

Быковский Ю.А и др. Б1-1-86-671

СЗЧЧ.1т+СЗЧЧ.1э+Ц846

6970/86



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-1-86-671

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1986

Быковский Ю.А.\* , Зарубин А.М.\* , Ларкин А.И.\* , Маркилов А.А.\* ,  
Русаков В.А. , Стариков С.А.\*

Б-1-1-86-671

МЕТОДЫ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩЕЙ ГОЛОГРАФИИ И ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
СЛЕДОВ ЧАСТИЦ В ТРЕКОВЫХ ДЕТЕКТОРАХ ИЗЛУЧЕНИЕМ ЧАСТИЧНОЙ  
КОГЕРЕНТНОСТИ

Оптические схемы распознавания и анализа следов частиц,  
использующие излучение частичной пространственной когерент-  
ности

\*МИФИ

Руководство по устройству  
и эксплуатации прибора  
.. 08 - 10 - 86 ..

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
РАДИО И СВЯЗИ  
1986

## I. ВВЕДЕНИЕ

Настоящее сообщение посвящено исследованию голографического коррелятора с освещением частичной пространственной когерентности, предназначенного для обнаружения событий с нефиксированной геометрией на снимках с пузырьковых камер, а также оптических схем для анализа распределения пузырьков по треку. Как показано в работе <sup>/1/</sup>, оптические корреляторы, использующие когерентное освещение, характеризуются высокой чувствительностью к случайным фазовым неоднородностям оптических элементов и носителей обрабатываемых изображений, а также требуют чрезвычайно точной установки отдельных элементов схем ( $\approx 1-10$ ) мкм. Указанные причины затрудняют создание надежных устройств, пригодных для решения практических задач обработки трековой информации. Один из наиболее перспективных путей преодоления этих трудностей заключается в переходе к использованию в схемах излучения с частично пространственной когерентностью.

Как отмечалось в работе <sup>/1/</sup> обнаружение событий по ориентации и углам между образующими их треками является одной из наиболее распространенных задач. В разделе 2 описывается попытка решения данной задачи с помощью голографического фильтра, импульсный отклик которого определяется моделированием процесса сбучения на ЭВМ.

Раздел 3 посвящен исследованию возможности измерения плотности и размеров пузырьков, образующих трек, по функции автокорреляции изображения и её производным.

## 2. ОПТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЧАСТИЧНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ КОГЕРЕНТНОСТИ

Как отмечалось <sup>/1/</sup> имеется ряд причин, по которым нежелательно использовать в схемах голографического распознавания изображений пространственно-когерентное излучение. Аналогом когерентного коррелятора Вандер Люгта <sup>/2/</sup> является коррелятор Ломанна <sup>/3/</sup>, схема которого включает те же элементы, но на входе используется высокомонокроматическое пространственно-некогерентное освещение. Эта схема, защищенная от фазовых шумов вводимой информации и не критичная к точ-

ности установки оптических элементов, в последнее время интенсивно исследуется<sup>/4-6/</sup>. Основным ее недостатком является невозможность амплитудно-фазовой обработки, что существенно, в частности, для обнаружения трековых событий (см. раздел 2). Из анализа ряда факторов<sup>/7/</sup> следует, что наилучшим вариантом следует считать схему, промежуточную между корреляторами Вандер Люгта и Ломанна: с освещением частичной пространственной когерентности. Выбор радиуса пространственной когерентности излучения в каждом конкретном случае позволяет оптимизировать световую эффективность коррелятора, защищенность от фазовых шумов и требуемую точность юстировки<sup>/8/</sup>. Амплитудно-фазовая обработка в этом случае может быть реализована как известным способом введения пространственной несущей частоты<sup>/8,9/</sup>, так и не приводящим к уменьшению числа отсчетов по изображению способом локальной амплитудно-фазовой обработки<sup>/10/</sup>.

