

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

99-28

P13-99-28

А.Л.Гонгадзе, В.И.Додонов, В.В.Кутько¹,
А.В.Сухоруков¹, Г.А.Шелков, Э.Г.Цхададзе

**ТРАНСПАРЕНТНЫЙ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ
МОДУЛЬ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ
СМЕЩЕНИЙ ОБЪЕКТОВ**

Направлено в журнал «Приборы и техника эксперимента»

¹Санкт-Петербургский государственный институт точной механики
и оптики (технический университет)

Гонгадзе А.Л. и др.

Транспарентный оптико-электронный модуль
для измерения поперечных смещений объектов

Предлагается описание разработки методов и средств для многоточечного транспарентного мониторинга пространственного положения объектов.

Указанный транспарентный оптико-электронный модуль разработан для измерения и мониторинга механических деформаций и малых смещений детекторов элементарных частиц в больших экспериментальных установках физики высоких энергий. Модуль может быть также использован в крупногабаритных инженерных конструкциях для высокоточных измерений деформаций и смещений, вызванных механическими нагрузками, неоднородными тепловыми прогревами отдельных частей конструкций или другими причинами.

Созданным прототипом модуля достигнута точность измерения малых смещений $\sigma \sim 1 \div 3$ микрон.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1999

Перевод авторов

Gongadze A.L. et al.

Transparent Optical-Electronic Module
for Transversal Displacement Measurements of Objects

The description of the method and means design used for objects space displacement multipoint transparent monitoring is offered.

Elaborated transparent optical-electronic module is destined for measuring and monitoring of mechanical deformations and small displacements of elementary particle detectors inside big experimental set-ups of high energy physics.

The module can be used also in big size engineering constructions, for fine measurements of deformations and displacements caused by the mechanical loading, non-homogeneous warming of construction parts and arbitrary other reasons.

The measurement accuracy $\sigma \sim 1 \div 3 \mu\text{m}$ was obtained for small displacement using the produced prototype of module.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Введение. Современные крупногабаритные экспериментальные установки физики высоких энергий включают в себя большое количество систем разного типа. Ряд этих систем, к которым можно отнести сверхпроводящие магниты, приборы высоковольтного и низковольтного питания, огромное кабельное хозяйство, являются источниками значительных магнитных и температурных неоднородностей. Во время проведения физических экспериментов эти неоднородности вызывают нежелательные механические деформации детекторов элементарных частиц и поддерживающих их металлоконструкций. Это приводит к увеличению ошибки в определении траектории элементарных частиц и к ухудшению функционирования установки в целом. Вопрос периодической юстировки приборов давно является одним из основных проблем во время проведения экспериментальных работ. В современных экспериментальных установках помимо выявления деформаций стоит и другая проблема - невозможность корректировки этих смещений. Решение этой проблемы заключается в создании таких измерительных систем, которые дадут возможность измерять и мониторировать появляющиеся деформации. Впоследствии эта информация будет учтена при анализе полученных данных. Сложность данной задачи состоит в том, что необходимо измерять и мониторировать поперечные деформации детекторов элементарных частиц в большом количестве точек, расположенных вдоль некоторой референсной оси одна за другой. Данный вид пространственного контроля можно называть многоточечным транспарентным мониторированием поперечных деформаций объектов.

В экспериментах по физике высоких энергии в настоящее время применяется несколько вариантов измерительных модулей, которые в области их применения способны решить поставленные задачи.

Существующая система RASNIK [1], основанная на геометрическом методе измерения поперечных смещений объектов, имеет трехточечную конфигурацию. В первой точке располагается подсвеченная светодиодом оптическая маска, в третьей - светоприемная камера на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС). Однолинзовый объектив размещается между ними во второй точке. Изображение оптической маски вводится в компьютер с ПЗС-камеры для анализа пространственных параметров структуры маски с целью измерения поперечного смещения объектива с погрешностью не более 2 микрон. Но система RASNIK имеет ограниченную область применения. Она не дает однозначного определения, смещением какого ее компонента был обусловлен сдвиг изображения маски на ПЗС. Эту систему невозможно также применить для измерения поперечных деформаций в дополнительных точках, расположенных между ее компонентами.

