

сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна

P13-85-502

Д.Бенце, Л.М.Сороко

ТАНГЕНСНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА СОБЫТИЙ
В МЕЗООПТИЧЕСКОМ ФУРЬЕ-МИКРОСКОПЕ
ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ФОТОЭМУЛЬСИИ

1985

1. ВВЕДЕНИЕ

Конструкция и принцип действия мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии описаны в ¹. В ² рассмотрена связь между расположением в пространстве прямых следов частиц в ядерной фотоэмульсии и сигналами на выходе МФМ. Показано, что сигналы на выходе МФМ содержат информацию о z -координате прямого следа частицы. Введенная в ² система координат (θ, ρ) позволяет отобразить полную информацию о проекции прямых следов частиц на плоскость $z = 0$ в пределах поля зрения МФМ. В указанной системе координат выходные сигналы прямых следов частиц, образующих ядерное взаимодействие /"событие"/, ложатся на синусоиду.

В данной работе рассмотрен тангенсный алгоритм поиска ядерных взаимодействий по сигналам, которые регистрируются вблизи фокальной окружности МФМ. Описана схема движения каретки МФМ для реализации тангенсного алгоритма поиска событий. Кроме этого изложен алгоритм прямого наблюдения событий в ядерной фотоэмульсии, который не требует регистрации сигналов на выходе МФМ от отдельных следов частиц. В заключении дана оценка быстродействия МФМ для указанных двух алгоритмов поиска событий в ядерной фотоэмульсии.

2. ТАНГЕНСНЫЙ АЛГОРИТМ ПОИСКА СОБЫТИЙ В МФМ

Описываемый алгоритм относится к такой конструкции МФМ, когда сигнал на выходе МФМ считывают только в пределах узкой кольцевой зоны вблизи фокальной окружности, при этом ширина кольцевой зоны равна разрешению системы по радиальной координате Δr . Это означает, что регистрируют информацию об ориентации прямых следов частиц, проходящих через центр поля зрения МФМ ³.

Рассмотрение тангенсного алгоритма начнем с простейшего случая, когда все следы частиц находятся в медианной плоскости эмульсии $z = 0$. На рис.1 даны система координат x, y , связанная с ядерной фотоэмульсией, и принятые обозначения.

Показаны просматриваемая область ядерной фотоэмульсии и поле зрения МФМ с центром в точке (x_c, y_c) . Событие с вершиной в точке (x_0, y_0) состоит из четырех прямых следов, идущих под углами $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ к оси x . В процессе сканирования поле зрения и МФМ перемещают относительно ядерной фотоэмульсии.



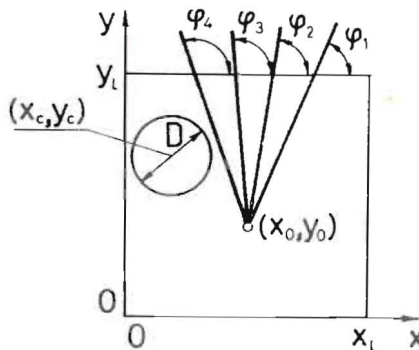


Рис.1. Система координат и обозначения, используемые в тангенсном алгоритме поиска событий.

Для эффективной реализации описываемого алгоритма сканирование просматриваемой области производят дважды. Сначала информацию о прямых следах частиц считывают в интервале углов $\pi/4 \leq \phi \leq 3\pi/4$ путем перемещения поля зрения

вдоль оси x при фиксированном y_c . Две соседние линии сканирования отстоят друг от друга на величину Δy . Затем информацию считывают в интервале углов $-\pi/4 \leq \phi \leq \pi/4$ перемещением поля зрения вдоль оси y при фиксированном x_c . Шаг между двумя соседними линиями сканирования равен Δx . Величины Δx и Δy в общем случае зависят от условий просмотра, но, как правило, они не могут превышать диаметр поля зрения МФМ. Рассмотрим подробно только первый этап сканирования.