Схема голографического коррелятора с освещением частично пространственной когерентности показана на рис. 1. Излучение *He-Ne* лазера I

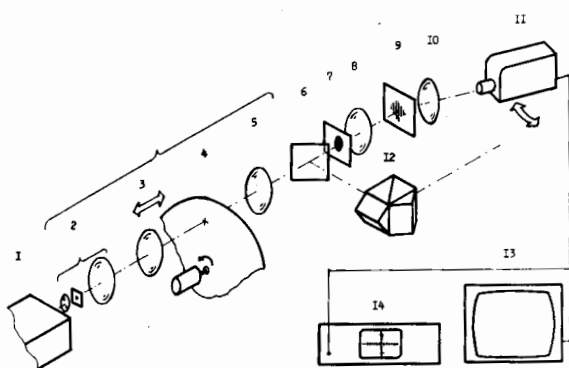


Рис. 1. Схема голографического коррелятора с освещением частичной пространственной когерентности.

проходит через узел формирования требуемой пространственной когерентности (отмечен фигурной скобкой). Узел состоит из коллиматора 2, объектива на подвижной подставке 3, вращающегося матового диска 4, коллимирующего объектива 5. Перемещением объектива 3 изменяется радиус пространственной когерентности в плоскости входного транспаранта с распознаваемым изображением 7. Для измерения радиуса пространственной когерентности свет полупрозрачным зеркалом 6 направляется через интерферометр обращенного фронта 12 на телекамеру II, соединенную с монитором I3 и осциллографом с выделением телевизионной строки I4. Объективы 8 и 10 являются Фурье-преобразующими, 9 - голографический фильтр. Выходные сигналы корреляции считываются также телекамерой II, монитором I3 и осциллографом I4. Радиус пространственной когерентности можно плавно изменять от 0,2 мм до 7 мм.

В случае использования для амплитудно-фазовой обработки метода пространственно несущей, в плоскости транспаранта 7 дополнительно устанавливалась периодическая амплитудная решетка. а эталонное изоб-

ражение на голографический фильтр 9 записывалось с пространственной несущей, равной частоте решетки. Фазовая информация на эталоне кодировалась сбоем частоты. В таком режиме радиус пространственной когерентности выбирался из условия подавления фазовых шумов носителя обрабатываемого изображения 7:

$$\delta I_S / I_S = \left[ \langle I_S^2 \rangle - \langle I_S \rangle^2 \right]^{1/2} / \langle I_S \rangle < \epsilon \quad (1)$$

где  $I_S$  - величина сигнала корреляции,  $\langle \rangle$  - усреднение по реализациям фазовых шумов,  $\epsilon$  - допустимые относительные флуктуации сигнала.

Проведенные оценки дают<sup>/8/</sup>:

$$\delta I_S / I_S = (r_c / D) \left[ \operatorname{erf}^{-2} (r_N / (2r_c)) - 1 \right]^{1/2} \quad (2)$$

где  $r_N$  - радиус корреляции фазовых шумов,  $D$  - размер распознаваемого объекта.

Зависимость наибольших допустимых значений радиуса пространственной когерентности  $r_c$  от радиуса корреляции фазовых шумов  $r_N$  приведена на рис. 2 для случаев  $\delta I_S / I_S = 10^{-1}$  и  $\delta I_S / I_S = 10^{-2}$ .

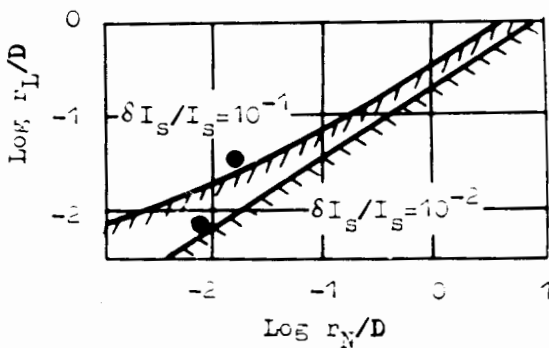


Рис. 2. Области допустимых значений радиуса пространственной когерентности в зависимости от радиуса корреляции фазовых шумов: расчетные кривые и экспериментально проверявшиеся режимы (указаны точками).

Точками отмечены использовавшиеся режимы работы коррелятора. Верхняя соответствует  $\delta I_S / I_S = 9 \cdot 10^{-2}$ , во втором режиме  $\delta I_S / I_S$  составляло менее  $1 \cdot 10^{-2}$ , что подтверждает правильность оценок выбора пространственной когерентности.

