

## СТЕНД “МИКРОСКОП” ДЛЯ ПОВЕРКИ МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

© 2023 г. Е. В. Ботов<sup>а</sup>, В. Н. Иконников<sup>а,\*</sup>, Н. С. Корнев<sup>а</sup>, Е. С. Митин<sup>а</sup>,  
А. В. Назаров<sup>а</sup>, А. А. Седов<sup>а</sup>, Д. А. Трегубенко<sup>а</sup>

<sup>а</sup>РФЯЦ–ВНИИ экспериментальной физики  
Россия, 607188, Саров, просп. Мира, 37

\*e-mail: ikonnikov-vn@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.05.2022 г.

После доработки 06.06.2022 г.

Принята к публикации 03.08.2022 г.

Описаны устройство и принцип действия стенда “Микроскоп” для определения погрешности измерения перемещений отражающей поверхности. Стенд создан на основе инструментального микроскопа БМИ-1, в качестве эталона сравнения в составе стенда используется стеклянная штриховая мера 2-го класса точности. Дана теоретическая оценка инструментальной погрешности измерения перемещений отражающей поверхности с помощью стенда. Приведены методика поверки микроволновых радиоинтерферометров при помощи разработанного стенда и результаты испытаний микроволнового радиоинтерферометра по представленной методике.

DOI: 10.31857/S0032816223010068, EDN: JRNVMO

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время микроволновые радиоинтерферометры активно внедряются как в отечественную [1], так и в зарубежную [2, 3] практику экспериментальных исследований быстропротекающих процессов. Использование микроволновой радиоинтерферометрии в экспериментах по исследованию процессов детонации, горения, метания позволяет получать информацию о движении объектов и газодинамических фронтов, а также о динамике конструкций в реальном времени с высокими пространственным и временным разрешениями, не оказывая при этом влияния на исследуемый процесс.

При решении большинства практических задач с помощью микроволновых радиоинтерферометров измеряются временные зависимости перемещения объектов в пределах 100 мм, причем технические характеристики прибора обеспечивают погрешность измерений не хуже  $\pm 0.15$  мм. Для подтверждения указанной погрешности необходимо устройство, воспроизводящее перемещения как минимум в 3–5 раз точнее.

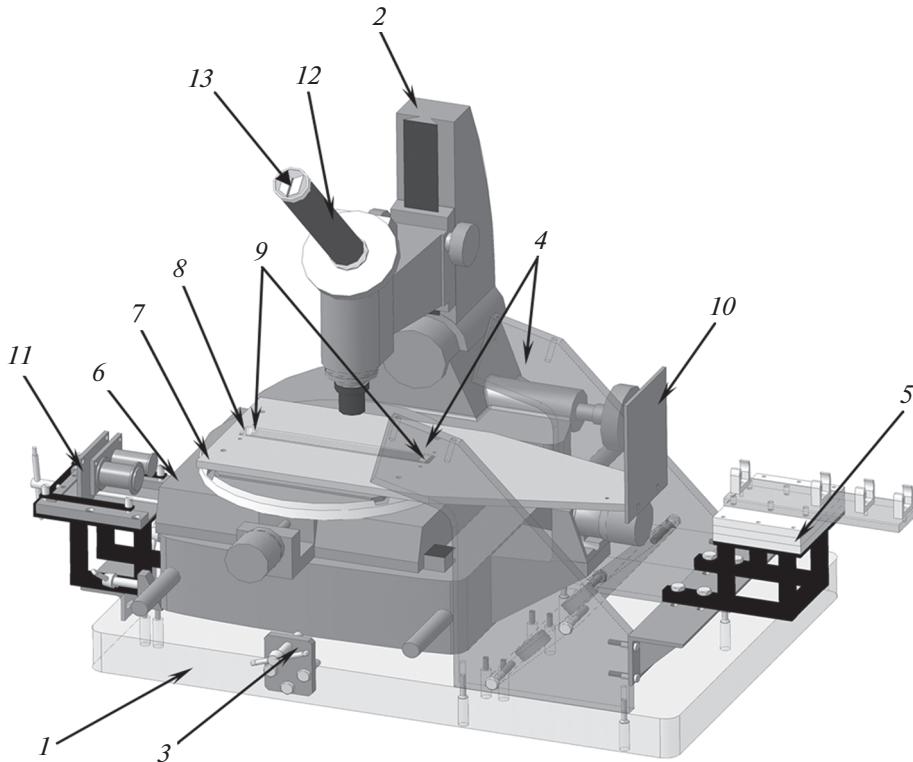
Имеющийся опыт применения горизонтальных длиномеров зарубежного производства [4, 5] для испытаний микроволновых радиоинтерферометров, несмотря на высокую точность, выявил ряд их существенных недостатков. Помимо высокой стоимости данного оборудования, к ним также относятся невозможность автоматического

