

УДК 53.083.62; 621.384.6

ЭФФЕКТЫ СКОРОСТИ СКАНИРОВАНИИ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПРОФИЛЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ВИБРИРУЮЩЕЙ СТРУНОЙ

С.Г. АРУТЮНЯН¹, Г.С. АРУТЮНЯН¹, D. СНОЕ², М. СHUNG²,
Э.Г. ЛАЗАРЕВА^{1*}, А.В. МАРГАРЯН¹

¹Национальная научная лаборатория им. А.И. Алиханяна, Ереван, Армения

²Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Korea

*e-mail: ella.lazareva@yerphi.am

(Поступила в редакцию 14 июня 2017 г.)

Для измерения профиля лазерного пучка использован монитор вибрирующей струны (МВС). Измерения проведены при различных скоростях сканирования. Произведены предварительные оценки для вычисления времен отклика МВС, соответствующих тепловым потерям вдоль струны, радиационным и конвективным потерям. Эти оценки, однако, не определяют меру различия между профилем пучка и частотным откликом МВС для заданной скорости сканирования. Для оценки меры достоверности частотного отклика МВС используется сравнение прямого и обратного сканирования пучка при разных скоростях. Результаты этих сканирований используются для коррекции теплового запаздывания частотного отклика МВС.

1. Введение

Принцип действия датчиков вибрирующей струны основан на измерении изменения частоты вибрирующей струны, растянутой на опоре, в зависимости от физических параметров струны и среды, в которой происходят колебания [1–2]. Преимуществами датчиков вибрирующей струны являются их долгосрочная стабильность, высокая точность и разрешающая способность, хорошая воспроизводимость, отсутствие дрейфа нуля, минимальное изменение чувствительности и малый гистерезис. Сигнал частоты мало подвержен внешним возмущениям и может передаваться по длинному кабелю без потерь или деградации [3–6]. Изменение напряжения вибрирующей струны может происходить вследствие изменения температуры струны, которое приводит к сдвигу частоты колебаний струны. Этот сдвиг может быть вызван, в частности, прохождением пучка заряженных частиц (излучения) через материал струны и служить мерой потока частиц, рассеянных по струне [7–9]. Таким образом используемый принцип действия оказывается универсальным и для пучков заряженных частиц и для лазерных

пучков. Отметим также отличие использования вибрирующей струны от традиционного метода использования тонких струн в качестве мишеней. Сигнал для вибрирующей струны формируется в результате измерения частоты вибрирующей струны и в настоящем методе не требуются дополнительных средств измерений рассеянных заряженных частиц (фотонов) (см. например, [10]).

Частота мониторов вибрирующей струны (МВС) в зависимости от исходного натяжения струны, материала и размера датчика, находится в диапазоне 1–10 кГц. Типичный диапазон выходного сигнала – сдвиг частоты – составляет более 0.01 (нижний предел) и менее 1000 Гц (верхний предел), то есть достижим относительный динамический диапазон $1-10^5$. Разрешение монитора составляет ~ 0.001 Гц, а точность измерения – лучше, чем 0.01 Гц. В зависимости от материала струны и ее геометрических размеров такая точность соответствует точности измерения изменения температуры струны (менее 1 мК). МВС использовались для измерения электронных [8], протонных [9, 11–13], ионных [14], рентгеновских пучков [15] и пучков синхротронного излучения [16]. Специальные мониторы со струнами с гадолиниевым покрытием предложены для профилирования пучков тепловых нейтронов [17].

Важными параметрами МВС являются динамические характеристики, которые определяются геометрией и материалом датчика, окружающей средой, а также скоростью сканирования.

Целью настоящей работы является исследование процесса измерения профиля пучка с помощью МВС при различных скоростях сканирования. Данное исследование позволяет оценить точность сканирования в зависимости от скорости сканирования. В работе применяется метод прямого и обратного сканирования, который позволяет производить коррекцию теплового запаздывания частотного отклика МВС при увеличении скорости сканирования.

2. Временная диаграмма и обработка данных при быстром сканировании

Сканирование любого пучка с помощью МВС требует набора частотных измерений в фиксированных положениях струны. Электронная плата МВС для каждой струны состоит из двух основных блоков: генератора колебаний струны (StrinGen) и блока измерения частоты. Плата основана на микроконтроллерах серии PIC18F25xx. Передача данных на компьютер осуществляется через интерфейсы RS232 или USB.

