. Гудмен*, Введение в Фурье-оптику, М., «Мир», 188, 1970.
8. *М. Борн, Э. Вольф*, Основы оптики, М., «Наука», 432, 1970.
9. *N. Richter*, Vistas in Astronomy, vol. 19, pt. 2, pp. 215—223, 1976.
10. *F. Zwicky*, Ergebnisse d. exakt Naturwissenschaften, Bd. 29, 344, 1956.