воспроизведения перемещения фиксированной величины и отсутствие синхронизации при регистрации результатов измерений. В РФЯЦ–ВНИИЭФ разработан стенд “Микроскоп”, предназначенный для определения погрешности измерения перемещения отражающей поверхности с погрешностью не более 3 мкм.

### УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СТЕНДА

Стенд “Микроскоп” создан на основе инструментального микроскопа БМИ-1. В основе измерительной части стенда лежит стеклянная штриховая мера 2-го класса точности [6]. Общий вид стенда показан на рис. 1.

На массивном основании 1, выполненном (для снижения вибрации) из толстого листа органического стекла, крепится микроскоп БМИ-1 (2). Подвижный рабочий стол 6 стенда имеет возможность смещаться на 150 мм. На рабочем столе закреплена опорная плита 7, на которой жестко зафиксированы образцовая штриховая мера 8 и отражатель 10. На упорах 4 установлен узел крепления 5 антенно-фидерной системы, на котором при испытаниях устанавливается облучатель диэлектрического зондирующего устройства радиоинтерферометра. С боковой стороны стенда закрепляется электромагнитный узел 11, удерживающий стол в начальном положении.



**Рис. 1.** Общий вид стенда “Микроскоп”. 1 – основание; 2 – инструментальный микроскоп БМИ-1; 3 – зажимы; 4 – упоры; 5 – узел крепления облучателя; 6 – подвижный рабочий стол; 7 – опорная плита; 8 – штриховая мера; 9 – накладки; 10 – отражатель; 11 – электромагнитный узел; 12 – коллиматор; 13 – фотоприемник.

Штатная подсветка микроскопа БМИ-1 заменена на лазерную подсветку, которая находится на неподвижной части стенда непосредственно под штриховой мерой. Расстояние между соседними штрихами меры составляет  $1.0000 \pm 0.0025$  мм.

При отключении электромагнита под действием пружинного механизма, входящего в состав микроскопа БМИ-1, происходит движение рабочего стола по направлению к облучателю. Изображение штрихов меры при этом проецируется через оптическую систему микроскопа и коллиматор 12 на щель. Штрихи в процессе перемещения стола периодически затевают щель. Изменение освещенности считывается при помощи фотоприемника 13, который размещен непосредственно над щелью. Зарегистрированная последовательность импульсов в дальнейшем используется для определения перемещения рабочей части стенда. Принцип действия стенда иллюстрирует рис. 2.

Питание лазерной подсветки и управление электромагнитом осуществляются при помощи блока электроники, смонтированного в металлическом корпусе и соединенного с соответствующими элементами стенда кабельными жгутами. В блоке электроники предусмотрена возможность подачи и отключения питания на электро-

магнит от внешнего источника путем подачи сигнала от генератора синхроимпульсов.

Инструментальная погрешность измерений перемещения с помощью стенда ( $\Delta_c$ ) складывается из погрешности штриховой меры, которая в соответствии с документацией составляет 2.5 мкм, и погрешности, вносимой фотоприемником и регистрирующим осциллографом.

Погрешность, вносимая фотоприемником и осциллографом, может быть вычислена по формуле

$$\Delta X = VT_s,$$

где  $V$  – максимальная скорость движения рабочего стола стенда,  $T_s$  – суммарная временная задержка.

Погрешность, вносимая фотоприемником, связана с временной задержкой преобразования изменения интенсивности падающего на фотодиод светового потока в электрический сигнал, которая не превышает 0.135 мкс.

Погрешность, вносимая осциллографом, связана с временной асинхронностью записи в память времени перекрытия светового потока штрихами меры относительно времени записи данных радиointерферометра и составляет не более 0.002 мкс.