Измерение частоты колебаний струны F во временном интервале g выполняется путем подсчета периодов N_q высокочастотного точного кварцевого генератора в течение полных N_f периодов колебаний струны, которые приблизительно покрывают временной интервал g (рис.1). Периоды колебаний струны фиксируются за счет использования прецизионного механизма пересечения

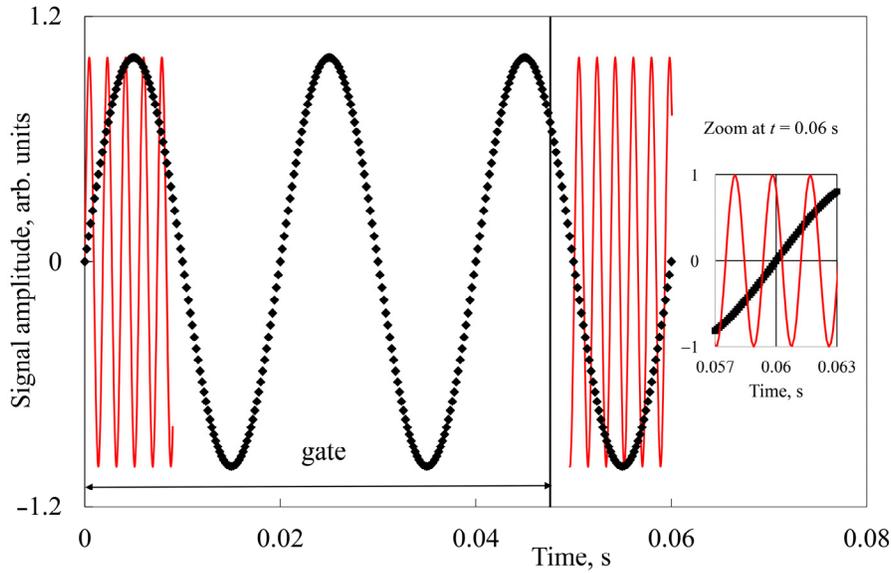


Рис.1. Принцип измерения частоты колебаний струны: сплошная линия – высокочастотная кварцевая составляющая, ромбики – частотный сигнал струны, вертикальная линия – предварительная установка диапазона ворот g . На вставке представлен вид сигналов в увеличенном масштабе вокруг значения $t = 0.06$ с.

нуля. Из равенства

$$\frac{N_f}{F} = \frac{N_q}{F_q} \approx g \quad (1)$$

находится уравнение для значения частоты вибрирующей струны:

$$F = F_q \frac{N_f}{N_q}. \quad (2)$$

В конце временного интервала пересечение высокой частоты с сигналом колебаний струны может происходить в любой фазе периода кварцевого генератора (см. вставку на рис.1), поэтому число периодов кварцевого генератора может меняться на единицу. Соответствующая точность метода представляется уравнением

$$\frac{\Delta F}{F} \approx \frac{1}{N_q} \approx \frac{1}{gF_q}. \quad (3)$$

Таким образом, относительная точность измерений при выборке 1 с и частоте кварцевого генератора 1 МГц составляет $\sim 10^{-6}$.

При быстром сканировании необходимо принимать во внимание подробную информацию о временных привязках при измерении частоты и процессах

движения струны. Микроконтроллер PIC18F25×× обеспечивает процесс измерения и результат отправляется на компьютер в виде 4 байтов в формате с плавающей запятой. Компьютерное время t_{f_PC} при получении этой информации сохраняется в файле данных. Фактически, это время не соответствует реальному времени измерения t_f , которое должно быть отнесено к средней точке ворот g : $t_f = t_{f_PC} - 6.5 \text{ мс} - g / 2$. Учтено, что задержка между краем ворот и окончанием времени передачи пакета данных на компьютер составляет ~ 6.5 мс. В эксперименте использовалось значение $g = 180$ мс и между началом нового процесса измерения был установлен промежуток 20 мс для передачи данных в компьютер (полное время цикла, таким образом, составило 200 мс). Для интерфейса RS232 использовалась скорость передачи данных 9600 Бод, что соответствует ~ 1 мс для передачи 1 байта (включая стартовые и стоповые биты).