Во время передвижения поля зрения относительно ядерной фотозумьсии i -й след частицы пересечет центр поля зрения, если выполнено условие

$$y_c = \operatorname{tg} \phi_i \cdot (x_c^i - x_0) + y_0 \quad /1/$$

В этот момент времени возникнет сигнал на выходе МФМ, который соответствует i -му следу частицы. Так как пара сигналов на выходе МФМ, соответствующая данному прямому следу частицы, лежит на линии, перпендикулярной следу частицы, то отсчитываемый угол равен $\theta = \phi - \pi/2$. Тогда /1/ можно записать в виде

$$x_c^i = (y_0 - y_c) \cdot \operatorname{tg} \theta_i + x_0 \quad /2/$$

Введем теперь систему координат $/\operatorname{tg} \theta, x /$, показанную на рис.2. В этой системе координат след частицы, который пересекает центр поля зрения при фиксированной координате y_c , отображается точкой с координатами $/\operatorname{tg} \theta, x /$, где θ - измеренный в МФМ угол соответствующего сигнала на выходе, а $x = x_c$ в момент появления регистрируемого сигнала. Из /2/ видно, что, если следы частиц выходят из общей вершины с координатами $/x_0, y_0 /$, то сигналы

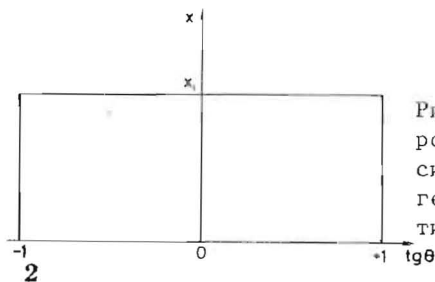


Рис.2. Система координат, в которой отображают и обрабатывают сигналы на выходе МФМ в тангенсном алгоритме поиска событий.

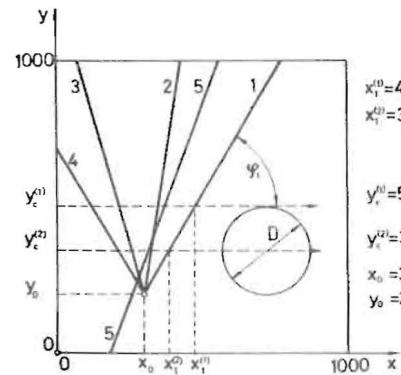


Рис.3. Исследуемая область ядерной фотозумьсии, содержащая четырехлучевое событие и отдельный след частицы. Размеры - в мкм.

$x_1^{(1)} = 473$
 $x_1^{(2)} = 386$
 $y_c^{(1)} = 500$ в системе координат $/\operatorname{tg} \theta, x /$ ложатся на прямую линию /1/ линия события /1/, угол наклона которой с осью $\operatorname{tg} \theta$ равен
 $y_c^{(2)} = 350$
 $x_0 = 300$
 $y_0 = 200$
 $\beta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} (y_0 - y_c) \quad /3/$

После окончания сканирования вдоль оси x при данном y_c прямоугольник в системе координат на рис.2 будет содержать помимо точек, лежащих на линии события, также точечные сигналы, которым соответствуют прямые следы частиц, не связанных с событием. В /4,5/ описаны алгоритмы обнаружения трекоподобных конфигураций среди множества точечных сигналов на выходе МФМ. После того как зафиксирована координата y_c , находят координаты вершины события $/x_0, y_0 /$, используя уравнения /2/ и /3/. Повторяя сканирование вдоль оси x при различных y_c , находят новые события и отбрасывают ложные ядерные взаимодействия.

Аналогичные алгоритмы используют при сканировании вдоль оси x . Если событие содержит вторичные следы частиц в широком интервале углов, то данные о событии содержатся частично в результатах x -сканирования, частично в результатах y -сканирования. Чтобы получить полную информацию, частичные данные складывают, заполняя весь интервал углов ϕ .

