

Физика

УДК 535.311; 50.53

А. М. ГРИГОРЯН, А. А. МАКАРЯН, С. Ц. НЕРСИСЯН, Ю. С. ЧИЛИНГАРЯН,
В. Л. ЭЛБАКЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ С ТЕМПЕРАТУРНЫМ ГРАДИЕНТОМ С ПОМОЩЬЮ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

В работе описана автоматизированная экспериментальная установка, моделирующая работу оптической системы регистрации малых деформаций мюонных датчиков на спектрометре в ЦЕРНе с учетом прохождения лазерного луча через воздушную среду с температурным градиентом. Проведено сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

1. Введение. Задача измерения малых перемещений ($\sim 1\text{мкм}$) на относительно больших расстояниях часто возникает при проведении физических экспериментов. В частности, на мюонном спектрометре в ЦЕРНе (эксперименты ATLAS и ALICE) [1] требуется мониторинг возможных деформаций датчиков высокоэнергетических мюонных треков для определения истинных координат мюонов. Для этой цели используется оптическая система, данные, полученные от которой, содержат погрешность зачастую порядка измеряемых величин, вызванную отклонением самого пучка при прохождении через воздушную среду с температурным градиентом.

Цель настоящей работы – создание автоматизированной системы регистрации малых перемещений с учетом прохождения лазерного пучка через воздушную среду с температурным градиентом и сравнение полученных результатов с расчетными.

2. Описание экспериментальной установки. Реальная оптическая система регистрации деформаций механических смещений мюонных датчиков, установленная на мюонном спектрометре, состоит из источников оптического излучения и последовательно расположенных координатных датчиков [1].

Для моделирования работы этой оптической системы была создана экспериментальная установка (рис. 1).

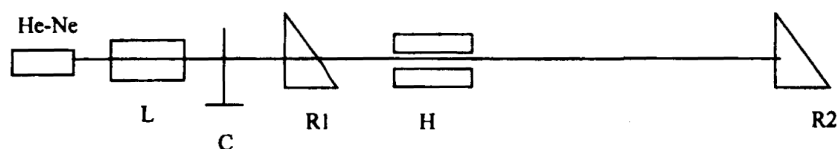


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Лазерный пучок с He-Ne лазера после прохождения телескопа (L) и полевой диафрагмы (C) поступает на первый координатный датчик (R1). После этого луч проходит через систему создания температурного градиента (H) и попадает на второй координатный датчик (R2). Смещение лазерного луча в воздухе под влиянием температурного градиента определяется как разность отклонений по соответствующим осям X и Y первого и второго датчиков. В работе были использованы полупрозрачные датчики позиционного контроля нескольких объектов выравнивания RELMY (Reflected Light Monitor Of Yerevan Physics Institute) [2] (рис. 2).

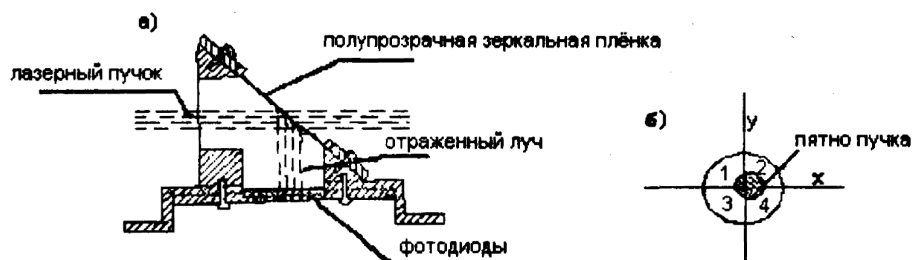


Рис. 2. Полупрозрачный датчик позиционного контроля RELMY: а) схема датчика, б) расположение светового пучка на фотоприемниках.

