

P13-2009-186

В. Ю. Батусов, Ю. А. Будагов, М. В. Ляблин*, А. Н. Сисакян

**ОБ ЭФФЕКТЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ
ФЛУКТУАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ ОСИ ЛАЗЕРНОГО
ЛУЧА В ТРУБЕ С АТМОСФЕРНЫМ ВОЗДУХОМ**

Направлено в журнал «Письма в ЭЧАЯ»

*E-mail: lyablin@nusun.jinr.ru

Батусов В. Ю. и др.

P13-2009-186

Об эффекте ослабления пространственных флуктуационных колебаний оси лазерного луча в трубе с атмосферным воздухом

Измерены амплитуды σ (среднеквадратичные отклонения) флуктуационных пространственных колебаний оси лазерного луча при его распространении в атмосферном воздухе σ_b , а также и в трубе σ_t с атмосферным воздухом с оптически прозрачными заглушками на концах. Обнаружен эффект уменьшения флуктуационных колебаний луча в трубе: отношение σ_t/σ_b значительно снижается с пройденным расстоянием. В частности, $\sigma_t/\sigma_b = 8 \cdot 10^{-3}$ на длине 68 м.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2009

Batusov V. Yu. et al.

P13-2009-186

On the Effect of Laser Beam Axis Space Fluctuation Attenuation when Beam Propagation in Atmospheric Air Filled Tube

The rms values of the laser ray space fluctuation when propagating in an atmospheric air σ_a and inside an atmospheric air filled tube covered at its ends by transparent stoppers σ_t were measured. An effect of fluctuation decrease inside a tube was found: the σ_t/σ_a ratio significantly falls down with a beam passed distance. In particular $\sigma_t/\sigma_a = 8 \cdot 10^{-3}$ is at 68 m distance.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2009

ВВЕДЕНИЕ

При сооружении и использовании крупномасштабных исследовательских установок тэвного диапазона (ускорители, коллайдеры, детекторы) необходима высокая точность как в относительном «выстраивании» основных структурных элементов, так и в их юстировке в on-line-режиме при последующей эксплуатации. Для прецизионного метрологического обеспечения этих задач необходима стабильная протяженная координатная ось, относительно которой возможны все требуемые измерения и юстировки. В качестве такой оси может быть использован луч лазера.

При распространении лазерного луча в воздушной среде неопределенность $\sigma(L)$ в пространственной локализации оси лазерного луча растет с длиной его распространения L . Это резко ограничивает область его метрологического применения.

Принципиальная возможность существенного снижения $\sigma(L)$ предложена в работе [1]. В ней сообщается об обнаруженном эффекте значительного уменьшения $\sigma(L)$: экспериментально установлено, что при распространении лазерного луча в воздухе внутри полый трубы длиной 10 м величина $\sigma_T(L)$ снизилась на порядок по сравнению с $\sigma_B(L)$ в случае распространения в воздухе без трубы.

В [2] авторы указали на возможную связь наблюдаемого эффекта с установленным фактом существования в трубе стоячей звуковой волны, индуцированной широкополосным звуковым шумом окружающей среды.*

В данной работе исследования обнаруженного явления продолжены на длинах до 68 м. Полученные данные подтвердили количественно результат [1] для 10 м и показали стабильный рост открытого эффекта: увеличение отношения $\sigma_B(L)/\sigma_T(L)$ с длиной L . Как представляется авторам, это явление может составить принципиальную новую физическую основу для создания технических средств прецизионной лазерной метрологии больших расстояний.

* Авторы планируют дополнительные исследования с целью более доказательной проверки предположения о влиянии стоячих звуковых волн на стабилизацию положения лазерного луча в закрытой трубе.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

В измерениях использовалась установка, схема которой показана на рис. 1.

По прохождении расстояния L луч лазера совмещался с центром дуантного фотоприемника ДФП [3]. Сигналы 1 и 2 с ДФП поступали в два канала 24-битного АЦП и после оцифровки записывались в персональный компьютер ПК. Эксперимент выполнялся в помещении с принудительной вентиляцией. Для увеличения длины распространения лазерного луча использовалась прямоугольная призма, как показано на рис. 2

После прохождения призмы луч распространялся по пути, не совпадающему с первоначальным.