В указанных режимах требования к точности поперечной  $\Delta X$  и продольной  $\Delta Z$  установки голографического фильтра ослаблялись в  $10^1 - 10^2$  раз в соответствии с оценкой:

$$\Delta X = \Delta X_{\text{ког.}} \cdot D / r_c ; \quad \Delta Z = \Delta Z_{\text{ког.}} \cdot D / r_c \quad (3)$$

где  $\Delta X_{\text{ког.}}$ ,  $\Delta Z_{\text{ког.}}$  - требуемые точности установки при пространственно-когерентном освещении<sup>/11/</sup>.

При этом осуществлялось опознавание объектов по биполярному эта-

лону<sup>/8/</sup>, что необходимо для обнаружения событий с нефиксированной геометрией. Так как в методе с пространственной несущей происходит сокращение числа отсчетов в распознаваемом изображении и требуется удаление светового пьедестала, на котором находится сигнал (выполняемое в электронном тракте регистрации, например, в телекамере), то представляет интерес способ, лишенный этих недостатков<sup>/10/</sup>.

Амплитудно-фазовая обработка в корреляторе, т.е. сложение света с учетом фазы, часто требуется лишь локально, на областях, гораздо меньших размера распознаваемых изображений. Если выбрать радиус пространственной когерентности несколько большим размера такой области, то условие, необходимое для амплитудно-фазовой обработки, будет выполнено. Если при этом радиус пространственной когерентности будет меньше радиуса корреляции фазовых шумов носителя обрабатываемого изображения, то будет сохранена и защищенность от фазовых шумов. На рис. 3 приведено сравнение расчетных оценок с режимами коррелятора, наблюдавшимися экспериментально. Использовалась схема, показанная на рис. 1. Область выше кривой I соответствует амплитудно-фазовой обработке по областям размера не менее  $D_A$  с погрешностью не хуже  $\epsilon = 5\%$ . Область ниже кривой II соответствует подавлению фазовых шумов, при

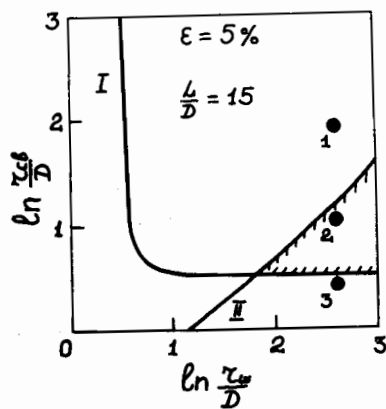


Рис. 3. Режимы частично когерентного коррелятора для амплитудно-фазовой обработки (точками показаны экспериментально проверявшиеся режимы).

котором относительные флуктуации сигнала также не превышают 5%. Область, образованная пересечением кривых, является рабочей. Требовалась амплитудная обработка на областях размером  $D_A = 0,9$  мм, радиус корреляции фазовых шумов  $r_c$ .

составлял 10 мм, размер объекта  $L \cdot \delta = 13,5$  мм. При радиусе когерентности  $r_{cB}$ , равном 7 мм (точка 1 на рис. 3), флуктуации сигналов из-за фазовых шумов составляли 40%, при радиусе когерентности менее 1,5 мм (точка 3) не выполнялась амплитудно-фазовая обработка. Режим с радиусом пространственной когерентности 3 мм (точка 2) соответствовал рабочей области.

Полученные результаты показывают, что использование в голографических корреляторах освещения с частичной пространственной когерентностью позволяют обеспечить амплитудно-фазовую обработку при сохранении надежности функционирования, присущей некогерентным корреляторам.

Выполнение обоих условий необходимо для применения оптических методов при поиске событий на снимках с трековых детекторов.