RELMY представляет из себя алюминиевую призму с натянутой полупрозрачной зеркальной пленкой (а). Часть светового пучка отражается от зеркала и падает на фотодетектор, активная часть которого представляет собой 4 идентичных кремниевых фотодиода, собранных в круглую фотобатарею с диаметром 20мм (б). Напряжение V_i от каждого сектора пропорционально интенсивности света, падающего на этот сектор. Сигналы после усиления оцифровываются и передаются в компьютер для анализа. Напряжения, пропорциональные смещению пучка от оптической оси датчика соответственно в направлениях X и Y (оптический пучок проходит параллельно оси Z), определяются из соотношений:

$$V_x = V_2 + V_4 - V_1 - V_3, \quad V_y = V_1 + V_2 - V_3 - V_4. \quad (1)$$

Для исключения влияния флуктуации интенсивности лазерного пучка

на точность расчетов использовалось нормирование сигналов:

$$\|V_i\| = V_i / \sum_{i=1}^4 V_i. \quad (2)$$

Блок создания температурного градиента представляет из себя расположенные горизонтально один над другим холодильник и нагреватель. Температурный градиент в вертикальном и горизонтальном направлениях определяется при соответствующем сканировании хромель-алюмелевой термопары в области прохождения лазерного пучка.

Измерительная часть экспериментальной установки выполнена на оборудовании в стандарте «САМАС». Для измерения напряжения фотодатчиков был использован 16-входовой релейный мультиплексор, с выхода которого измеряемый сигнал поступает на 14-разрядный АЦП. Точность измерения составляет 1–2 мВ, что при характерных напряжениях на фотодиодах дает относительную ошибку порядка 1%. Разброс коэффициентов усиления предварительных усилителей фотоприемников (порядка 1%) в расчетах не учитывался.

Программы сбора и обработки экспериментальных данных были написаны в среде «LabView». Программа сбора данных производит поочередное сканирование восьми фотоприемников с двух датчиков, а также значения термо-ЭДС термопары. Поскольку мультиплексор построен на механических реле, программа обеспечивает временную задержку после переключения на каждый следующий канал, исключая тем самым влияние дребезга контактов реле на результаты измерений. В программе предусмотрена цифровая фильтрация измеряемого сигнала, исключающая случайные ошибки, вызванные нестабильностью электронных трактов измерительной системы. Программа обеспечивает сбор и запись данных в файлы на жесткий диск для их последующей статистической обработки. При обработке полученных данных используются усреднение измеряемых сигналов в заданных интервалах времени и сглаживание экспериментальных зависимостей с помощью полиномов.

3. Теория и модели расчетов. Предполагается, что дисперсия обусловлена температурными неоднородностями воздуха. Тогда для коэффициента преломления $n(\lambda, T)$ можно воспользоваться эмпирической формулой [3, 4]

$$n(\lambda, T) = 1 + 10^{-4} \left[\frac{77,6p}{T} + \frac{5,84 \cdot 10^{11} p}{T\lambda^2} - 0,06p_{ws} \right], \quad (3)$$

где λ – длина волны в метрах, p – атмосферное давление, p_{ws} – парциальное давление водяных паров в среде ($p_{ws} \approx 1500 - 2000 \text{ Па}$). Для оптического диапазона волн вклад последнего члена очень незначительный и им можно пренебречь. В этом случае для индекса рефракции имеем мультипликативную формулу

$$N_\lambda(T) = \frac{p}{T} \left(77,6 + \frac{5,84 \cdot 10^{11}}{\lambda^2} \right) \equiv f(T)\varphi(\lambda). \quad (4)$$

Нахождение смещения луча при известном коэффициенте преломле-

ния $n(\lambda, T)$ в приближении геометрической оптики, в общем случае, сводится к решению уравнения эйконала. Однако его можно достаточно упростить рассмотрением модельных задач [5].

3.1. Модель вертикальной однородной полосы. Подогретую область воздуха рассмотрим в виде вертикальной полосы шириной d , границами которой являются параллельные плоскости, а температура T внутри этой полосы постоянна и превосходит температуру окружающей среды T_0 (рис. 3).