За передачей данных частоты следует запрос о положении шагового двигателя. Сразу после отправки запроса время компьютера записывается в файл данных, что практически соответствует реальному времени позиции t_{SIM} , которое будет получено через несколько мс. Эти две колонки файла (t_{SIM} и положение шагового двигателя) используются для расчета в линейном приближении положения двигателя во время измерения частоты t_f . Измерение профиля пучка представлено в виде пары: частота струны и положение шагового двигателя.

3. Измерение профиля лазерного луча

В процессе эксперимента осуществлялось измерение поперечного профиля лазерного пучка путем измерения частоты струны в разных положениях относительно пучка. Профиль лазерного пучка исследовался с помощью МВС при разных скоростях сканирования. Переданная от лазера энергия нагревает струну и изменяет натяжение и, следовательно, частоту колебаний струны. Нагрев струны является динамическим процессом, зависящим от условий эксперимента (струна может быть помещена в воздухе, в другой атмосфере или в вакууме), материала струны, механизма теплопередачи от измеряемого пучка к струне и т. д. Важным параметром измерения профиля является время отклика, которое зависит от параметров МВС и атмосферы.

Для треугольного профиля температуры в струне, близкого к реальному распределению, отвод поглощенной мощности посредством процесса теплопроводности описывается формулой

$$W_\lambda = 4(T - T_0)\lambda S/L, \quad (4)$$

где T – максимальная температура струны, T_0 – температура окружающей среды, λ – коэффициент теплопроводности материала струны, S и L – поперечное сечение и длина струны, соответственно.

Чтобы поднять температуру струны на среднюю величину $(T - T_0) / 2$ требуется энергия

$$E = \frac{T - T_0}{2} c \rho L S, \quad (5)$$

где c – удельная теплоемкость и ρ – плотность материала струны.

В предположении, что в процессе нагрева сток тепла остается постоянным, можно найти время τ_λ , которое потребуется для передачи струне энергии E в соответствии с формулой

$$\tau_\lambda = \frac{c \rho L^2}{8 \lambda}. \quad (6)$$

В случае, если тепловой сток вызван только процессом теплового излучения, имеем следующую формулу для мощности излучения:

$$W_{\text{RAD}} = \varepsilon \sigma_{\text{ST_B}} T_{\text{MEAN}}^4 \pi d L - \varepsilon \sigma_{\text{ST_B}} T_0^4 \pi d L \approx 2 \varepsilon \sigma_{\text{ST_B}} T_0^3 (T - T_0) \pi d L, \quad (7)$$

где d – диаметр струны, $\pi d L$ – площадь поверхности струны, $T_{\text{MEAN}} \approx (T + T_0) / 2$ – средняя абсолютная температура струны. Предполагается, что излучательная способность струны ε одинакова для излучения и поглощения. Соответствующее время отклика находится по формуле

$$\tau_{\text{RAD}} = \frac{c \rho d}{16 \varepsilon \sigma_{\text{ST_B}} T_0^3}. \quad (8)$$

Аналогичные вычисления могут быть выполнены для конвективного теплового стока

$$W_{\text{CONV}} = \frac{T - T_0}{2} \alpha_{\text{CONV}} \pi d L, \quad (9)$$

где α_{CONV} – коэффициент конвективных потерь. Соответствующее время отклика составляет

$$\tau_{\text{CONV}} = \frac{c \rho d}{4 \alpha_{\text{CONV}}}. \quad (10)$$

Окончательное время отклика τ всех механизмов стока находится по формуле

$$1 / \tau = 1 / \tau_\lambda + 1 / \tau_{\text{RAD}} + 1 / \tau_{\text{CONV}}. \quad (11)$$

В результате имеем

$$\tau = \frac{c \rho}{8(\lambda / L^2 + 2 \varepsilon \sigma_{\text{ST_B}} T_0^3 / d + \alpha_{\text{CONV}} / 2d)}. \quad (12)$$

Для МВС со струной из нержавеющей стали диаметром 0.1 мм и длиной

40 мм коэффициент конвективных потерь составляет 20 Вт/(м²К), что дает для $\tau \sim 3.9$ с ($\tau_\lambda \approx 48.5$, $\tau_{\text{RAD}} \approx 24.7$ и $\tau_{\text{CONV}} \approx 4.9$ с).

