

Визуализация и распознавание треков частиц методами когерентной лазерной голографии

А.И. Ларкин

Центр Фотоника, Институт ЛаПлаз, Национальный исследовательский ядерный Университет «МИФИ», Москва, Россия

ORCID: 0000-0002-1739-5067, photonics@mephi.ru

Аннотация

Предлагаемая статья открывает серию публикаций, связанных с применением лазерной фотоники для визуализации результатов в экспериментальной физике. Данное сообщение посвящено анализу экспериментальных результатов использования голографических корреляторов с когерентным освещением. Для решения типичных задач обнаружения событий в трековых детекторах элементарных частиц. Рассмотрены возможности трёхмерной голографической визуализации и оптических корреляторов с когерентным лазерным освещением. Обосновано использование голографических систем автоматического распознавания событий, зарегистрированных в трековых детекторах, на стадии первичного отбора по форме или интенсивности сигнала корреляции. Показана целесообразность преобразования когерентности лазерного излучения и переход к оптической визуализации и обработке информации излучением частичной пространственной когерентности.

Ключевые слова: лазерная фотоника, голография, корреляция, когерентность.

1. Введение

Просмотр и предварительный отбор снимков с трековых камер является одной из наиболее трудоёмких и длительных стадий обработки результатов эксперимента. Оптические и в том числе голографические методы обработки данных отличает высокая информационная ёмкость носителя – светового поля и голографических блоков памяти, естественность представления информации в двумерном виде, высокая скорость непосредственной обработки, возможность многоканального анализа входных данных. Поэтому практически сразу после появления одной из важнейших когерентно-оптических схем обработки – голографического корреляционного распознавания изображений методом фильтрации пространственных частот [1] – возник интерес к

её применению для обработки снимков с пузырьковых камер [2].



Рисунок 1 – Лаборатория ручной визуализации голограмм трековых детекторов. Университет Tohoku (Япония)

В совместном проекте лаборатории FNAL (США) и центра Анализа Данных Трековых Детекторов университета Tohoku (Япония) на 30-дюймовой камере было зарегистрировано $5 \cdot 10^4$ голограмм трёхмерных трековых объектов.

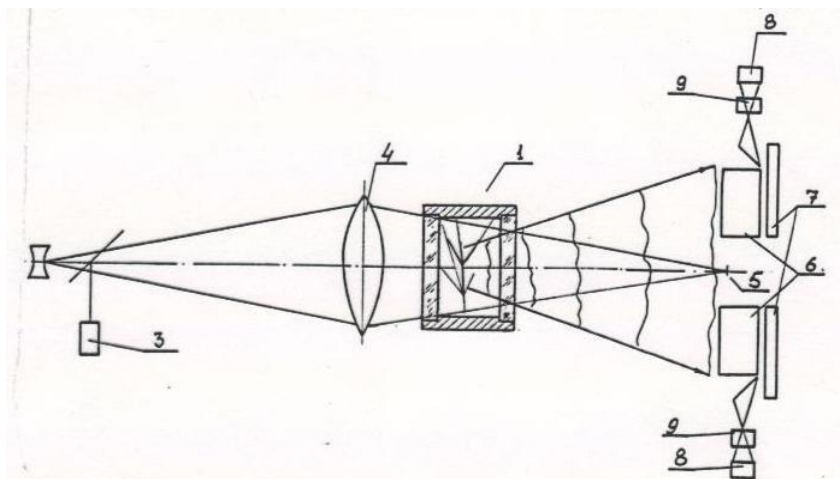


Рисунок 2 – Схема голографического распознавания следов частиц в трековом детекторе

1 – трековый детектор, 2 – импульсный лазер, 3 – источник некогерентного света, 4 – конденсор, 5 – пространственный фильтр, 6 – фурье-интерферометры, 7 – регистраторы голограмм, 8 – табло служебной информации, 9 – объективы системы регистрации служебной информации. В схеме также показаны зеркала, линза-расширитель пучка и светоделитель, но ради упрощения обозначения этих элементов опущены.