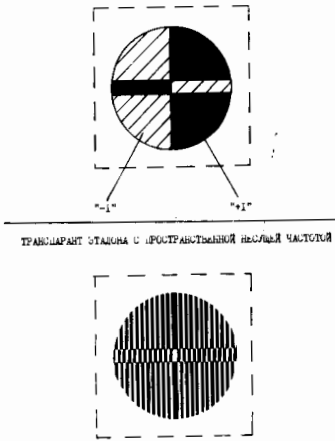
### 3. РАСПОЗНАВАНИЕ СОБЫТИЙ С НЕФИКСИРОВАННОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Для обнаружения трековых событий с помощью голографического коррелятора необходимо определить вид требуемого для этого голографического фильтра, или, что эквивалентно, вид эталонного изображения, записываемого на голограмму. При распознавании событий с нефиксированной геометрией невозможно использовать в качестве эталона само событие, как это делалось при поиске событий с фиксированной геометрией<sup>/1/</sup>. Корреляторы можно рассматривать как систему распознавания, реализующую линейное решающее правило и применить к ним общие выводы статистической теории распознавания образов. Однако, на практике либо из-за отсутствия достаточной формализованной информации о распознаваемых объектах, либо из-за вычислительных трудностей определение оптимального эталона таким способом оказывается невозможным, и решение сводится к использованию эмпирических приемов, не гарантирующих оптимальности выбора эталона. В этой ситуации привлекает использование процедуры стохастической аппроксимации<sup>/12/</sup>. Способ обеспечивает последовательное приближение к оптимальному эталону весовым суммированием изображений из обучающей выборки и не требует априорного знания статистических распределений.

Оптимальный эталон для обнаружения событий на снимках находился моделированием процесса обучения на ЭВМ. Оптимизация проводилась по критерию минимума среднего риска при заданных порогах сигнала и сигнала помехи. События, которые требовалось обнаружить: 1 - точка окончания трека произвольного направления, 2 - точка рассеяния на произвольный угол из пучка известного направления, 3 - центр звезды, со-

ответствующей реакции с образованием двух и более частиц; основные типы помех: 1 - трек произвольного направления, не оканчивающийся в данной точке, 2 - точка пересечения проекций треков невзаимодействующих частиц. После окончания обучения, занимавшего от 1500 до 4500 шагов, отношение (расчетное) сигнала события к сигналу помехи составляло не менее  $10^3$ . Рассчитанный эталон для записи на голографический фильтр показан на рис. 4а. Направление горизонтальной оси соответствует начальному направлению треков, ширина горизонтальной полосы равна ширине треков на обрабатываемом снимке. Эталон представляет собой круг, внутри которого расположены области, имеющие модуль амплитудного пропускания, равный 1 и взаимно сдвинутые по фазе на . При

Рис. 4. Эталонное изображение для обнаружения вершин событий (а) и его представление с пространственно несущей частотой (б).



записи голографического фильтра использовался транспарант с пространственной несущей частотой (рис. 4б). Сбой несущей на половину периода соответствует фазовому сдвигу между областями. Такое представление эталона обусловлено следующими причинами:

1. Если фильтр применяется в частично-когерентном корреляторе с пространственной несущей, то необходимо введение пространственной несущей для кодировки фазы; в качестве фильтра используется весь спектр транспаранта.

2. Если фильтр применяется в частично-когерентном корреляторе в режиме локальной амплитудно-фазовой обработки, то удобством и точностью по сравнению с изготовлением фазовых масок; на голограмме используется только один боковой порядок спектра транспаранта.

Для подавления боковых выбросов сигналов схема частично-когерентного коррелятора (рис. 1) была дополнена оптическими элементами (рис. 5), с помощью которых сформированный сигнал корреляции просвечивает транспарант Т, и прошедшая часть света рассматривается как выходной сигнал. На рис. 6 приведены результаты использования голографического фильтра, полученного в результате процесса обучения. Распознаваемым событием являлась 3-лучевая звезда (рис. 6а). В выходной плоскости (рис. 6б) видны сигналы, соответствующие вершине звезды и

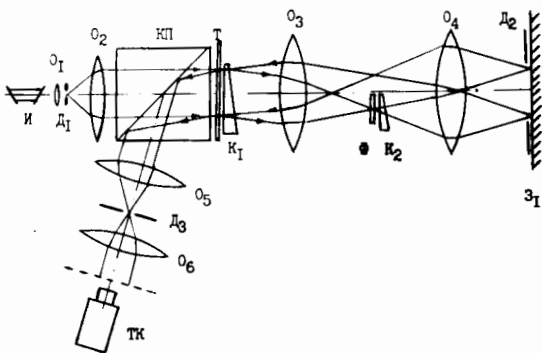


Рис. 5. Схема коррелятора с дополнительной фильтрацией сигнала распознаваемым изображением: И - источник излучения частичной пространственной когерентности;  $O_1-O_6$  - объективы,  $D_1-D_3$  - диаграммы, КП - делительный куб, Т - транспарант с распознаваемым изображением,  $K_1, K_2$  - клинья, поворачивающие пучки, Ф - голографический фильтр,  $Z_1$  - зеркало, ТК - телекамера, считывающая выходной сигнал.