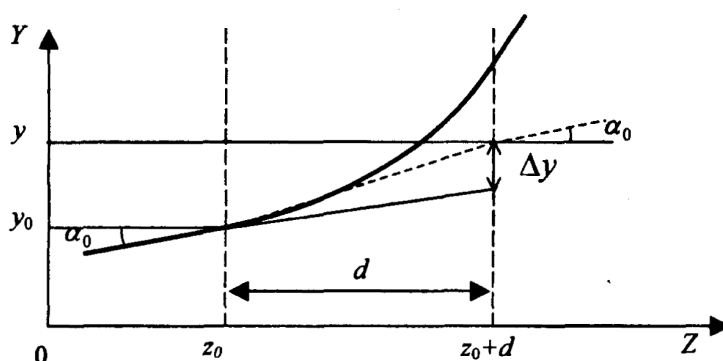


Рис. 3. Прохождение лазерного луча через температурный градиент.

Первичный луч, падающий под углом α_0 на точку с координатами (y_0, z_0) , в области $[z_0, z_0 + d]$ распространяется прямолинейно (пунктирная линия на рис. 3) и покидает эту область под тем же углом α_0 в точке $(y, z_0 + d)$ и с некоторым отклонением Δy от падающего луча:

$$\Delta y(\lambda) = d \left(\frac{n_0 \sin \alpha_0}{\sqrt{n^2(\lambda) - n_0^2 \sin^2 \alpha_0}} - \operatorname{tg} \alpha_0 \right), \quad (5)$$

где $n_0 \equiv n(\lambda, T_0)$.

3.2. Модель горизонтального градиента температуры. Пусть начало системы координат помещено в точку падения луча и в интервале $[0, d]$ находится подогретый воздух с постоянным градиентом температуры g_z по направлению OZ . Разбивая $[0, d]$ на однородные слои толщиной dz с постоянным коэффициентом преломления n_i , для области $[z_i, z_i + dz]$, имеем

$$\begin{cases} n_0 \sin \alpha_0 = n_i(z_i, y_i) \sin \beta_i(z_i, y_i), \\ dz = \operatorname{ctg} \beta dy. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) позволяет определять как направление выхода светового луча, так и отклонение от направления падения. Ограничиваясь линейным

приближением, для $n(T, \lambda)$ получим:

$$n(T(y), \lambda) = \bar{n} + \frac{\partial n}{\partial T} \bigg|_{(0,0)} \cdot \frac{dT}{dy} = \bar{n} - \frac{f(0,0)\varphi_\lambda g_y y}{T} - \frac{f(0,0)\varphi_\lambda g_z z}{T}, \quad (7)$$

где $\bar{n} = 1 + f[T(0,0)]\varphi(\lambda)$ – коэффициент преломления первой полосы шириной dz . Для модели горизонтального градиента температуры в выражение (7) надо подставить $g_y = 0$. Тогда можно определить «траекторию» луча на плоскости YOZ :

$$y = \frac{c_0 T^2 10^4}{P_0 \varphi_\lambda g_z} \left[\operatorname{arcch} \frac{\bar{n}}{c_0} - \operatorname{arcch} \frac{\bar{n} - \frac{10^{-4} P_0 \varphi_\lambda g_z z}{T^2}}{c_0} \right], \quad (8)$$

где $c_0 \equiv n_0 \sin \alpha_0$, $P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ – нормальное атмосферное давление.

3.3. Модель вертикального градиента температуры. В этой модели рассматривается случай, когда температурное поле равномерно изменяется по направлению OY . Тогда горизонтальный слой воздуха в полосе $[y_i, y_i + dy]$ имеет постоянный коэффициент преломления n_i . В этом случае система (6) приобретает следующий вид:

$$\begin{cases} n_0 \cos \alpha_0 = n_i(z_i, y_i) \sin \beta_i(z_i, y_i), \\ dz = \operatorname{ctg} \beta dy. \end{cases} \quad (6^*)$$