При таких объёмах данных ручная визуализация (рис.1) становится настолько трудоёмкой [3], что поиск информативного события практически нереализуем.

2. Особенности голографической визуализации событий в трековых детекторах

Анализ задач обработки данных трековых детекторов для решения оптическими методами, показывает, что практический интерес могут представлять не измерение геометрических параметров событий или их поиск по этим признакам, а в первую очередь задачи ускорения просмотра снимков и распознаванием событий по топологическим признакам: наличию звёзд, числу треков в звёздах, окончанию треков, подавлением фоновых треков.

Введение в экспериментальную практику высокоэффективных малообъёмных трековых камер в качестве вершинных детекторов [4,5] и возникшая в связи с этим потребность голографического съёма информации с таких камер дают ощутимый импульс и для более при-

стальных исследований возможностей оптической обработки данных с трековых камер в новых условиях [6,7]. В круг таких исследований входит переосмысление методов и схем, предложенных ранее для когерентных систем обработки [8-10], исследование оптических способов распознавания событий с нефиксированной геометрией [11-12], разработка и создание систем частично-когерентной фотоники [13-15].

Эксперименты по определению вида корреляционных сигналов и избирательности распознавания проводились на моделях трековых событий. Экспериментальная установка представляла собой вариант голографического коррелятора Вандер Люгта, дополненный схемой записи голографических фильтров и регистрирующей аппаратурой. Наша система голографического распознавания образов (рис.2,3) позволяет производить сравнение двух изображений (транспарантов): распознаваемого, установленного во входной плоскости, и эталонного, записанного на голографическом фильтре – по их функции взаимной корреляции.

Объекты, возникающие при обработке данных трековых детекторов, образуются, если отвлечься от их

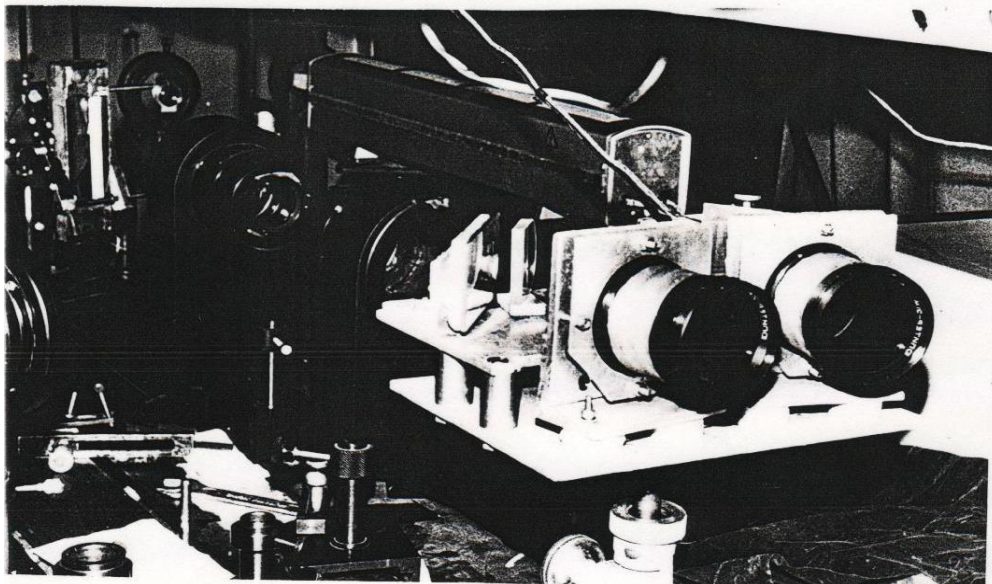


Рисунок 3 – Устройство голографического распознавания следов частиц в трековом детекторе