3. ПРИМЕР

Чтобы пояснить изложенный тангенсный алгоритм поиска событий, рассмотрим пример, показанный на рис.3-5. На рис.3 изображена просматриваемая область ядерной фотозумьсии размером 1×1 мм², на которой имеется пять следов частиц. При этом четыре из них, помеченные номерами $N = 1 \div 4$, относятся к событию с вершиной в точке $x_0 = 300$ мкм, $y_0 = 200$ мкм. След частицы $N = 5$ не связан с этим событием. На рис.3 показаны также две линии сканирования с координатами $y_c^{(1)} = 500$ мкм и $y_c^{(2)} = 350$ мкм. На рис.4 и 5 приведены результаты обработки сигналов, полученных в процессе сканирования вдоль линий $y_c = y_c^{(1)}$ и $y_c = y_c^{(2)}$ соответственно. Процедуру построения сигналов на рис.4 и 5 продемонстрируем на примере следа $N = 1$. При первом сканировании вдоль линии $y_c^{(1)} = 500$ мкм в момент времени, когда центр поля зрения МФМ находится над точкой $(x_1^{(1)} = 473$ мкм, $y_c^{(1)})$, на выходе МФМ появится световой сигнал под углом $\theta_1 = -30^\circ$. Ему со-

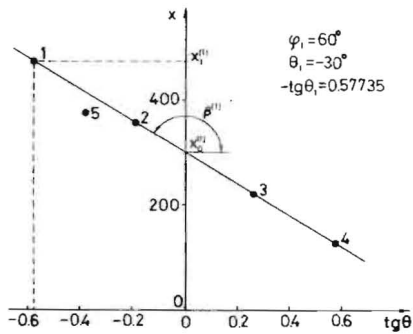


Рис.4. Результаты обработки сигналов на выходе МФМ, зарегистрированных после сканирования вдоль линии $y_c = 500$ мкм. Размеры - в мкм.

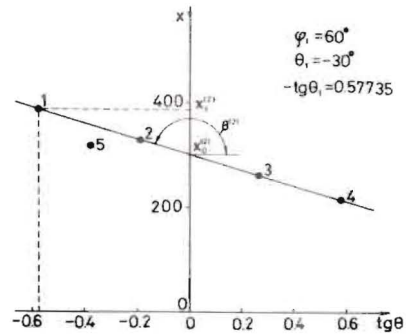


Рис.5. Результаты обработки данных для линии сканирования $y_c = 350$ мкм. Размеры - в мкм.

ответствует прямой след частицы, идущий под углом $\phi_1 = 60^\circ$ и пересекающий центр поля зрения. Совокупность данных $x_1^{(1)}$ и θ_1 позволяет построить точку "1" в системе координат $/tg\theta, x/$ на рис.4. Аналогично строят точку "1" на рис.5 по результатам сканирования вдоль линии $y_c = y_c^{(2)}$. Так как угол наклона прямого следа частицы не зависит от положения линий сканирования, то абсциссы указанных двух точек одинаковы. После построения всех точек от "1" до "5" в формате $/tg\theta, x/$ можно приступить к анализу взаимного расположения сигналов прямых следов частиц.

Из /2/ следует, что сигналы следов частиц, образующих событие, ложатся на прямую линию /линию события/. Это свойство лежит в основе быстрого алгоритма поиска самого события без стадии восстановления в пространстве отдельных следов частиц. После того как обнаружена линия события, находят координаты вершины события $/x_0, y_0/$. Координата x_0 равна ординате точки пересечения линии события с вертикальной осью, а координату y_0 находят из соотношения /3/:

$$y_0 = y_c + tg \beta . \quad /4/$$

В идеале данные двух сканирований при $y_c = y_c^{(1)}$ и $y_c = y_c^{(2)}$ должны приводить к одним и тем же значениям координаты вершины события. Из рис.4 и 5 видно также, что точка "5" не ложится на линию событий, так как соответствующий след частицы не пересекает вершину события.