Вследствие дифракционной расходимости лазерного луча диаметр пятна в описываемой установке, начиная с длины $L = 20$ м, превосходил размер ДФП. Это снижало чувствительность ДФП к смещению луча и вело к уменьшению точности последующих координатных измерений по определению $\sigma(L)$. Данный недостаток устранен при помощи телескопической насадки (рис. 3), которая одновременно увеличивала начальный диаметр лазерного луча и эффективно коллимировала его при измерениях на длинах $L > 20$ м.

В этой схеме луч лазера, пройдя через коллиматор, фокусировался на половинной длине и после отражения в призме расширялся до первоначального диаметра $D = 1$ см.

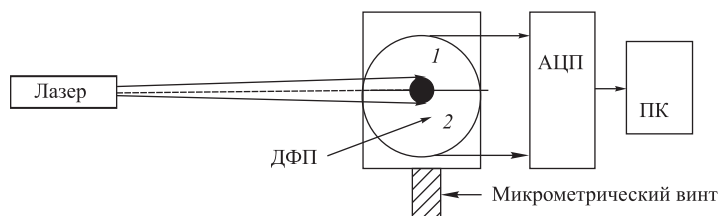


Рис. 1. Принципиальная схема установки для измерения неопределенности $\sigma(L)$ в пространственной локализации лазерного луча

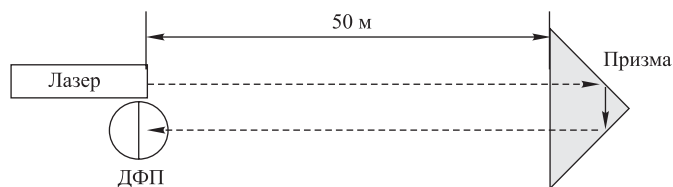


Рис. 2. Схема проведения эксперимента на длинах более 50 м в воздушной среде

Поскольку диаметр луча изменялся с длиной, то при каждом измерении проводились калибровки: ДФП смещался перпендикулярно оси луча при помощи прецизионного микрометрического позиционера на известное расстояние (точность позиционирования $\pm 0,3$ мкм).

Калибровочное смещение луча производилось в следующем порядке. Позиционер с закрепленным на нем фотоприемным устройством устанавливался грубо при помощи элементов крепежа так, чтобы центр ДФП визуально совместился с лазерным лучом. При этом дуантный фотоприемник располагался в ориентации «вверх-вниз» (рис. 1).

Затем при помощи АЦП производилось предварительное измерение сигнала. На основании этих данных определялось положение пятна лазерного луча относительно линии раздела фотоприемников. При помощи позиционера линия раздела ДФП совмещалась с центром лазерного луча. При этом величины сигналов, регистрируемых АЦП, выравнивались ($U_1 \approx U_2$). Далее осуществлялась непрерывная запись сигналов U_1, U_2 на ПК. Во время измерения проводилось кратковременное тестовое смещение (калибровка) микрометрическим винтом дуантного фотоприемника относительно оси лазерного луча. Типичный вид записанного сигнала U_1-U_2 с калибровочным смещением ДФП на расстояние $\Delta = 50$ мкм показан на рис. 4. Сигнал записывался в текстовый файл для последующей обработки.

При условии $\Delta \ll D_l$, где D_l — диаметр лазерного луча в точке измерения, сравнение величины $\Delta = 50$ мкм с величиной разбаланса $(U_1 - U_2)_A - (U_1 - U_2)_B$ позволило перевести показания ДФП из мВ в мкм.

Гистограммы на рис. 5 соответствуют участкам А и В, спроецированным на вертикальную ось графика (рис. 4). Среднеквадратичные отклонения $\sigma_A = 9,5$ мВ и $\sigma_B = 9,4$ мВ близки, что говорит о стабильном положении фотоприемного устройства и отсутствии его влияния на процесс измерения. Вычисленные по результатам калибровки на рис. 4 значения σ на длине 34 м в закрытой трубе составили $\sigma_A = 0,83$ мкм и $\sigma_B = 0,82$ мкм.