микроструктуры, отрезками прямых, дугами и комбинациями их небольшого числа. Эффективность системы распознавания тем выше для данного класса объектов, чем менее трудоёмки операции, которые необходимо проделать над входными сигналами для установления различия или тождественности распознаваемых объектов. В тех случаях, когда объект образован множеством элементов различной конфигурации, операция наиболее проста: устанавливается наличие (при совпадении объектов) или отсутствие (при несовпадении) световой точки в выходной плоскости. Для рассматриваемых объектов, относящихся к классу объектов, образованных малым числом простых элементов, необходимо анализировать особенности формы сигналов корреляции, позволяющие обнаруживать события с заданными параметрами среди остальных. На рис. 4 представлен пример результата распознавания события в виде трёхлучевой звезды.

3. Основные задачи распознавания, решаемые голографическим коррелятором

3.1. Обнаружение прямого трека заданного направления

При несовпадении направления трека с направлением эталонного отрезка сигнал кросс-корреляции трансформируется в параллелограмм. Используя этот признак сигнала, можно выделять все отрезки данного направления. Кроме того, имеется различие в интенсивности сигналов корреляции в зависимости от угла между эталонным и предъявляемым отрезками. Выбором параметров эталонного отрезка можно управлять избирательностью обнаружения.

3.2. Обнаружение заданного угла, образованного двумя треками

Рассмотренные объекты имеют протяжённость корреляционного сигнала сравнимую с собственным размером, поэтому их отличие или совпадение наиболее наглядно проявляется в форме сигнала, в то время как измерение пиковой интенсивности кросс- и автокорреляционных сигналов становится неудобным, поскольку необходимо устанавливать координаты точки измерения на протяжённом сигнале.

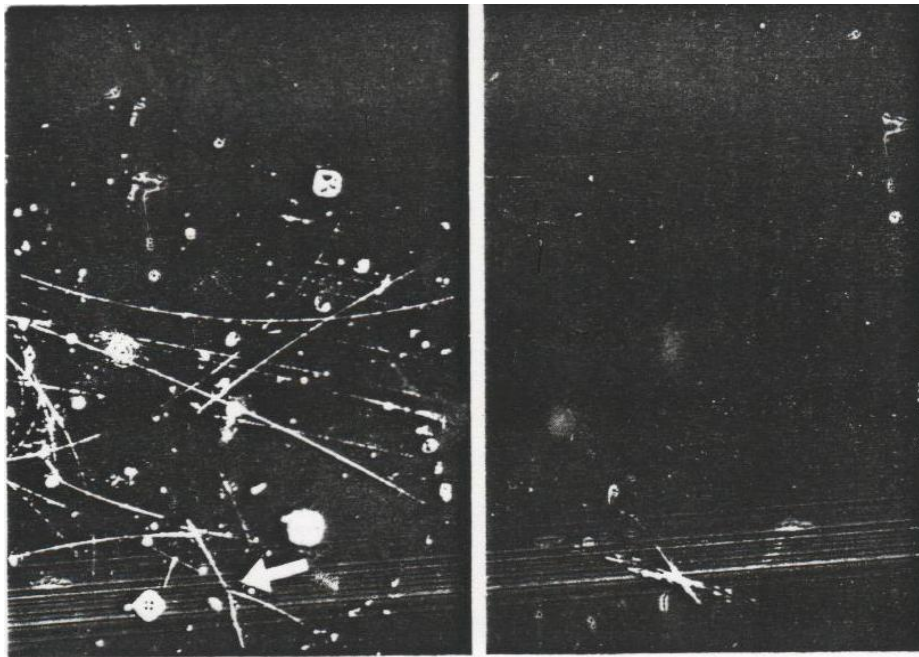


Рисунок 4 – Пример голографического распознавания события в виде трёхлучевой звезды

а – входной объект, б – сигнал в корреляционной плоскости

Сигналы корреляции представляют сумму сигналов по отдельным отрезкам. Для этих объектов также возможно обнаружение по форме сигнала при несовпадении углов в случае одинаковой ориентации одной из сторон предъявляемого и эталонного углов. Допустима регулировка избирательности обнаружения выбором ширины и длины отрезков, образующих эталонное изображение угла, записываемое на голографический фильтр.