окончаниям двух треков, третий трек заканчивается за пределами рисунка.



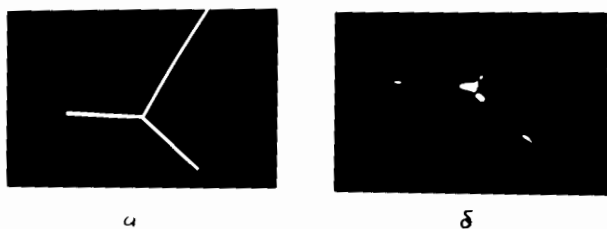


Рис. 6. Входная (а) и выходная (с плоскости коррелятора при обнаружении вершин событий. Присутствуют сигналы вершины звезды и окончания двух треков, третий трек оканчивается за пределами обрабатываемого участка.

Решение рассмотренной модельной задачи показывает, что применявшаяся процедура обучения для создания оптимального голографического фильтра в совокупности со схемными реализациями, использующими излучение частичной пространственной когерентности, могут являться основой для разработки систем, способных решать практические задачи обнаружения событий при просмотре изображений, фиксируемых в объеме трековых детекторов.

#### 4. АНАЛИЗ МИКРОСТРУКТУРЫ ТРЕКОВ ПО ФУНКЦИИ АВТОКОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Анализ микроструктуры треков, позволяющий получать информацию об ионизационных потерях, скорости и массе частиц, является примером обработки мелкоструктурных изображений.

Среди существующих оптических способов, направленных на решение аналогичных задач, следует отметить группу корреляционных методов<sup>/13/</sup>. Однако, эти методы требуют знания достаточно полной статистики элементов обрабатываемого изображения и нетривиальной математической обработки (с использованием ЭВМ) профотометрированной двумерной функции автокорреляции транспаранта (участка снимка).

Описываемый ниже метод основан также на получении информации из функции автокорреляции обрабатываемого транспаранта, однако специфика конкретной задачи позволяет определять плотность и распределение элементов без предварительного знания статистики и использования цифровой техники.

Рассмотрим связь дифференциальных характеристик функции автокорреляции с плотностью и размерами элементов транспаранта<sup>/14/</sup>. Если на выбранный для измерений участок трека наложена непрозрачная маска с щелью ширины  $h$ , то подсчет числа прозрачных криволинейных трапеций на участке известной длины  $l$  дает плотность пузырьков по треку, а образовавшийся транспарант описывается коэффициентом пропускания:

$$t(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } (x, y) \in \text{прозрачному участку} \\ 0, & \text{если } (x, y) \in \text{непрозрачному участку.} \end{cases} \quad (4)$$

Тогда одномерная функция автокорреляции данного транспаранта есть:

$$\varphi(\xi) = \iint_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \cdot t^*(x + \xi, y) dx dy \quad (5)$$

Плотность пузырьков может быть определена по её производной:

$$S = (1/e) \cdot (1/h) / d\varphi / d\xi \quad (6)$$

Кроме того, с использованием значения  $\varphi(0)$  возможна оценка средних размеров пузырьков  $\bar{c}$  и промежутков  $\bar{b}$ :

$$\bar{c} = \varphi(0) / (ehS); \quad \bar{b} = 1/S - \bar{c} \quad (7)$$

Пусть на обрабатываемом участке снимка имеется  $N_i$  элементов размера  $c_i$  и  $N_{i+1}$  элементов размера  $c_{i+1}$  ( $c_{i+1} > c_i$ ). Потребуем выполнения следующего условия - размер любого промежутка между элементами  $b_j$  больше максимального размера элементов  $c_j$ . Тогда площадь, ограниченная осью абсцисс и кривой  $d^2\varphi/d\xi^2$  в окрестностях точек  $\xi = c_j$  равна

$$\int_{\varepsilon_j} d^2\varphi / d\xi^2 d\xi = h N_i \quad (8)$$

где области  $\varepsilon_j$  соответствуют нелинейному изменению функции автокорреляции  $\varphi(\xi)$ , обусловленному формой границ элементов.