Для определения параметра α_{CONV} использовалось уравнение для конвекции движущегося со скоростью v в воздухе цилиндра [18]

$$\alpha_{\text{CONV}} = 4.13 \frac{v^{0.8}}{d^{0.2}}. \quad (13)$$

4. Эксперимент

На рис. 2 представлена экспериментальная схема, где в качестве платформы для точной подачи МВС использовался столик с микрометрической ручкой позиционирования. Эта ручка приводилась в действие шаговым двигателем через ленточную передачу от оси шагового двигателя к ручке с целью уменьшения механического воздействия шагового двигателя на вибрирующую струну. Коэффициент передачи вращения шагового двигателя к линейному движению МВС составлял 602 шага/мм. Система имела холостой ход ~ 10 мкм (соответствует 6–7 шагам двигателя).

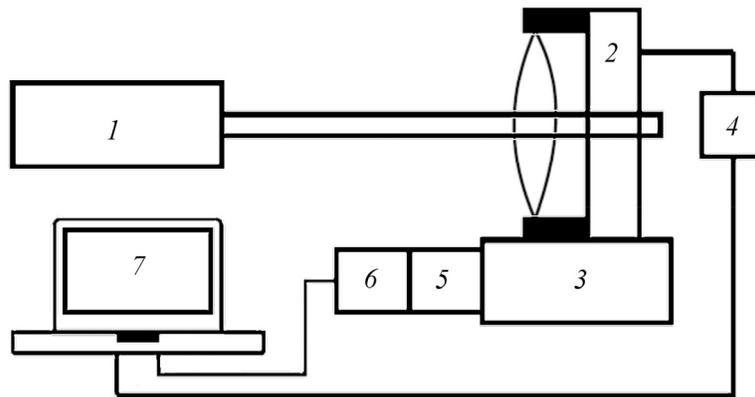


Рис.2. Схема эксперимента: 1 – лазер, 2 – МВС, 3 – столик с микрометрической ручкой позиционирования, 4 – электроника МВС с интерфейсом RS232, 5 – шаговый двигатель, соединенный с микрометрической ручкой подачи столика, 6 – электронный блок шагового двигателя с интерфейсом RS232 и 7 – компьютер.

Сканирование проводилось по следующей схеме: начальная пауза 10 с, прямое сканирование 2000 шагов с фиксированной скоростью, пауза 10 с, затем обратное сканирование в исходное положение. В эксперименте использовался полупроводниковый непрерывный лазер (Laser Point JD-850) с длиной волны 532 нм и мощностью ~ 100 мВт.

На рис.3 скорость сканирования составляет 0.0166 мм/с (10 шагов/с). Первичные результаты прямого и обратного сканирований представлены на рис.3а. Зазор между кривыми обусловлен тепловой инерцией процесса нагрева струны и холостым ходом при изменении направления движения столика. На рис.3б представлены сдвинутые друг к другу графики прямого и обратного сканирований. Значение обоих сдвигов составляет 0.017 мм (10 шагов). После этой операции два графика практически совпадают и представляют истинный профиль лазерного пучка. Точность восстановления профиля может быть определена как разница между двумя кривыми на рис.3б. Падение частоты, вызванное нагревом струны, составляет ~68 Гц. Полная ширина на полувысоте (FWHM) прямого сканирования составляет 334.7 шага (0.556 мм). Время сканирования составляет 33.5 с.