3.2. Обнаружение событий, образованных криволинейными треками

В этом случае распознаваемые объекты обладают дополнительными информационными признаками, усложняющими их структуру. Сигнал корреляции локализуется, и распознавание сводится к установлению наличия или отсутствия локализованного светового отклика. По сравнению с объектами, имеющими протяжённый сигнал корреляции, упрощается измерение его величины, так как возможен интегральный замер по пятну, что даёт возможность использования зависимости значений сигнала

корреляции от несовпадения кривизны распознаваемой и эталонной дуг.

4. Количественная оценка сигналов и регулировка режимов распознавания

При распознавании объектов в голографическом корреляторе могут быть получены характеристики сигналов, близкие к расчётным, и, следовательно, возможны количественная оценка сигналов и регулировка режимов распознавания. События на снимках, подлежащие обнаружению, могут появляться во множестве вариантов из-за ограниченного количества кинематических связей и произвольной ориентации. Для поиска событий в этом случае необходимо либо создать голографический фильтр, способный опознавать событие по топологическим признакам, либо использовать многоканальную обработку по совокупности фильтров, на которых записаны с шагом, определяемым избирательностью отдельного эталона, набор эталонов, перекрывающий весь диапазон возможных конфигураций события на снимках. Второй путь может потре-

бовать последовательно-параллельного сравнения, т.е. помимо параллельного во времени сравнения с группой эталонов, записанных на одной голограмме, оперативной замены таких голограмм. Конкретный пример – построение сечения упругого рассеяния π^+ на He_3 . Учёт произвольной ориентации плоскости, в которой расположена вилка рассеяния, показывает, что необходимо использовать более 10^2 эталонов.

Такое количество эталонов технически может быть записано на одной голограмме, но фильтры, соответствующие другим диапазонам углов рассеяния, следует записывать на других голограммах. Задача быстрой смены голограмм-фильтров в схемах с когерентным освещением становится трудновыполнимой, т.к. необходимо обеспечить точность позиционирования около 10 мкм. Это одно из существенных ограничений на пути использования голографии с излучением высокой пространственной когерентности.

Голографический корреляционный анализ позволяет определить количественный параметр – степень локализации сигнала автокорреляции объекта $L = \delta/D$, где D – наибольший размер объекта, δ – протяжённость функции его автокорреляции. При $L \ll 1$ объекты распознавания являются «сложными», при $L \leq 1$ – «простыми». В случае «простых» объектов: прямые треки и звезды – формируемая ими пространственная структура автокорреляционных сигналов совпадения, схожа с самими объектами. Однако малое изменение параметра предъявляемого объекта резко меняет форму сигнала, в то время как отличие по изображению самого объекта выявить трудно. Именно это определяет целесообразность использования системы частично когерентного распознавания даже для объектов, принадлежащих к классу «простых».

Распознавание «простых» объектов накладывает особенности и на элементы оптической системы. Запись голографического фильтра, предназначенного для использования в когерентном освещении, затруднена из-за узости спектра

пространственных частот эталонного объекта и большого динамического диапазона составляющих спектра. Так как реальные треки образованы отдельными пузырьками, то необходимо обеспечить неискажённую запись низких пространственных частот эталона, что приводит к низкой дифракционной эффективности голографического фильтра (<1%) и высокому уровню шумов. Частично эта трудность может быть обойдена применением методов поэлементной и двухступенчатой записи.

При пространственно-когерентном освещении одним из наиболее жёстких является требование к фазовым неоднородностям основы обрабатываемых снимков. Размер обрабатываемого изображения не может существенно превышать радиус корреляции фазовых шумов носителя, т.к. в противном случае величина сигнала будет определяться не полезной информацией, а характером фазовых шумов. Это ограничение также может быть преодолено использованием в голографическом корреляторе лазерного излучения с преобразованной функцией когерентности.