Если функцию  $d^2\varphi/d\xi^2$  подвергнуть Фурье-спектральной фильтрации, обеспечивающей её интегрирование в пределах областей  $\varepsilon = \max \{ \varepsilon_j \}$  (подавление высших частот  $\omega > 1/\varepsilon$ ), то преобразованный сигнал

$$P(\xi) = d^2\varphi / d\xi^2 \otimes g(\xi) \quad (9)$$

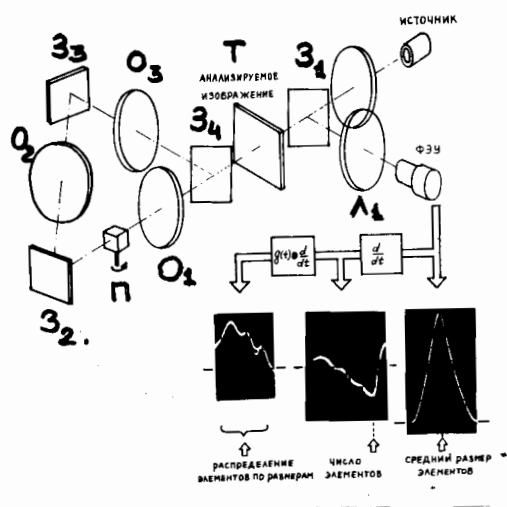
где  $\otimes$  - операция свертки,  $g(\xi)$  - есть обратное Фурье-преобра-

зование от частотного фильтра  $G(\omega)$  будет описывать распределение элементов транспаранта по размерам, так как величина сигнала  $P(\xi)$  в точке  $\xi$  пропорциональна числу элементов, имеющих размер, заключенный в интервале  $(\xi - \varepsilon/2, \xi + \varepsilon/2)$

Для реализации функции автокорреляции  $\varphi(\xi)$  использовалась оптическая схема, в которой изображение обрабатываемого транспаранта

направлялась на тот же транспарант с смещением и измерялась суммарная интенсивность прошедшего света. Экспериментальная проверка проводилась как на модельных транспарантах с постоянным контрастом, так и на увеличенных реальных снимках треков, обладающих в некоторых случаях значительными флуктуациями контраста. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 7. Пучок света через полупрозрачное зеркало  $Z_1$  попадает на обрабатываемый транспарант  $T$  с наложенной маской, затем проходит полупрозрачное зеркало  $Z_4$ , систему объективов

Рис. 7. Схема экспериментальной установки для анализа микроструктуры треков по функции автокорреляции.



$O_1$ ,  $O_2$ ,  $O_3$  и глухих зеркал  $Z_2$ ,  $Z_3$  формирующую в плоскости транспаранта  $T$  его изображение. После повторного прохождения через транспарант свет направляется зеркалом  $Z_1$  через линзу  $L_1$  на ФЭУ. Смещение изображения относительно транспаранта осуществляется вращением призмы  $\Pi$ , установленной в фокальной плоскости объектива  $O_1$ .

Сигнал с ФЭУ подается на дифференциальную цепочку. После усиления сигнал, являющийся первой производной функции автокорреляции, поступает на схему, выполняющую повторное дифференцирование и интегрирование полученной второй производной по временному интервалу  $\tau_0$ . Время соответствует смещению изображения на расстояние равное размеру границ элементов на обрабатываемом транспаранте  $T$ . При определении плотности элементов сигнал снимается с первой дифференцирующей цепочки. В схеме использовалось некогерентное освещение, создающее меньше дифракционных эффектов и обеспечивающее большую временную и пространственную энергетическую стабильность.