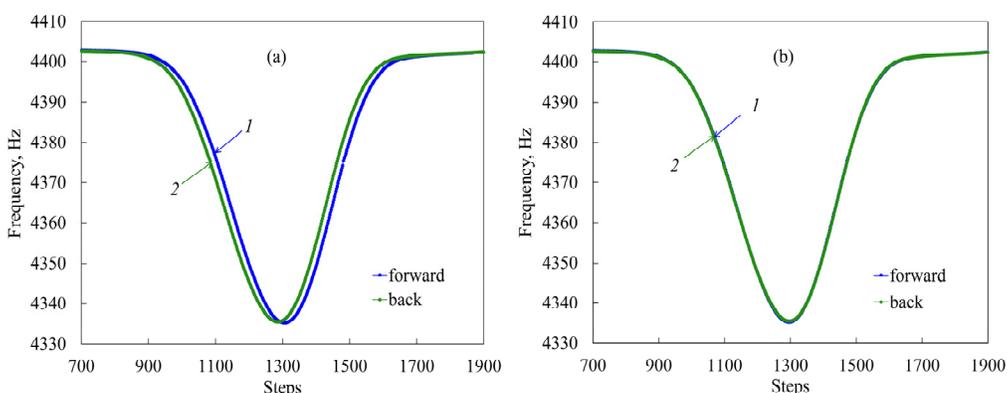


Рис.3. Сканирование с минимальной скоростью 10 шагов/с (0.0166 мм/с): (а) – первичные данные, (б) – графики сканирования сдвинуты друг к другу на 10 шагов. Кривые 1 и 2 – прямое и обратное сканирование.

Практически ту же картину мы наблюдали для скорости сканирования 0.03332 мм/с (20 шагов/с). Для совмещения первичных сканирований использовались сдвиги 0.023 мм (14 шагов) для каждого сканирования. Падение частоты составляет 63 Гц, что меньше, чем в предыдущем случае. FWHM прямого сканирования составляет 332.8 (0.553 мм). Время сканирования составляет 16.6 с.

Сканирование со скоростью 0.0830 мм/с (50 шагов/с) представлено на рис.4. Падение частоты составляет ~60 Гц. Для перекрытия обратного сканирования с прямым использовались сдвиги 0.056 мм (34 шага) (рис.4б). Центральные части профилей примерно совпадают, но небольшая разница возникает на «хвостах» профилей. Эта разница объясняется различием процессов нагрева на входе струны в пучок и охлаждения на выходе струны из пучка. FWHM прямого сканирования составляет 340.6 шага (0.566 мм). Время сканирования составляет 6.8 с.

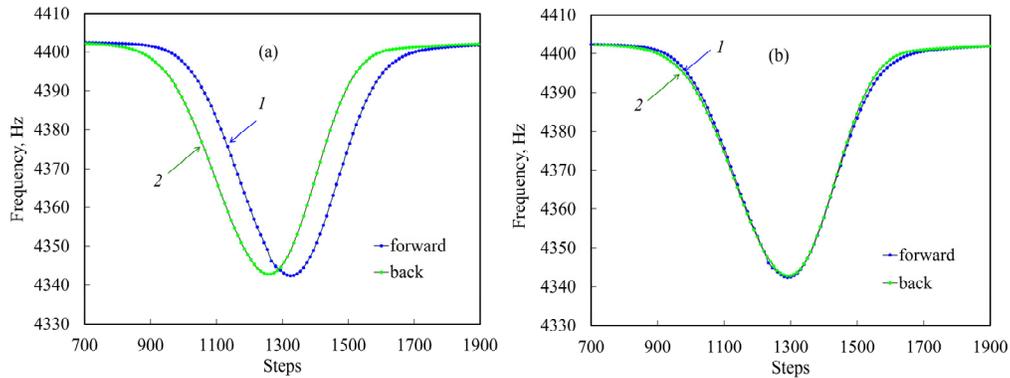


Рис.4. Сканирование со скоростью 50 шагов/с (0.0830 мм/с): (а) – первичные данные, (б) – графики сканирования сдвинуты друг к другу на 34 шага. Кривые 1 и 2 – прямое и обратное сканирование.

При скорости сканирования 0.1661 мм/с (100 шагов/с) падение частоты составляет 51 Гц (рис.5). Разница между графиками сканирования после взаимных сдвигов на 0.086 мм (52 шага) (рис.5б), показывает значительный эффект тепловой инерции. FWHM прямого сканирования 362.2 шага (0.602 мм), а время сканирования 3.6 с.