Детектор малых смещений ALMY на основе полупрозрачных силиконовых оптических сенсоров [2] обеспечивает определение координаты попа-

дания лазерного луча также с микронной точностью. Используя прозрачность пластин, есть возможность поставить вдоль деформируемой поверхности по пути лазерного луча несколько таких сенсоров и получить полную картину деформации конструкции (т.н. многоточечное транспарентное мониторирование). Но неоднородность коэффициента преломления среды вызывает неконтролируемые отклонения лазерного луча. Это явление значительно усложняет применение сенсоров ALMY в качестве элементов систем многоточечного транспарентного мониторирования. Для подавления указанных отклонений луча разрабатываются специальные покрытия.

В настоящий момент детекторы смещения RASNIK и ALMY используются для осуществления программы юстировки детекторов экспериментов ATLAS, CMS (ЦЕРН) [3, 4, 5, 6].

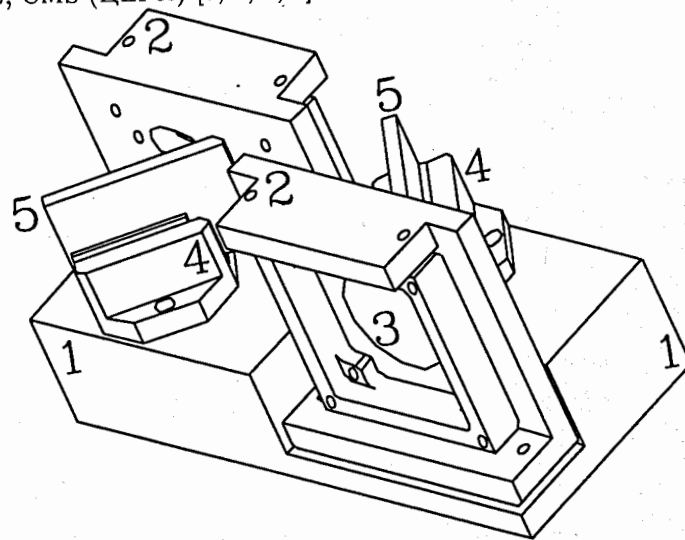
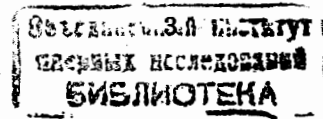


Рис. 1: Общий вид прототипа ТОЭМ: 1 - основание, 2 - держатель ПЗС-камеры, 3 - светофильтр, 4 - держатель светоделительной пластины, 5 - светоделительная пластина

Разрабатываемый транспарентный оптико-электронный модуль (ТОЭМ) (рис.1) реализует геометрический лучевой метод и предназначен для измерения угловых и поперечных смещений объектов. Возможность использования ТОЭМ для обеспечения многоточечного транспарентного мониторирования поперечных деформаций определяется высокими параметрами оптической однородности прозрачных элементов модуля, в качестве которых применяются стеклянные светоделительные пластины. Использование в составе модуля двух ПЗС-камер дает возможность также измерять угловые составляющие деформаций объектов.