Если следы частиц не лежат в медианной плоскости $z = 0$, то два сигнала на выходе МФМ от одного и того же следа частицы появляются не одновременно, а в различные моменты времени, которым соответствуют разные координаты x_c . Пусть $x_c^{(1)}$ - значение

координаты x_c , измеренной в условиях, когда сигнал на выходе МФМ появляется в интервале $3\pi/4 \leq \theta \leq 5\pi/4$, а $x_c^{(2)}$ - когда сигнал появляется в интервале $-\pi/4 \leq \theta \leq \pi/4$. Из элементарных геометрических рассуждений следует, что разность

$$\Delta x_c = x_c^{(2)} - x_c^{(1)} = 2z \cos \theta \cdot \text{arc tg} (R/d) , \quad /5/$$

где R - радиус фокальной окружности, а d - расстояние от плоскости фокального кольца до медианной плоскости. Величина Δx_c содержит в явном виде информацию о z - координате отрезка прямого следа частицы в поле зрения МФМ. Можно сказать, что все предыдущие рассуждения остаются в силе, если координату x_c заменить на величину

$$\bar{x}_c = \frac{1}{2} [x_c^{(1)} + x_c^{(2)}] . \quad /6/$$

Однако необходимо сделать следующие два замечания. Во-первых, здесь возникает проблема неоднозначности, с которой мы столкнулись в случае синусного алгоритма поиска событий /2/. Так как $|\Delta x_c| < D$, где D - диаметр поля зрения МФМ, то мы не можем утверждать, что данные сигналы принадлежат к одному и тому же следу частицы. Фактически все возможные комбинации из них следует интерпретировать как один реальный след частицы. Однако если одна или несколько из таких комбинаций являются ложными, то при повторном сканировании они могут оказаться отброшенными как нереальные.

Во-вторых, это проблема оптимизации диаметра поля зрения МФМ. При просвечивании ядерной фотоэмульсии используют гауссов пучок света от лазера. Если след частицы расположен далеко от медианной плоскости, то он будет освещаться боковой частью пучка света. Это приведет к тому, что амплитуда сигнала на выходе МФМ будет меньше, чем для следов частиц в медианной плоскости. Из сказанного следует, что диаметр поля зрения МФМ необходимо выбрать из условия, чтобы на расстоянии от осевой линии пучка света, равном $hR/2D$, где h - толщина слоя ядерной фотоэмульсии, интенсивность освещения уменьшалась незначительно, например, на 10%.

4. АЛГОРИТМ ПРЯМОГО НАБЛЮДЕНИЯ СОБЫТИЙ В МФМ

В данном алгоритме прямого наблюдения событий отсутствует стадия регистрации сигналов от отдельных прямых следов частиц, и, как результат, отпадает необходимость их обработки. Чтобы пояснить сущность нового алгоритма наблюдения событий, рассмотрим рис.6, на котором дан разрез мезооптического фурье-микроскопа для ядерной фотоэмульсии. Принцип действия этого устройства подробно изложен в /2/. На рис.6 показаны три точечных источника света на оптической оси МФМ на различных расстояниях

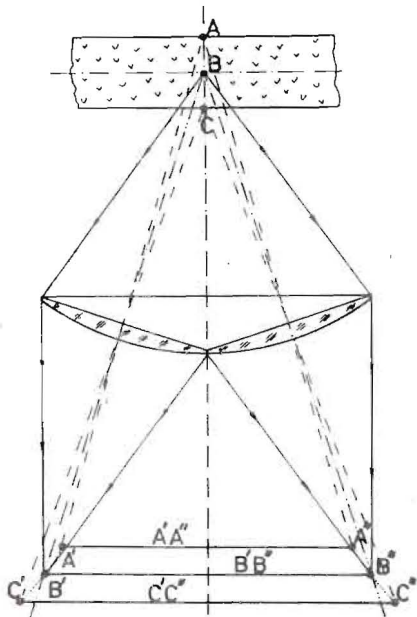


Рис.6. Схема формирования трех фокальных окружностей для событий, вершина которых находится на оптической оси МФМ на трех различных глубинах.