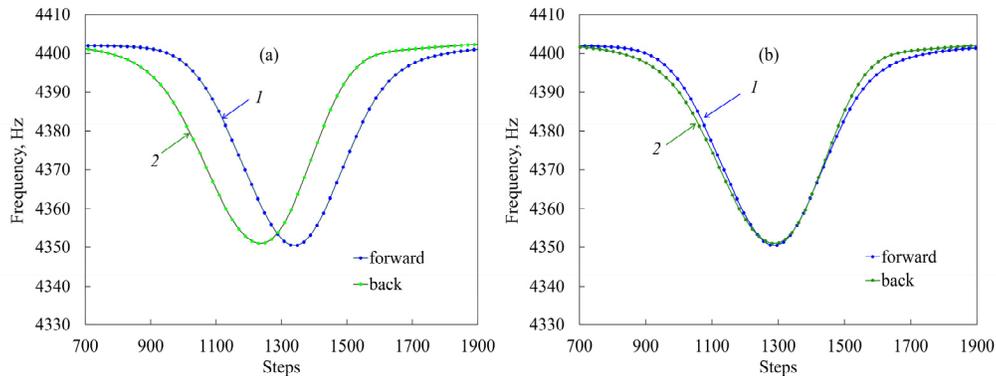


Рис.5. Сканирование со скоростью 100 шагов/с (0.1661 мм/с): (а) – первичные данные, (б) – графики сканирования сдвинуты друг к другу на 52 шага. Кривые 1 и 2 – прямое и обратное сканирование.

Было произведено сканирование со скоростью 0.2491 мм/с (150 шагов/с) с падением частоты ~50 Гц. Параметр сдвига графиков составляет 0.123 мм (74 шага), FWHM прямого сканирования – 398.3 шага (0.622 мм), а соответствующее время – 2.6 с.

Максимальная скорость сканирования в следующем эксперименте со-

ставляла 0.3322 мм/с (200 шагов/с) с падением частоты 45 Гц (рис.6). Соответствующие сдвинутые профили (на 0.140 мм или 84 шагов) совпадают только вблизи центральной части профилей, а хвостовые части представляются существенно разными. FWHM прямого сканирования составляет 430.2 шага (0.715 мм), а соответствующее время – 2.1 с.

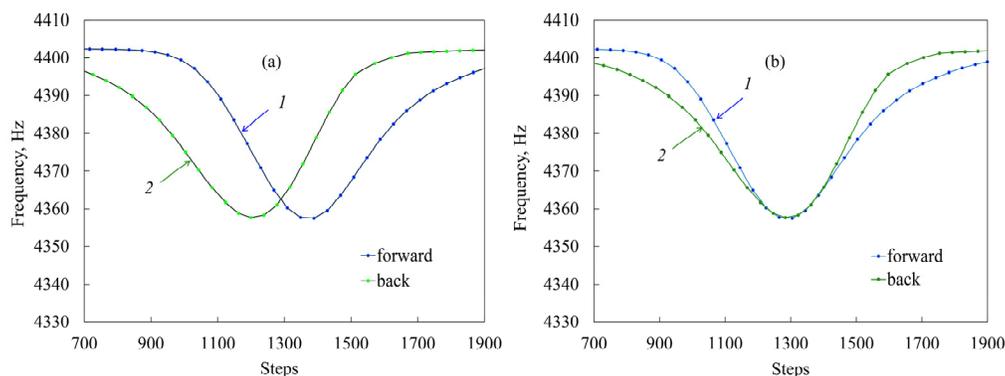


Рис.6. Сканирование с максимальной скоростью 200 шагов/с (0.3322 мм/с): (а) – первичные данные, (б) – графики сканирования сдвинуты друг к другу на 84 шага. Кривые 1 и 2 – прямое и обратное сканирование.

Как видно из результатов экспериментов при увеличении скорости сканирования уменьшается количество экспериментальных точек на графиках, искажение кривых относительно симметричного профиля лазерного пучка растет. Оценка времени отклика МВС в 3.9 с дает качественное описание экспериментальных измерений. Действительно, для скоростей сканирования 0.0166, 0.0332 и 0.0830 мм/с (время сканирования 33.5, 16.6 и 6.8 с) результаты прямого и обратного сканирования практически совпадают. При скорости 0.1661 мм/с (время сканирования 3.6 с) наблюдается заметное расхождение между результатами прямого и обратного сканирования, которое при скорости 0.2491 и 0.3322 мм/с становится значительным. Полученные результаты наводят на мысль об использовании для оценки меры соответствия измерений МВС реальному профилю пучка сравнение частотных откликов МВС при прямом и обратном сканировании. Для такого сравнения используем простой алгоритм, основанный на вычислении суммы абсолютных расстояний между значениями частотных откликов МВС, нормированной на количество экспериментальных точек.