Техническое решение ТОЭМ. Основу измерительной концепции ТОЭМ составляет геометрический лучевой метод. Основными элементами модуля являются две светопринимающие камеры на основе матричных ПЗС и две стеклянные светоделительные пластины, имеющие высокие характеристики параллельности, плоскостности и чистоты поверхностей граней. Светоделительные пластины характеризуются также высокими параметрами однородности структуры материала. Лазерный пучок, ориентированный по продольной оси модуля, проходит через светоделительные пластины, установленные под углом 45° к нему (рис.2, пучок 1). Отраженный от светоделительных пластин лазерный пучок формирует на светочувствительных поверхностях ПЗС, расположенных вне зоны распространения основного пучка, световые пятна-марки. Положение световых пятен в плоскостях ПЗС меняется в зависимости от пространственного положения лазерного пучка (рис.2, пучки 2 и 3) и однозначно определяет его угловое и поперечное положение. Информация с ПЗС считывается в компьютер для цифровой обработки. В процессе обработки изображений оценивается положение световых пятен в плоскостях ПЗС и решается система уравнений, описывающих зависимость пространственного положения лазерного пучка от положения пятен. Результатом цифровой обработки являются оценки углового и поперечного положения лазерного пучка.

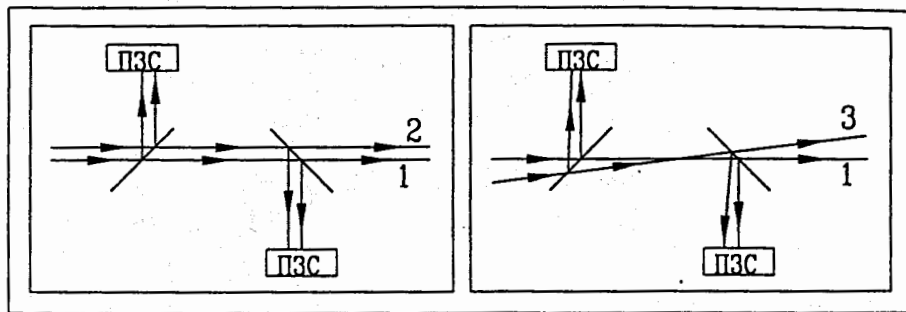


Рис. 2: Схема прохождения лазерного пучка в горизонтальном сечении ТОЭМ: 1 - исходное положение пучка, 2 - параллельно-поперечное смещение пучка, 3 - поперечное и угловое смещение пучка

Существуют две основные структурные оптические схемы ТОЭМ: схема с двухсторонним (опозиционным) расположением ПЗС (рис.3а) и схема

с односторонним расположением ПЗС (рис.3б). В первой схеме светоделительные пластины располагаются под углом 45° к продольной оси модуля и перпендикулярны друг другу. ПЗС размещаются в двух продольных базовых плоскостях опозиционно друг другу со смещением вдоль продольной оси модуля. Во второй схеме светоделительные пластины располагаются под углом 45° к продольной оси модуля и параллельны друг другу. ПЗС размещаются в одной продольной базовой плоскости.

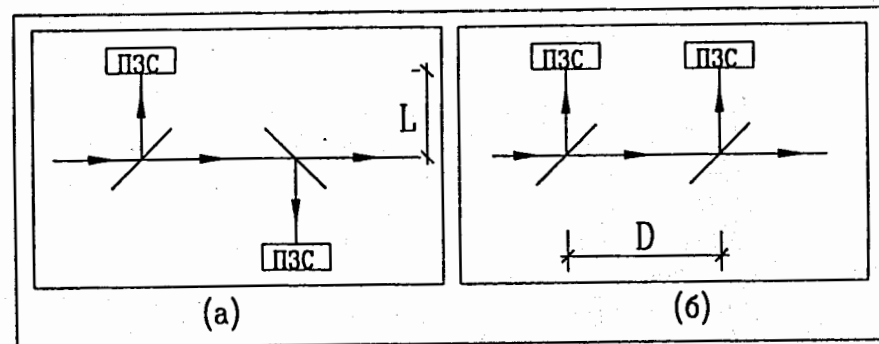


Рис. 3: Структурные оптические схемы ТОЭМ: а) с двухсторонним расположением ПЗС, б) с односторонним расположением ПЗС

Схема с двухсторонним расположением ПЗС обладает определенным преимуществом. Светоделительные пластины, расположенные перпендикулярно друг другу, образуют простейший вариант так называемого оптического элемента прямого видения. Этот элемент значительно, но не полностью, компенсирует плоскопараллельное смещение лазерного пучка на выходе из ТОЭМ в горизонтальном продольном сечении. В этом сечении смещение пучка особенно велико по причине большого угла падения пучка (45°) на светоделительные пластины. При этом смещение лазерного пучка в горизонтальном и вертикальном сечениях становятся равновеликими. Основным недостатком схемы с двухсторонним расположением ПЗС - очень трудоемкая процедура юстировки элементов модуля, то есть процесс высокоточного выставления его элементов относительно друг друга по линейным и угловым координатам.