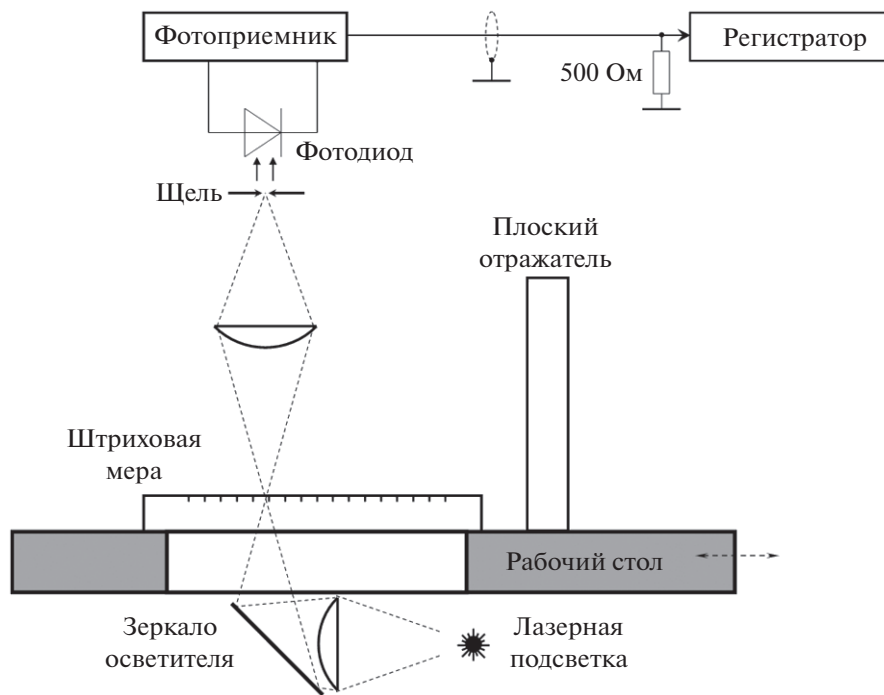


Рис. 2. Принцип работы стенда "Микроскоп".

Суммарная постоянная времени, таким образом, составляет не более  $0.137$  мкс, что при скорости движения стола стенда  $\leq 20$  мм/с дает дополнительную погрешность  $\leq 0.00274$  мкм. Таким образом, можно утверждать, что абсолютная инструментальная погрешность измерений перемещения отражающей поверхности с помощью стенда  $\Delta_c$  не превышает по модулю  $3$  мкм.

### ПОВЕРКА МИКРОВОЛНОВЫХ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

Схема испытаний по оценке погрешности измерения перемещения микроволновым радиоинтерферометром показана на рис. 3. Радиоинтерферометр генерирует на выходе непрерывный зондирующий сигнал миллиметрового диапазона длин волн, который через боковой канал двухканальной волноведущей системы с направленным ответвителем поступает на облучатель. Прием отраженного сигнала обеспечивается через прямой канал волноведущей системы.

Измерение перемещений при помощи радиоинтерферометра может проводиться путем цифровой обработки как сигналов с выхода блока квадратурных фазовых детекторов (КФД), так и сигналов на промежуточной частоте, зарегистрированных непосредственно на выходе блока приемопередатчика (ПП).

В качестве регистраторов в схеме на рис. 3 используются высокоскоростные осциллографы

(например, осциллографы серии Infinium 9000A фирмы Keysight Technologies). Генератор импульсов (например, Г5-82) используется для синхронного первичного запуска обоих осциллографов. Поскольку внутренние часы современных осциллографов имеют временную погрешность не хуже  $10^{-7}$ , синхронный запуск гарантирует синхронность времени на обоих регистраторах.

При измерениях с использованием блока КФД интерферограмма, несущая информацию о перемещении отражателя, регистрируется непосредственно на осциллограф 1, после чего сохраняется в файл и обрабатывается специальной программой на персональном компьютере. Результатом обработки интерферограммы является  $X-t$ -диаграмма, описывающая линейное перемещение отражателя в зависимости от времени.

При регистрации сигналов на промежуточной частоте осциллограф 1 необходимо использовать на максимальной частоте дискретизации ( $10$  ГГц) ввиду большого значения промежуточной частоты ( $1.2$  ГГц). В процессе движения рабочего стола стенда до остановки необходимо однократно зарегистрировать сигнал длительностью около  $12$  с. Однако объем памяти осциллографа при максимальной частоте дискретизации позволяет записывать сигнал в непрерывном режиме на протяжении всего нескольких миллисекунд, поэтому запись сигнала на промежуточной частоте осуществляется в режиме сегментированной регистрации. Сигнал записывается небольшими от-