В качестве исходных снимков для обработки брались участки треков на снимках с водородной пузырьковой камеры. Изображение увеличивалось (коэффициент увеличения - 30) и переснималось на пленку МИКРАТ-300. Типичные результаты измерений числа пузырьков приведены на рис. 8, где  $N$  - действительное число пузырьков на транспаранте,  $N^*$  - число пузырьков по измерениям. Определение среднего размера пузырьков и промежутков проводилось измерением числа пузырьков и интенсивности прошедшего света ( $\sim \varphi(0)$ ). Полученные результаты согласуются

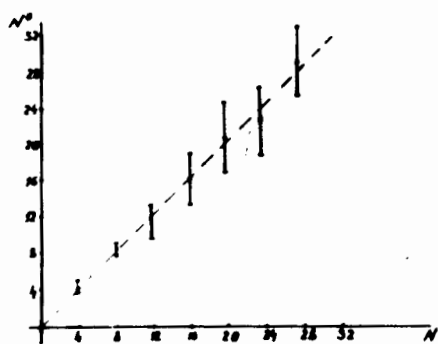
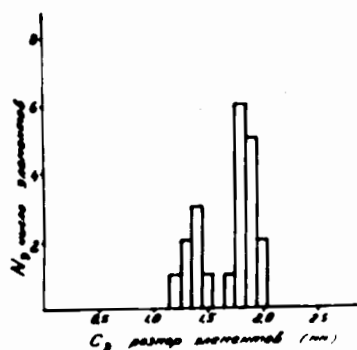


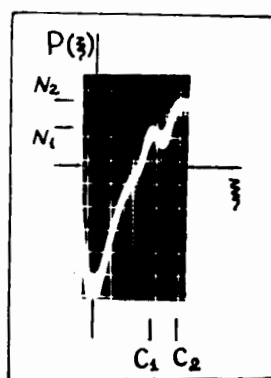
Рис. 8. Результаты измерения числа пузырьков на транспаранте по производной функции автокорреляции.

ся в пределах погрешности, составляющей величину (10-20)%, с прямыми измерениями.

На рис. 9а изображено распределение по размерам элементов транспаранта. Элементы группируются около двух размеров  $C_1 = 1,4$  мм (группа из  $N_1 = 7$  элементов) и  $C_2 = 1,8$  мм (группа из  $N_2 = 15$  элементов).



а)



б)

Рис. 9. Распределение элементов по размерам, а - непосредственные измерения, б - по функции автокорреляции.

Осциллограмма, соответствующая функции  $P(z)$  для данного транспаранта, показана на рис. 9б. Экспериментальные значения  $(N_1/N_2)$  и  $(C_1/C_2)_{\text{эксп.}}$  определялись из величин и координат пиков на графике  $P(z)$  (рис. 9б):  $(C_1/C_2)_{\text{эксп.}} = 0,7 \pm 0,1$ ,  $(N_1/N_2)_{\text{эксп.}} = 0,6 \pm 0,1$ , что согласуется с  $(C_1/C_2)_{\text{действ.}} = 0,79 \pm 0,08$  и  $(N_1/N_2)_{\text{эксп.}} = 0,5$ .

Точность значений измеряемых параметров определяется, в первую очередь, флуктуациями контраста обрабатываемых снимков. Можно показать [14], что относительная ошибка измерений, обусловленная флуктуациями контраста, есть

$$E_{\text{ф.к.}} \approx 2 \sigma_{\beta} / (\langle \beta \rangle N^{1/2}) \quad (10)$$

где  $N$  - число элементов,  $\langle \beta \rangle$  - средняя разность пропускания

прозрачных элементов и фоновых участков,  $\sigma_{\beta}^2$  - дисперсия величины  $\beta$ . Для исходных обрабатываемых снимков измеренное  $\sigma_{\beta} / \langle \beta \rangle \approx 0.3$ , что дает при  $N = 50$   $E_{ф.к.} \approx 10\%$ .