от медианной плоскости $z = 0$. Вблизи выходной плоскости МФМ формируются три concentric фокальные окружности, центры которых лежат на оптической оси МФМ, но имеют различные z -координаты. Пусть оптическая система имеет глубину резкости вдоль координаты z , равную толщине слоя ядерной фотозумльсии¹⁶. В этих условиях мы можем спроектировать указанные три фокальные окружности на плоскость, в которой лежит центральная фокальная окружность. Получим приведенные фокальные окружности, радиусы которых

определяются z -координатами соответствующих точечных источников света. Чем выше расположен точечный источник света, тем меньше радиус приведенной фокальной окружности.

Из сказанного ясно, что, если следы частиц образуют событие, вершина которого совпадает с одним из трех указанных точечных источников света, то сигнал на выходе МФМ от таких следов частиц расположится вблизи соответствующей фокальной окружности.

В общем случае любое фокальное кольцо шириной $\Delta\rho$ соберет сигналы следов частиц с вершиной событий, лежащей на оптической оси в частичном слое ядерной фотозумльсии, толщина которого равна

$$\Delta z = \Delta\rho / \sin \alpha_{1/2} \quad (7)$$

$$\text{где } \alpha_{1/2} = \arcsin(2B'C / B'B'') \quad (8)$$

Полное число фиксированных в пространстве фокальных колец, необходимое для дифференциальной регистрации всех событий, вершина которых лежит на оптической оси МФМ, равно

$$N_z = h / \Delta z = h \sin \alpha_{1/2} / \Delta\rho \quad (9)$$

Например, для $\Delta\rho = 5$ мкм, $\alpha_{1/2} = 30^\circ$, $h = 200$ мкм, $N_z = 20$.

Амплитуда суммарного сигнала, идущего от всех частей фокального кольца, будет в n раз больше средней амплитуды сигнала от отдельного следа частицы, где n - число следов частиц в событии. Любой эксцентриситет между одним фокальным кольцом и узким кольцом, на котором лежат сигналы на выходе МФМ от прямых следов

частиц, образующих событие, приведет к тому, что сигналы на выходе МФМ не попадут на одно фокальное кольцо, а будут разбросаны по нескольким фокальным кольцам. Амплитуда суммарного сигнала в каждом фокальном кольце будет меньше, чем в случае отсутствия указанного эксцентриситета, и такое событие может быть отброшено путем дискриминации по амплитуде фотоэлектрических сигналов в каждом из фокальных колец.

5. ОЦЕНКА БЫСТРОДЕЙСТВИЯ МФМ

Оценим быстродействие МФМ для тангенсного алгоритма поиска событий и для алгоритма прямого наблюдения событий в МФМ. Основными величинами, характеризующими разрешающую способность МФМ, являются¹²: $\Delta\rho$, $\Delta\theta$ и Δz . В типичных условиях $\Delta\rho = 5$ мкм, $\Delta\theta = 10'$ и $\Delta z = 20$ мкм. Число дискретных элементов отсчета вдоль угла ориентации прямых следов частиц для тангенсного алгоритма составит

$$N_\theta = \frac{360^\circ}{\Delta\theta} \approx 2100 \quad (10)$$

Для регистрации указанного числа элементов отсчета достаточно использовать одномерную линейку прибора с зарядовой связью /ПЗС/ с числом ячеек 2048. При тактовой частоте считывания данных $f_1 = 4$ МГц время съема угловых данных составит $\Delta t = 0,5$ мс. При шаге между двумя последовательными линиями сканирования вдоль оси x_1 , равном $\Delta\rho$, за одну секунду можно выполнить $1/\Delta t$ циклов считывания. При этом каретка МФМ переместится на расстояние $\mathcal{L} = \Delta\rho / \Delta t$. Для $\Delta\rho = 5$ мкм имеем $\mathcal{L} = 10$ мм/с. Если диаметр поля зрения МФМ равен $D = 0,3$ мм, то скорость сканирования ядерной фотозумльсии составит 3 мм²/с. Это значение должно быть уменьшено вдвое, так как в тангенсном алгоритме поиска событий сканирование ядерной фотозумльсии ведут дважды: вдоль оси x и вдоль оси y . Поэтому результирующая скорость сканирования ядерной фотозумльсии составит $1,5$ мм²/с или 430 см²/день. Это в 430 раз выше скорости ручного просмотра, ядерной фотозумльсии, составляющей 1 см²/день. Если принять во внимание то, что эффективность ручного просмотра составляет 20%, то ожидаемое быстродействие МФМ для тангенсного алгоритма поиска событий будет в 2000 раз выше скорости ручного просмотра.