Для получения коэффициента преломления для этой модели в выражении (7) надо учесть, что градиент по направлению OZ равен нулю и

$$n(y, \lambda) = \bar{n} - \frac{f(0,0)\varphi_\lambda g_y y}{T}. \quad (7^*)$$

Решение уравнений (6*) и (7*) имеет вид, похожий на выражение (8), с переставленными координатами z и y . А для численных расчетов можно пользоваться более простым выражением, полученным из этого решения при сохранении первых двух слагаемых в фурье-разложениях функций арксинусов:

$$z = \frac{y}{\left(\frac{\bar{n}^2}{c^2} - 1\right)} + \frac{\frac{\bar{n}}{c}}{2\left(\frac{\bar{n}^2}{c^2} - 1\right)^{3/2}} \cdot \frac{P_0 10^{-4} \varphi_\lambda g_y}{c T^2} y^2, \quad (8^*)$$

где $c \equiv n_0 \cos \alpha_0$.

4. Обсуждение результатов. На рис. 4,а приведены изменения сигналов с двух секторов датчика R2 во времени под воздействием градиента температуры без нормировки. Результаты, полученные после нормировки для этих же сигналов, приведены на рис. 4,б. Из сравнения этих графиков следует, что кажущиеся колебания лазерного луча спровоцированы не его

пространственным смещением, а изменением его интенсивности. Зависимости смещения «центра тяжести» лазерного луча от времени, рассчитанные по формулам (1) и (2) по осям X и Y , приведены на рис. 4, в. Начальный горизонтальный участок (~45 мин) соответствует времени до включения системы создания температурного градиента. После включения этой системы одновременно с возрастанием смещения луча по оси Y возрастает шумовая дорожка: с ростом градиента температуры пропорционально возрастает ширина дорожки как по оси Y , так и по оси X . Увеличение шумов по обеим осям, очевидно, связано с возникновением турбулентных потоков воздуха на вертикальных границах системы нагреватель-холодильник.

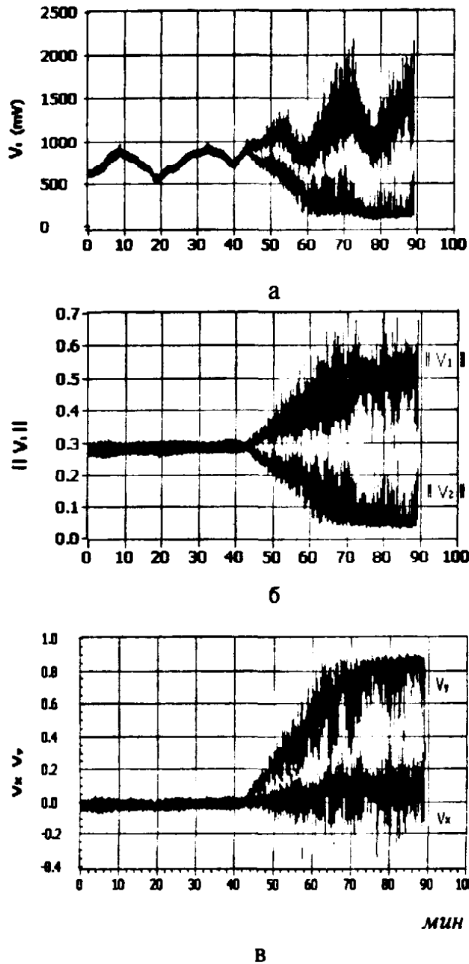


Рис. 4. Сигналы, полученные от датчика R2: а) без нормировки. б) после нормировки, в) координаты «центра тяжести» пучка.

однако дает возможность более наглядно демонстрировать эффект.

Тепловой градиент, град/см	Эксперимент, мкм	Теория, мкм
8	58±5	68
14	85±5	97

Для градиентов же, близких к условиям ATLAS, получены экспериментальные смещения лазерного луча и рассчитаны его теоретические зна-

Влияние турбулентности из-за определенных трудностей в теоретических расчетах не учитывалось, а экспериментальные данные подвергались статистической обработке. Ограничение смещения по оси Y , наблюдаемое на графике для больших градиентов, связано с тем, что отклонение луча больше диапазона измеряемых смещений датчика.