Преимуществом схемы с односторонним расположением ПЗС является более простой процесс юстировки, недостатком - значительное плоскопараллельное смещение лазерного пучка в горизонтальном продольном сечении модуля.

Два основных конструктивных параметра ТОЭМ определяют его позиционную чувствительность (рис.3). Параметр D характеризуется величиной сдвига ПЗС относительно друг друга вдоль продольной оси модуля, а параметр L - величиной смещения ПЗС в поперечном направлении относительно продольной оси модуля. Для повышения позиционной чувствительности модуля необходимо увеличивать параметр D и уменьшать параметр L. Неоснованное увеличение параметра D, определяющего длину модуля, снизит жесткость конструкции. Минимальное значение параметра L, определяющего ширину модуля, связано с величиной диапазона измерения, зависящего от формата матричного ПЗС.

Позиционно-передаточная функция P, описывающая зависимость углового положения лазерного пучка (переменные α_{ij} и β_{ij}) от положения световых пятен в плоскостях ПЗС (переменные x_{ij} и y_{ij}), состоит из двух полиномов шестого порядка. Каждый из полиномов описывает угловое положение пучка соответственно в горизонтальном продольном P^H и вертикальном продольном сечениях P^V модуля.

$$P = (P^H, P^V)(x_{ij}, y_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}, L, D, \dots).$$

Коэффициенты полиномов зависят от параметров модуля. Индекс $i=1,2$ - обозначает номер измеряющего блока в модуле по пучку, а $j=0,1,2,\dots$ - номер измерений. Нулевое измерение входит как параметр, относительно которого будут происходить вычисления смещений.

Положение световых пятен в плоскостях ПЗС оценивается с помощью алгоритмов амплитудного интерполирования. При вычислении корней полиномиальных уравнений применяются известные алгоритмы решения уравнений высоких порядков. Значение одного из действительных корней каждого уравнения является оценкой углового положения лазерного пучка соответственно в горизонтальном и вертикальном сечениях модуля. Оценка углового положения лазерного пучка используется для коррекции оценки поперечного положения пучка и для полной компенсации его плоскопараллельного смещения на выходе из модуля. В качестве оценки поперечного положения лазерного пучка используется оценка положения светового пятна на первой ПЗС модуля. Эта оценка значительно зависит от углового положения лазерного пучка и нуждается в корректировке для исключения влияния на нее угловых смещений.

Основные погрешности измерения углового и поперечного положения лазерного пучка зависят прежде всего от:

- внутреннего шума матричного ПЗС;
- пространственной нестабильности лазерного пучка;
- неравномерности фоточувствительности и плотности темновых токов по поверхности ПЗС;

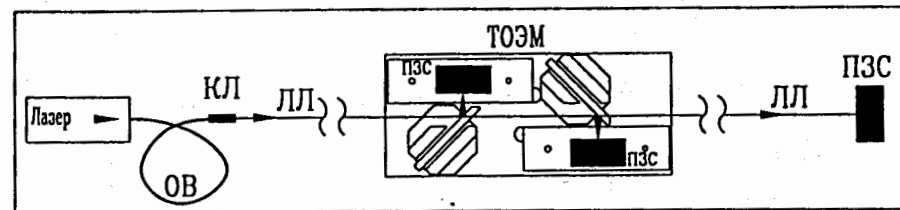


Рис. 4: Схема измерительного стенда для прототипа ТОЭМ. ОВ - оптическое волокно, КЛ - оптический коллиматор, ЛЛ - лазерный луч

- интенсивности паразитных интерференционных явлений;
- неточности юстировки оптических и механических элементов ТОЭМ.