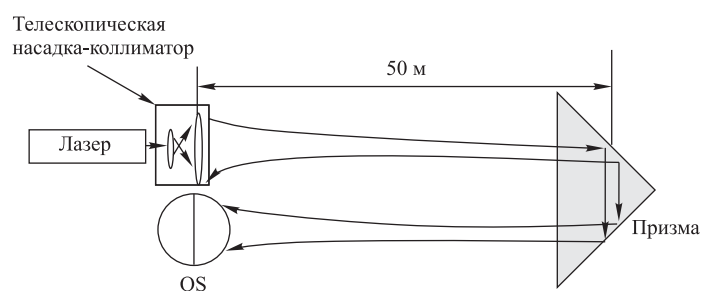


Рис. 3. Коллимирование лазерного луча при проведении эксперимента на длинах более 50 м

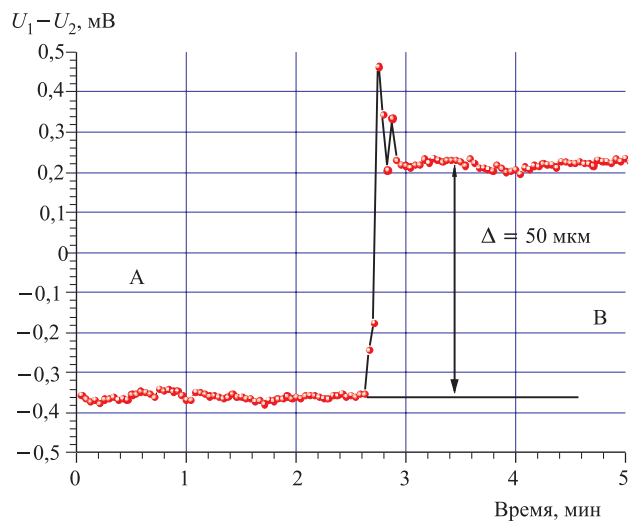


Рис. 4. Запись «положения» лазерного луча на дуантном фотоприемном устройстве по прохождении расстояния 34 м в закрытой оптическими стеклами трубе; калибровочное смещение $\Delta = 50 \text{ мкм}$

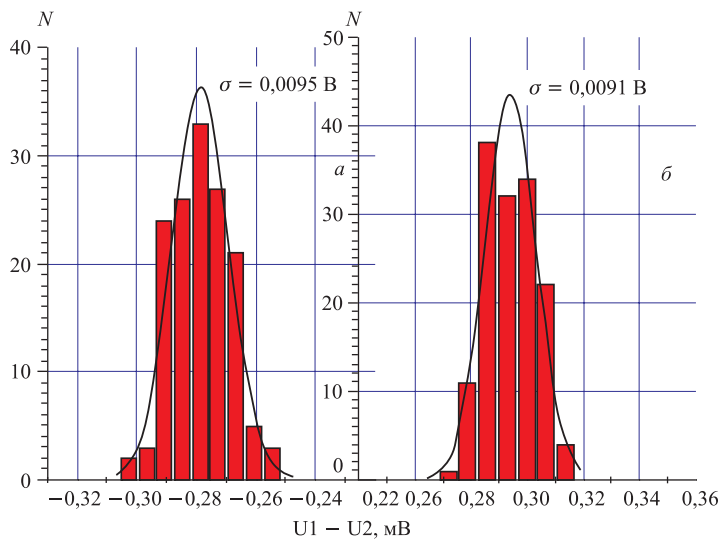


Рис. 5. Гистограммы соответствуют проекциям линий А (а) и В (б) на вертикальную ось рис. 4

Подобные измерения и калибровки на различных длинах распространения лазерного луча позволили определить величины $\sigma(L)$.

Использовался один тип лазера — Diode Laser VLM2: мощность лазера $P = 1$ мВт; длина волны излучения $\lambda = 0,65$ мкм.

Во время измерений лазер закреплялся в толстой латунной трубе для уменьшения влияния небольших колебаний температуры воздуха. Труба фиксировалась на подставке на высоте 2 м от пола. Дуантный фотоприемник закреплялся на этом же уровне.

Были проведены следующие серии измерений поведения лазерного луча в воздушной среде: а) без коллиматора, без трубы, $L = 0-50$ м; б) с коллиматором, без трубы, $L = 0-100$ м; в) с коллиматором, в закрытой трубе, $L = 0-68$ м.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения без коллиматора, без трубы, $L = 0-50$ м (рис. 2). Выходной диаметр лазерного луча составлял 5 мм, угол расходимости по паспортным данным — $\theta \leq 5 \cdot 10^{-4}$ рад. В этом случае по условиям эксперимента (диаметр луча не должен значительно превышать диаметр ДФП) лазерный луч возможно было использовать на расстоянии не более 50 м.

Величины $\sigma(L)$ измерены на длинах 0–34 м со средним шагом 2,5 м и дополнительно на длине 50 м. Результаты обработки представлены на рис. 6. Продолжительность одного измерения составляла $t = 2,5$ с.