Таким образом, представляется возможным измерять плотность и распределение пузырьков по размерам на снимках с камер по функции автокорреляции изображения и её производным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К выводам, сформулированным в конце каждого раздела данного сообщения и в работе /1/, можно добавить, что в связи с использованием голографического съема информации с трековых детекторов включение оптических методов в процессе обработки с одной стороны должно его ускорить, т.к. упрощается стыковка систем регистрации и обработки. В то же время, разрабатывавшиеся методы не были ориентированы на представление информации в виде восстановленных с голограмм изображений. Следует отметить удобство схемы частично-когерентной голографической регистрации, описанной в работе /15/. Большинство схем обнаружения событий и подавления помех, предназначенных для обработки снимков, по-видимому, могут быть применены при обработке информации с таких голограмм. При этом обрабатываемая голограмма будет располагаться на месте голографического фильтра, а эталонное изображение (импульсный отклик системы) - на месте обрабатываемого снимка. Помимо апостериорной обработки голограмм требуются исследования обработки в реальном времени, излучением, просвечивающим объем детектора, с целью уменьшения количества регистрируемых голограмм и повышения качества восстанавливаемых изображений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Быковский Ю.А. и др. ОИЯИ, Б1-1-86-370, Дубна, 1986.
2. Vander Lugt A. Signal Detection by Complex Spatial Filtering. IEEE Trans. Inform. Theory, 1964, v. IT-10, N.2, p. 139-145.
3. Lohmann A.W. Matched Filtering with Self-Luminous Objects. Appl. Opt., 1968, v.7, p. 561-563.
4. Потатуркин О.И., Хоцкий В.И. Голографический метод обработки изображений в пространственно-некогерентном монохроматическом свете. В книге Оптическая обработка информации, Л., ФТИ, 1979, стр. 61-66.
5. Волков Л.В., Ларкин А.И., Маркилов А.А., Миронов Ю.А., Стариков С.Н. Применение телевизионной ЭЛТ в голографическом корреляторе и схеме записи Фурье-голограмм. В сб. Оптические и оптико-электронные методы обработки изображений и сигналов. Под ред. Гуревича С.Б. и Самарова Р.М. Л., ДИАС, 1982, стр. 65-67.

6. Краснова Л.О., Ларкин А.И., Миронов Ю.А. Исследование характеристик коррелятора Ломанна. В сб. Применение методов оптической обработки информации и голографии. Под ред. Гуревича С.Б. и Соколова В.К., Л., ЛИЯФ, 1980, стр. 70-73.
7. Zarubin A.M., Larkin A.I., Markilov A.A., Matveev A.K., Mironov Yu.A., Starikov S.N. Optical Data Proc. with Transformation of Laser Radiation Spatial Coherence. In: Proc. 15th Int. Congr. on High Speed Photogr. and Photonics. 1982, San-Diego, USA, SPIE, v.348, pt.2, p. 970-975.
8. Bykovsky Yu.A., Zarubin A.M., Larkin A.I., Markilov A.A., Matveev A.K., Starikov S.N. Holographic Data Proc. Based on Spatial Coherence Transformation. In: Lasers and Holographic Data Processing, Ed. by N.G. Basov, M., Mir, 1984, p. 30-66.
9. Hausler A., Lohmann A.W. Hybrid Image Processing. In: Proc. ICO Application of Holography and Optical Data Proc., Jerusalem, 1976, N.Y., Plenum Press. 1977, p. 724.
10. Быковский Ю.А., Королев-Коротков А.Н., Ларкин А.И., Маркилов А.А., Стариков С.Н. Амплитудно-фазовое распознавание изображений в голографическом корреляторе с частично-когерентным освещением. Тез. докл. У Всес. школы по оптической обработке информации, Киев, 1984, Киев, КГУ, 1984, стр. 301-302.
11. Сороко Л.М. Основы голографии и когерентной оптики. М., Наука, 1971, стр. 616.
12. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах. М., Наука, 1968, стр. 400.
13. Колесников А.А., Лаптева Н.В. О возможности анализа мелкоструктурных изображений корреляционным методом. ЖТФ, 1974, т. 44, вып. 9, стр. 1896-1902.
14. Букин О.А., Быковский Ю.А., Ларкин А.И., Маркилов А.А., Стариков С.Н. Анализ микроструктуры треков по функции автокорреляции изображений. В кн. Оптическая обработка информации. Л., Наука, 1978, стр. 72-82.
15. Быковский Ю.А. и др., ОИЯИ, PI-86-669, Дубна, 1986.