5. Выводы

- Использование голографических систем распознавания событий, зарегистрированных в трековых детекторах, возможно на стадии первичного отбора по форме или интенсивности сигнала корреляции.

- Использование голографических систем визуализации событий в трековых детекторах, обладает существенными достоинствами.

- Целесообразно разработать методы обнаружения событий с нефиксированной геометрией, т.к. ориентация и точная геометрия событий заранее обычно неизвестны, и поэтому число требуемых голографических фильтров может оказаться чрезмерно большим – более 10^2 .

- Три фактора делают необходимым преобразование когерентности лазерного излучения и переход к голографической визуализации и обработке

информации излучением частичной пространственной когерентности.

1. При когерентном освещении практическая реализация потенциальных возможностей голографических систем существенно затруднена жёсткими требованиями к фазовым неоднородностям.

2. При когерентном освещении чрезвычайно высока чувствительность результата распознавания к точности установки голографического фильтра.

3. При когерентном освещении практически невозможно распознавание “простых” объектов из-за отсутствия локализации корреляционного сигнала в выходной плоскости системы.

Список литературы

1. Vander Lugt A. Signal Detection by Complex Spatial Filtering. *IEEE Trans. Inform. Theory*, v.IT-10, N.2, p.139-145, 1964
2. Bykovsky Y.A., Larkin A.I., Markilov A.A., Starikov S.N. Holographic processing of track chamber data. *Nuclear Instruments and Methods*, 131 (1), pp. 129-132, 1975
3. Kitagaki T., Yuta H. Holographic chamber for neutrino experiments. *Nuclear Instruments and Methods*. V. A281. P. 81. 1989
4. Stefanini G., Hall G., Dowell J.D. Optoelectronic analogue signal transfer for LHC detectors CERN/DRDC/91-41. October 1991
5. Bjelckhagen H., Harigel G. *Nuclear Instruments and Methods*. V. 227. P. 437, 1984.
6. Falconer D.G. Optical Processing of Bubble Chamber. *Appl. Opt.*, v.5, N.9, p. 1365-1369. 1996
7. Averianov S.G., Dolgoshein B.A., Larkin A.I. Physical properties of the coherent laser radiation and its employment for high energy physics experiments, CERN Workshop on Electronics for LHC Experiments. Lisbon, 11–15 September, 1995
8. Беккер А.М., Бухтоярова Н.И. Определение геометрии события в пузырьковых камерах когерентно-оптическими методами. Тез.докл. У Всес.школы по оптической обработке информации, Киев, КГУ, стр. 122, 1984
9. Ларкин А.И., Русаков В.А., Стариков С.Н., Препринт ОИЯИ Р1-86-669. Дубна, 1986.
10. Ларкин А.И., Русаков В.А., Стариков С.Н. Препринт ОИЯИ Б1-1-86-670. Дубна, 1986.
11. Larkin A.I., Matveev A.K., Zarubin A.M., Optical vata processing with transformation of laser radiation spatial coherence. In: Proc. 15th Int. Congress on High Speed Photography and Photonics, San-Diego, USA, SPIE, v.348, pt.2, p. 970-975. 1982
12. Larkin A.I., Zarubin A.M. OSA Technical digest online. Optical Society of America, *Frontiers in Optics*. Paper JTU3A.23. <https://doi.org/10.1364/FIO.2014.JTU3A.23>, 2014
13. Grosman M., Larkin A. Laser Photonics in the world, in Russia, in Moscow Engineering Physics Institute. II Conference on Plasma and Laser Research and Technologies. MEPhI, 2016
14. Larkin A.I., Starikov S.N. Laser photonics as a tool of experimental physics. *Instruments and Experimental Techniques*, in print, 2017
15. Ларкин А.И., Юу Ф.Т.С. Когерентная фотоника. 2е издание, М.: БИНОМ, 2015