Значение $\sigma(10$ м) в воздушной среде без трубы практически совпадает с величиной, полученной ранее в [2]; это рассматривается нами как подтверждение стабильности параметров используемого оборудования и воспроизводимости результатов процедуры обработки данных.

Измерения с коллиматором, без трубы, $L = 0-100$ м (рис. 3). Основной задачей этой серии измерений являлось определение $\sigma(L)$ при больших длинах, чем в работе [1], ограниченной данными при $L \leq 9$ м.

Результаты измерений приведены на рис. 7

Добавление коллиматора сняло ограничение, обусловленное геометрией установки и длиной используемого помещения, и позволило выполнить измерения на больших длинах. Сравнение рис. 6 и 7 показывает: использование коллиматора не изменило качественно и количественно зависимость σ от L . Теперь данные на рис. 7, полученные без трубы, необходимо сравнить с результатами измерений с трубой.

Измерения с коллиматором, луч в закрытой трубе, $L = 0-68$ м (рис. 3). Главной задачей этих измерений, составляющих основную цель данной работы, является экспериментальное подтверждение обнаруженного в [2] эф-

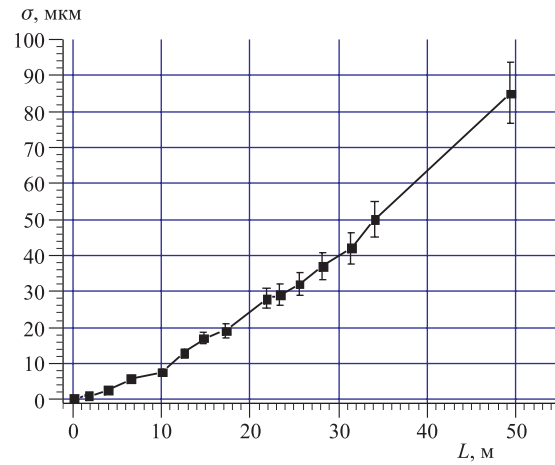


Рис. 6. Неопределенность $\sigma(L)$ в пространственном положении оси лазерного луча в зависимости от расстояния, пройденного лучом в воздушной среде; коллиматор не использовался

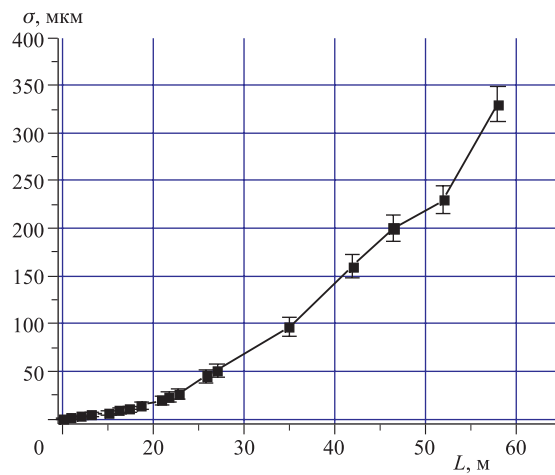


Рис. 7. Неопределенность $\sigma(L)$ в пространственном положении оси лазерного луча в зависимости от расстояния, пройденного лучом в воздушной среде; использованы телескопическая насадка-коллиматор и поворотная призма

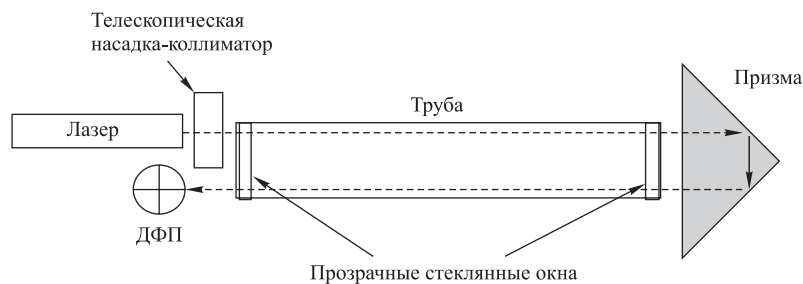


Рис. 8. Схема эксперимента с использованием закрытой трубы

факта подавления флуктуационных колебаний лазерного пучка на больших длинах.

Напомним, что в работе [1] измерения $\sigma(L)$ для лазерного луча в воздухе при $L \leq 9$ м обнаружили, что использование трубы с открытыми концами снижает значение σ .

Отличие в проведении данного эксперимента состояло в том, что на концах трубы использовались встроенные стеклянные окна (рис. 8).