Поскольку набор координат экспериментальных точек прямого и обратного сканирования по оси перемещения сканера на графиках разный, то сравнение производится между выбранной экспериментальной точкой обратного сканирования и точкой прямого сканирования, экстраполированной линейно

Табл.1. Сравнительные характеристики прямого и обратного сканирования пучка при разных скоростях

Скорость, мм/с	FWHM, мм	Время FWHM, с	Кол-во точек	Падение частоты, Гц	Расхождение сканирований, Гц	Точность измерения профиля, %
0.0166	0.556	33.5	987	68	0.11	0.16
0.0332	0.553	16.6	492	63	0.20	0.32
0.0830	0.566	6.8	194	60	0.42	0.70
0.1661	0.602	3.6	97	51	1.03	2.01
0.2491	0.622	2.6	63	50	2.45	4.89
0.3322	0.715	2.1	48	45	3.22	7.15

между ближайшими экспериментальными точками этой же кривой. В табл.1 представлены результаты такой процедуры, произведенной для всех использованных скоростей сканирования.

Использование прямого и обратного сканирования также дает возможность производить коррекцию частотных откликов МВС с целью приближения к реальному профилю пучка. Коррекция производится усреднением профилей прямого и обратного сканирования. На рис.7 представлен процесс такого усреднения для наибольшей скорости сканирования 0.3322 мм/с. Для сравнения приведен также профиль пучка по результатам медленного сканирования, которое принимается опорным.

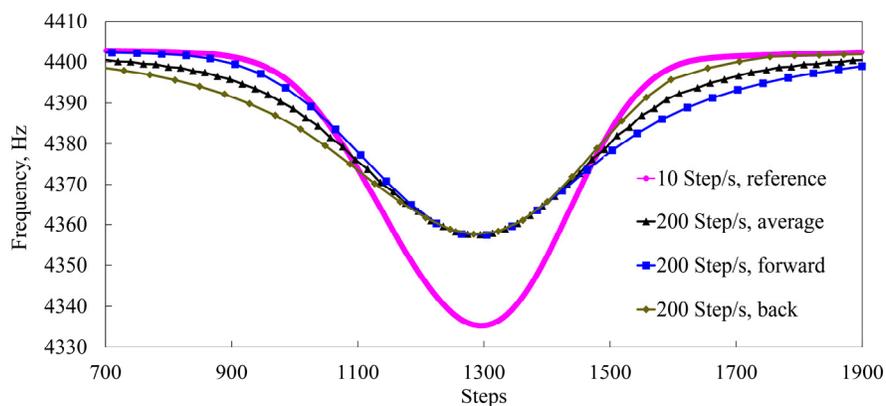


Рис.7. График усреднения (треугольники) прямого (квадраты) и обратного (ромбы) сканирований для скорости 200 шагов/с. FWHM для этого графика составляет 0.711 мм (428.1 шага). Сплошной линией представлен опорный профиль, зарегистрированный при скорости 10 шагов/с (FWHM – 0.715 мм).

5. Заключение

Осуществлено измерение профиля лазерного пучка с помощью МВС при различных скоростях сканирования. Поскольку в основе метода вибрирующей струны лежит тепловое воздействие пучка на струну, при измерениях наблюдается различное поведение монитора при нагреве и охлаждении струны, обусловленное тепловой инерцией данных процессов. Для выделения этой разницы использовалось сочетание прямого и обратного сканирования. Такой метод позволяет оценить точность соответствия частотного сигнала монитора реальному профилю пучка даже при больших скоростях сканирования (быстрота сканирования определяется сравнением времени сканирования с характерным временем отклика монитора). Разница между прямым и обратным сканированием определяет точность сканирования при данной скорости. Результаты использованы для коррекции теплового запаздывания частотного отклика МВС.

Приведенные результаты представляют интерес при использовании МВС в широком диапазоне применений (заряженные частицы, излучение), поскольку позволяют по прямому и обратному сканированию при той же скорости определять точность сканирования и производить коррекцию профиля пучка.