Создание технологического прототипа. На основе предложенного метода и предварительной разработки модуля был изготовлен технологический прототип (рис.1).

Прототип ТОЭМ содержит две ПЗС-камеры (MINTRON, MTV-241) на основе 1/3 дюймовых матричных ПЗС. Формат ПЗС - 500 пикселей в каждой из 582 строк, размер пикселя - 0.0098x0.0063 мм². Для тестирования прототипа модуля использовался полупроводниковый лазер, излучающий на длине волны 635 нм. Полупроводниковый лазер сочленен с одномодовым оптическим волокном и оптической коллимирующей насадкой. Насадка формирует коллимированный лазерный пучок с максимальным диаметром 1.6 мм на расстоянии 3 м. Для ввода изображений световых пятен в компьютер использовалась специализированная плата, оцифровывающая изображения в формате 768 отсчетов вдоль каждой строки ПЗС.

Специальная технология юстировки использовалась для высокоточной ориентации поверхностей ПЗС и светоделительных пластин относительно друг друга в процессе сборки прототипа модуля. С помощью измерительного микроскопа контролировалось линейное положение ПЗС и пластин. Микроскоп содержал перемещающийся столик с устройством цифрового отсчета. Цена деления - 0.1 микрон. Угловое положение светоделительных пластин контролировалось с помощью оптического автоколлиматора. Цена деления секундной шкалы автоколлиматора - 0.2 угловой секунды.

Для тестирования прототипа ТОЭМ использовалась трехточечная измерительная схема (рис.4). В первой точке размещалась оптическая коллимирующая насадка. Дополнительная контролирующая ПЗС-камера была расположена на расстоянии 3 м от насадки в третьей точке. Модуль занимал

положение между ними во второй точке на расстоянии 650 мм от коллимирующей оптической насадки.

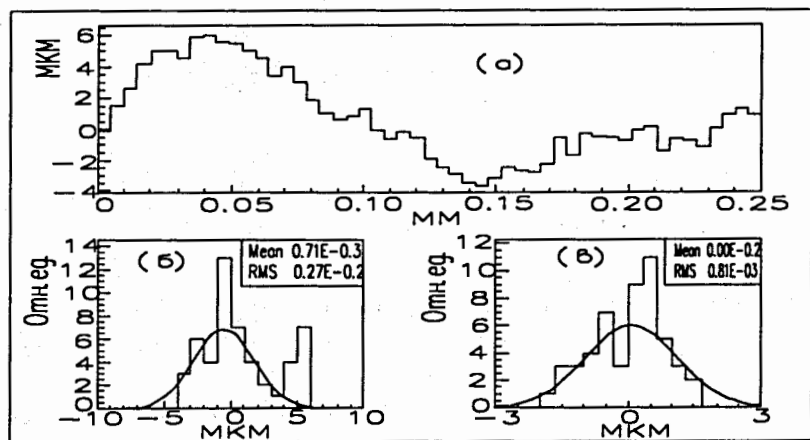


Рис. 5: Результаты тестирования прототипа ТОЭМ: а) отклонения измерений поперечного положения модуля от ожидаемого, получаемые при перемещении модуля в поперечном направлении относительно лазерного пучка с шагом 5 микрон; б) погрешность измерений без вычета систематических ошибок; в) погрешность измерений с вычетом систематических ошибок

В процессе тестирования прототип ТОЭМ смещался в поперечном направлении относительно лазерного пучка с шагом 5 микрон в диапазоне 0.25 мм с помощью перемещающегося столика, имеющего цену деления 1 микрон. При оценивании положения световых пятен в плоскостях ПЗС использовался каждый третий отсчет оцифрованного изображения по каждой второй строке. Окончательная оценка положения пятен вычислялась на основе усреднения оценок по 4 телевизионным кадрам. При решении уравнений позиционно-передаточной функции усреднение не применялось. Все измерения имели относительный характер, то есть производились относительно начального положения модуля.