Труба длиной $L = 34$ м размещалась на «точечных» опорах с шагом 2–3 м. Использование поворотной призмы, как и в эксперименте на воздухе,

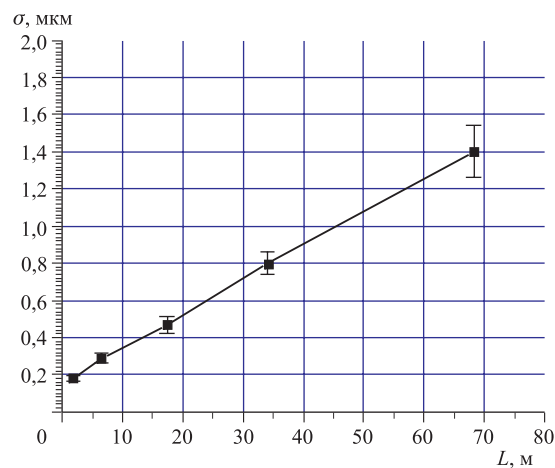


Рис. 9. Зависимость $\sigma_r(L)$ от расстояния, пройденного лазерным лучом в закрытой трубе; использованы телескопическая насадка-коллиматор и поворотная призма

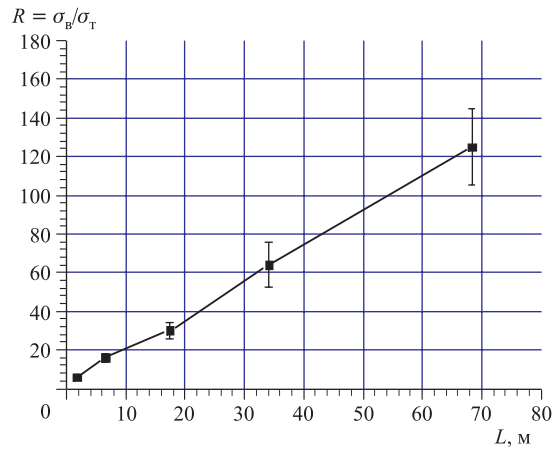


Рис. 10. Зависимость коэффициента «улучшения разрешения» $R(L)$ от длины распространения лазерного луча

позволило провести исследование на длинах до 68 м. На рис. 9 показана зависимость величин σ от длины распространения лазерного луча.

Обнаруженный в [1] эффект значительного снижения $\sigma_\tau(L)$ после прохождения луча через закрытую трубу относительно $\sigma_v(L)$ при распространении в воздухе без трубы в данном эксперименте наблюдался на больших расстояниях. Принципиальной особенностью (не очевидной *a priori*) является то, что коэффициент «улучшения разрешения» $R(L) = \sigma_v/\sigma_\tau$ возрастает с расстоянием и на длине $L = 68$ м достигает весьма значительной величины $R(68) = 124 \pm 20$ (рис. 10).

ВЫВОДЫ

Обнаруженный в [1] эффект подавления флуктуационных колебаний оси лазерного луча при его распространении в трубе зарегистрирован экспериментально также и на больших расстояниях (до 68 м).

Установлено, что эффект практически линейно растет с расстоянием, достигая весьма значительной величины $R(68 \text{ м}) = 125$.

Это обстоятельство (линейность) позволяет предположить ранее не отмечавшуюся в литературе квадратичную зависимость пространственной неопределенности положения лазерного луча $\sigma_v(L)$ от расстояния L при распространении его в атмосферном воздухе (без трубы).

Явление подавления флуктуационного колебания лазерного луча в закрытой трубе на достаточно больших расстояниях, часто встречающихся в практических задачах, может, как представляется, служить физической основой для создания технических средств прецизионной лазерной метрологии больших расстояний.

Авторы выражают благодарность К. Ласеру за предоставленную возможность в проведении экспериментов и ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Batusov V. et al.* A Study of an Air Media Influence on the Rectilinearity of Laser Ray Proliferation Towards the Using for Lard Distances and High-Precision Metrology // Phys. Part. Nucl. Lett. 2007. V. 4. P. 155–156.
2. *Батусов В. Ю. и др.* Наблюдение особенностей распространения лазерного луча в воздушной среде со стоячими звуковыми волнами. Препринт ОИЯИ Р13-2009-45. Дубна, 2009.

Получено 2 декабря 2009 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 19.03.2010.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,91. Тираж 305 экз. Заказ № 56933.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@jinr.ru

www.jinr.ru/publish/