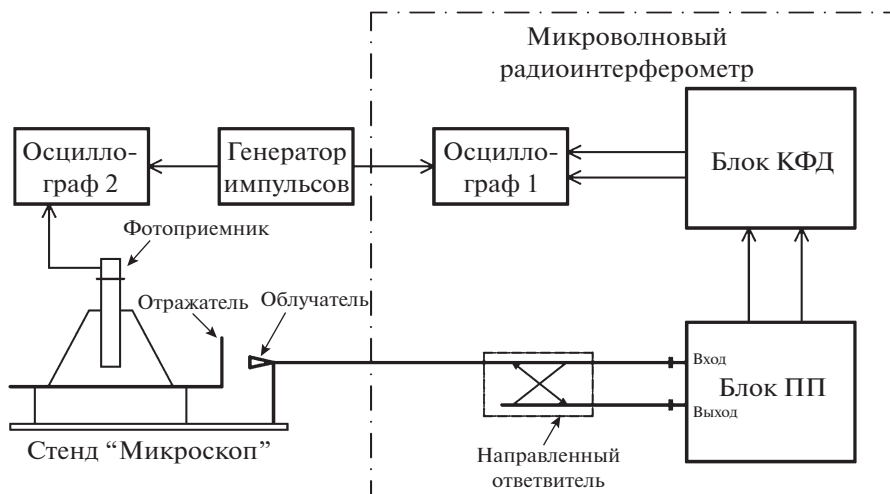


Рис. 3. Схема поверки микроволновых радиоинтерферометров. КФД – квадратурные фазовые детекторы; ПП – приемопередатчик.

резками длительностью несколько (от 2 до 10) наносекунд с интервалами времени между ними 3 миллисекунды. Длительность одного сегмента позволяет определить сдвиг фазы между опорным и информационным сигналами промежуточной частоты и провести квадратурное фазовое детектирование в цифровом виде. При этом с учетом небольшой скорости движения рабочего стола стенда изменение этого сдвига фаз между соседними сегментами позволяет восстановить по ним интерферограмму. При таком способе регистрации один период интерферограммы состоит из 30–35 сегментов, каждый из которых усредняется до одного отсчета.

Частота следования сегментов задается генератором импульсов. Параллельно его сигнал регистрируется на осциллографе 2 синхронно с сиг-

налом фотоприемника, считывающего штрихи эталонной меры. При обработке сегментированного сигнала промежуточной частоты с осциллографа 1 используется сигнал генератора, зарегистрированный на осциллографе 2, чтобы интерферограмма и сигнал фотоприемника имели общую временную привязку, соответствующую временной шкале осциллографа 2.

Определение перемещения по эталону осуществляется по результатам обработки сигнала, зарегистрированного на выходе фотоприемника, фрагмент осциллограммы показан на рис. 4. Из-за дифракции монохромного излучения лазерной подсветки в окрестности каждой риски наблюдаются осцилляции интенсивности света, проходящего через оптическую щель, а в центре каждого импульса присутствует локальный максимум, по

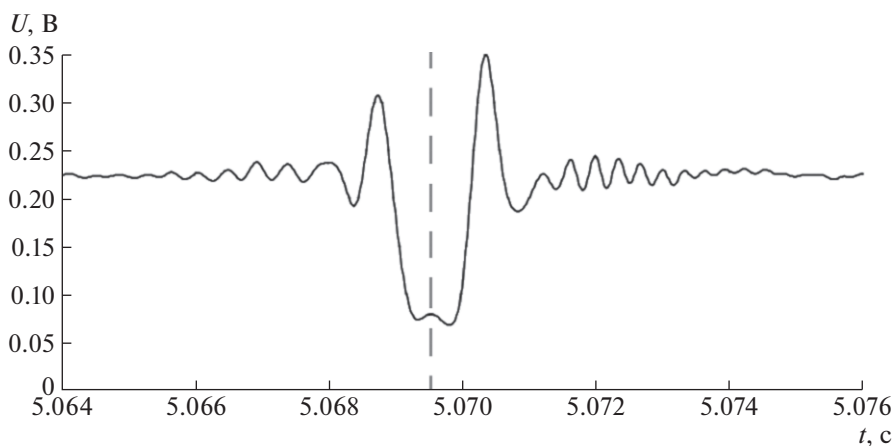


Рис. 4. Фрагмент осциллограммы сигнала на выходе фотоприемника. Штриховая линия – момент прохождения центра риски штриховой меры.