На рис.5а показаны отклонения измерений поперечного положения ТОЭМ от ожидаемого, получаемые при перемещении модуля в поперечном направлении относительно лазерного пучка. Систематические ошибки измерений накладываются на результат каждого измерения и нарастают при постепенном перемещении модуля. Без вычета этих ошибок среднее квадратическое отклонение не превышает 3 микрон (рис.5б). Можно формально исключить

ошибки нарастания, если рассматривать разность между двумя последовательными измерениями и отклонение этой разности от величины шага перемещения (5 микрон). В этом случае среднее квадратическое отклонение величины измерения от заданного шага снижается до 1 микрона (рис.5в).

Направление дальнейших разработок. Как показало предварительное тестирование, геометрический лучевой метод, положенный в основу измерительной концепции ТОЭМ, может обеспечить эффективное решение задачи многоточечного транспарентного мониторинга поперечных деформаций объектов. Дальнейшие работы будут идти по следующим направлениям:

- разработка технических мер, уменьшающих влияние паразитных интерференционных явлений на общую погрешность измерения лазерного пучка;
- разработка модифицированного ТОЭМ с расширенным диапазоном измерения;
- совершенствование технологии юстировки модуля.

Причиной возникновения интерференционных явлений является процесс взаимодействия лазерных пучков, отраженных от передней и задней поверхностей светоделительных пластин. Эти паразитные явления значительно искажают распределения интенсивности излучения в световых пятнах, что в итоге увеличивает погрешность измерений. Уменьшение интенсивности интерференционных явлений возможно за счет применения специальных оптических покрытий, нанесенных на задние поверхности светоделительных пластин. Снижение влияния этих явлений на результаты измерений также можно реализовать с помощью дополнительной цифровой обработки изображений световых пятен, основанной, например, на алгоритмах медианной фильтрации.

Диапазон измерений ТОЭМ определяется форматом ПЗС и диаметром лазерного пучка. Расширение диапазона измерений без увеличения формата ПЗС возможно за счет построения модифицированного ТОЭМ на основе комбинации двух геометрических методов: лучевого и метода построения изображений оптических марок. Модифицированный модуль будет использовать те же структурные оптические схемы. Введение в состав модуля светорассеивающих фильтров и репродукционных объективов позволит расширить диапазон измерений без использования крупноформатных ПЗС, имеющих высокую стоимость.

Работы, осуществляемые в рамках перечисленных исследований, приведут к созданию недорогого унифицированного ТОЭМ, способного решать широкий круг измерительных задач.

Список литературы

- [1] H.Dekker et al.
The Rasnik/CCD 3dimensional alignment system.
The 3-rd international workshop on accelerator alignment. Sep.1993.
NIKHEF, Amsterdam, Netherlands;
http://www.nikhef.nl/pub/departments/et/ccd_rasnik/ccd_rasnik.html
- [2] W.Blum et al. *Development of an optical alignment monitoring system for the ATLAS muon spectrometer*
ATLAS Internal Note MUON-No-047, 1994.
http://pcatlas4.mppmu.mpg.de/mdt/almy_1.html
- [3] M.Dikken et al.
The RASNIK in-plane alignment system.
ATLAS Internal Note MUON-No-184, 1997.
- [4] H.Kroha, A.Ostapchuk
A new alignment scheme for the ATLAS muon spectrometer.
ATLAS Internal Note MUON-No-070, 1995.
- [5] ATLAS Muon spectrometer technical design report.
CERN/LHCC/97-22, ATLAS TDR 10, 1997. p.223.
- [6] CMS technical proposal, CERN/LHCC 94-38; 1994, p.41.