Следует подчеркнуть, что приведенные зависимости (рис. 4) получены при очень больших градиентах температуры (порядка нескольких десятков град/см). Это намного больше, чем в условиях реального эксперимента ATLAS,

Следует подчеркнуть, что приведенные зависимости (рис. 4) получены при очень больших градиентах температуры (порядка нескольких десятков град/см). Это намного больше, чем в условиях реального эксперимента ATLAS,

чения. Результаты приведены в таблице. График смещения при градиенте 8 град/см приведен на рис. 5.

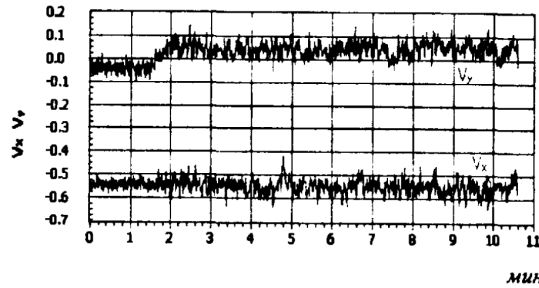


Рис. 5. Зависимости смещения «центра тяжести» лазерного луча от времени.

Экспериментальные данные наиболее близки к расчетным значениям, полученным при использовании модели вертикального градиента температуры.

Кафедра оптики

Поступила 10.02.2004

ЛИТЕРАТУРА

1. ALICE Experiment, CERN/LHCC 95-71, LHCC/P3, 15 December, 1995.
2. Danielyan V.D., Margaryan V.H. – ALICE/99-27, Internal Note/DIM, May 28, 1999.
3. Edlen B. – Journal of Optical Society of America, v. 43, Nov., 1953, p. 339.
4. Гурвич А.С. и др. Лазерное излучение в турбулентной атмосфере. М.: Наука, 1976.
5. Асатрян Р.С., Караян Г.С., Макарян А.А., Чилингарян Ю.С. – ЖТФ, 2002, т. 72, вып. 10, с. 103.

Ա. Մ. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա. Հ. ՄԱԿԱՐՅԱՆ, Ս. Յ. ՆԵՐՍԻՍՅԱՆ,
Յու. Ս. ՉԻԼԻՆԳԱՐՅԱՆ, Վ. Լ. ԷԼԲԱԿՅԱՆ

ՋԵՐՄԱՆՄՏԻՃԱՆԱՅԻՆ ԳՐԱԴԻԵՆՏ ՈՒՆԵՑՈՂ ՕԴԱՅԻՆ
ՄԻՋԱՎԱՅՐՈՎ ԱՆՑՆԵԼԻՍ ԼԱԶԵՐԱՅԻՆ ՃԱՌԱԳԱՅԹԻ ՇԵՂՄԱՆ
ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ ՄՈՆԻՏՈՐԻՆԳԻ ԱՎՏՈՄԱՏԱՅՎԱԾ
ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՕԳՆՈՒԹՅԱՄԲ

Ամփոփում

Աշխատանքում նկարագրված է ավտոմատացված փորձարարական համակարգ, որը մոդելավորում է ЦЕРН-ում գտնվող մյուոնային սպեկտրոմետրի վրա տեղադրված օպտիկական համակարգը՝ հաշվի առնելով

լազերային փնջի տարածումը ջերմաստիճանային գրադիենտ ունեցող
օդային միջավայրով: Կատարված է ստացված փորձարարական տվյալների
և տեսական հաշվարկների համեմատություն:

A. M. GRIGORYAN, A. H. MAKARYAN, S. C. NERSISYAN,
U. S. CHILINGARYAN, V. L. ELBAKYAN

LASER BEAM REJECTION INVESTIGATION PASSING THROUGH AIR
WITH TEMPERATURE GRADIENT USING THE MONITORING
AUTOMATED SYSTEM

Summary

In this work was describe the automated experimental assembly, which
simulate the optical system of muon registration detectors for small deformations
in CERN spectrometer experiment with calculation of laser beam passing through a
thermal gradient in air. Comparison of experimental results with theory is carried
out.