Оценим теперь быстродействие МФМ, когда последний функционирует в многоканальном режиме прямого наблюдения событий, минуя стадию регистрации сигналов от отдельных следов частиц. Ширина полосы сканирования в этом случае равна примерно $2\Delta\rho$ или 10 мкм в нашем примере, рассмотренном выше. Малая ширина полосы сканирования компенсируется тем, что в этом режиме не ведут регистрацию угловой информации, и поэтому скорость движения каретки МФМ может быть сделана больше, чем в случае

тангенсного алгоритма поиска событий. Так, например, при тактовой частоте считывания фотоэлектрических сигналов, равной $f_2 = 8$ кГц, скорость движения каретки может быть доведена до значения $v = 2f_2 \Delta r$ или 80 мм/с. За 1 секунду будет просканирована площадь ядерной фотоэмульсии, равная $2v\Delta r$ или 0,8 мм²/с в рассматриваемом примере. Это примерно в два раза меньше эффективной скорости просмотра ядерной фотоэмульсии для тангенсного алгоритма поиска событий. Итак, ожидаемое быстродействие МФМ в многоканальном режиме прямого наблюдения событий составляет 230 см²/день или примерно в 1000 раз выше скорости ручного просмотра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сороко Л.М. ОИЯИ, Б1-13-81-229, Дубна, 1981.
2. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р13-85-137, Дубна, 1985.
3. Астахов А.Я., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р13-85-367, Дубна, 1985.
4. Сороко Л.М., ОИЯИ, Р10-83-77, Дубна, 1983.
5. Комов Г.М., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р13-85-242, Дубна, 1985.
6. Бенце Д., Сороко Л.М. ОИЯИ, Р13-85-138, Дубна, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
1 июля 1985 года

Бенце Д., Сороко Л.М.

Р13-85-502

Тангенсный алгоритм поиска событий
в мезооптическом фурье-микроскопе
для ядерной фотоэмульсии

Изложен тангенсный алгоритм поиска событий /ядерных взаимодействий/ по сигналам, регистрируемым на выходе мезооптического фурье-микроскопа /МФМ/ для ядерной фотоэмульсии вблизи фокальной окружности. Показано, что сигналы на выходе МФМ в этом алгоритме лежат на прямой линии, если следы частиц образуют событие. Рассмотрен пример реализации тангенсного алгоритма поиска событий для четырехлучевого события. Описан алгоритм прямого наблюдения событий в ядерной фотоэмульсии, который не требует ни регистрации сигналов на выходе МФМ от отдельных следов частиц, ни их последующей обработки. Показано, что быстродействие МФМ для указанных двух алгоритмов поиска событий в 10^3 раз выше скорости ручного просмотра.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.
Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод авторов.

Bencze Gy.L., Soroko L.M.

Р13-85-502

Tangent Algorithm for Event Searching
in Mesooptical Fourier Transform Microscope
for Nuclear Emulsion

The tangent algorithm for event (nuclear interaction) searching by signals detected at the output of the Mesooptical Fourier-Transform Microscope (MFTM) in the vicinity of the focal circle is given. It is shown that the signals at the output of the MFTM used in this algorithm are lying on the straight line if particle tracks form the event. An example of realization of the tangent algorithm for event searching in the case of a fourtrack event is considered. A description is given of the algorithm for direct observation of the events in the nuclear research emulsion which requires neither the detection of the signals at the MFTM output for single particle tracks, nor their subsequent processing. It is shown that the MFTM runs for two given algorithm for event searching 10^3 times faster than for the manual searching.

The investigation has been performed at the Laboratory
of Nuclear Problems
Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1985