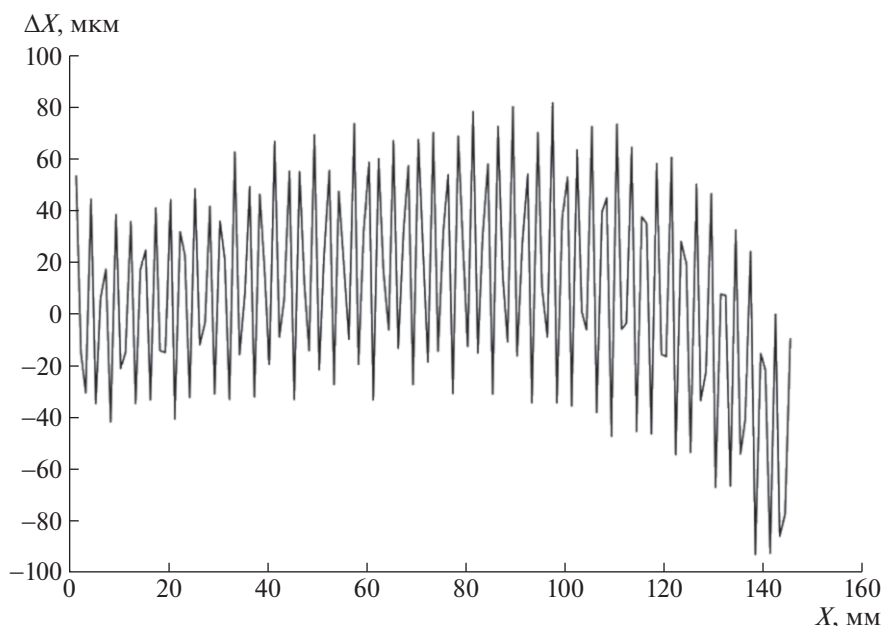


Рис. 5. Погрешность измерения перемещения отражающей поверхности с помощью радиоинтерферометра.

которому и определяется момент прохождения риски.

Для определения погрешности измерения перемещения радиоинтерферометром из  $X-t$ -диаграммы, полученной по данным радиоинтерферометра, делается выборка в моменты времени прохождения изображения риска эталонной штриховой меры по оптической щели. Значения перемещения и погрешности на момент времени прохождения первой риски принимаются равными нулю, т.е. первая риска принимается за начало измерения. Для последующих рисков определяется разность перемещений, полученных по данным радиоинтерферометра и сигналу фотоприемника.

На рис. 5 приведен график зависимости погрешности измерений от перемещения отражателя, полученный по результатам обработки сигналов радиоинтерферометра с выхода блока КФД. Как видно из рис. 5, значения абсолютной погрешности не превышают по модулю 0.1 мм. Регистрация сигнала на промежуточной частоте также обеспечивает аналогичные результаты поверки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Инструментальная погрешность стенда “Микроскоп”, как следует из теоретической оценки, не превышает по модулю 3 мкм, что существенно меньше целевого значения предела допускаемой

основной погрешности измерений для микроволновых радиоинтерферометров ( $\pm 0.15$  мм). Разработанный стенд может применяться для определения погрешности измерения перемещения отражающей поверхности микроволновыми радиоинтерферометрами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. А.Л. Михайлова. Саров: ФГУП “РФЯЦ–ВНИИЭФ”, 2015.
2. Mays R.O., Tringe J.W., Souers P.C., Lauderbach L.M., Baluyot E.V., Converse M.C., Kane R.J. // AIP Conf. Proc. 2018. V. 1979. Iss. 1. P. 160016. <https://doi.org/10.1063/1.5045015>
3. Zhai Z.-H., Sun C.-L., Liu Q., Guo L.-W., Liu Y.-S., Zhang X., Wang D.-T., Meng K., Li J., Du L.-H., Liu S.-X., Zhong S.-C., Zhu L.-G. // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 116. P. 161102. <https://doi.org/10.1063/1.5142415>
4. Длинномеры горизонтальные моделей Mini-Horizontal TELS, Horizon, Horizon Granite, Horizon Premium, THV, Labconcept/Labconcept Premium, Twinner, Alesta/Alesta Premium. Описание типа средства измерений. Приложение к свидетельству об утверждении типа средства измерений № 30710.
5. Приборы универсальные для измерений длины Precimar ULM 300/600/1000/1500. Описание типа средства измерений. Приложение к свидетельству об утверждении типа средства измерений № 31586.
6. ГОСТ 12069-90 “Меры длины штриховые брусковые. Технические условия”.