Авторы выражают благодарность R. Reetz и J. Vergoz за многолетнюю поддержку. Авторы благодарят Г. Адилханяна за ценную помощь в комплектации экспериментальной установки. Особая благодарность А. Унанян за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д.И. Агейкин, Е.Н. Костина, Н.Н. Кузнецова. Датчики контроля и регулирования. Москва, Машиностроение, 1965.
2. Ж. Аш, П. Андре, Ж. Бофрон, П. Дегут, К. Жувено, У. Зельбштейн, Б. Кретинон, П. Ливрозе, А. Мазеран, Ж. Меригу, П. Пейро, А. Пике, Ж.-К. Прижан, М. Сюньаш, Ж. Такюсель, Ж. Фулетье, Ж. Шарне, Ж.-П. Шон. Датчики измерительных систем. Москва, Мир, 1992.
3. T. Simmonds. Vibrating Wire Tiltmeters and Inclinometers, Recent Developments and Experiences, Monosys Guide in Monitoring, 2000.
4. J.L.G. Correia da Mata, J.M.N.A. Farelaria, C.M.B.P. Oliveria, W.A. Wakeham, A New Instrument to Perform Simultaneous Measurements of Density and Viscosity of Fluids Using a Dual Vibrating-Wire Technique. – www.zae-bayern.de/ectp/abstracts/correia_da_mata1.html.
5. A. Krause, A. Erbe, R.H. Blick. Nanotechnology, **11**, 165 (2000).
6. F. Ayazi, K. Najafi, A Harpss. J. Micromechanical Systems, **10**, 169 (2001).
7. S.G. Arutunian, N.M. Dobrovolski, M.R. Mailian, I.G. Sinenko, I.E. Vasiniuk. Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams, **2**, 122801 (1999).
8. S.G. Arutunian, N.M. Dobrovolski, M.R. Mailian, I.E. Vasiniuk, Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams, **6**, 042801 (2003).
9. S.G. Arutunian, M.R. Mailian, K. Wittenburg. NIM A, **572**,1022 (2007).

10. **N. Tabirian.** US Patent 6526077, 2003.
11. **M. Chung, V. Scarpine, B. Hanna, J. Steimel, V. Shiltsev, S.G. Arutunian, S. Artinian.** Transverse Beam Halo Measurements at High Intensity Neutrino Source (HINS) Using Vibrating Wire Method, Int. Part. Accel. Conf. IPAC2013 (Shanghai, China, 2013), pp. 819–821.
12. **S.G. Arutunian, A.E. Avetisyan, M.M. Davtyan, G.S. Harutyunyan, I.E. Vasiniuk, M.Chung, V.Scarpine.** Phys. Rev. Special Topics – Accelerators and Beams, **17**, 032802 (2014).
13. **М.А. Агинян, С.Г. Арутюнян, Д. Чое, М. Chung, Г.С. Арутюнян, С.-У. Kim, Э.Г. Лазарева, А.В. Маргарян.** Изв. НАН Армении, Физика, **52**, 110 (2017).
14. **S.G. Arutunian.** Vibrating Wire Sensors for Beam Instrumentation, Beam Instrumentation Workshop, BIW08, (May 4–8, 2008, Lake Tahoe, USA), pp. 1–7.
15. **G. Decker, S. Arutunian, M. Mailian, G. Rosenbaum,** First Vibrating Wire Monitor Measurements of a Hard x-ray Undulator Beam at the Advanced Photon Source, Proc. 8th Europ. Workshop on Beam Diagnostics and Instrumentation for Part. Accel. DIPAC2007 (May 20–23, 2007, Venice), pp. 36–38.
16. **G. Decker, S. Arutunian, M. Mailian, I. Vasiniuk.** Hard X-ray Synchrotron Measurements at the APS with Vibrating Wire Monitor, Beam Instrumentation Workshop, BIW08, (May 4–8, 2008, Lake Tahoe, USA), pp. 36–40.
17. **S.G. Arutunian, J. Bergoz, M. Chung, G.S. Harutyunyan, E.G. Lazareva,** NIM A, **797**, 37 (2015).
18. Feuerfestbau, Werkstoffe-Konstruktion-Ausfuehrung, Vulkan-Verlag Essenp, 2002.

EFFECTS OF SCANNING SPEED ON THE LASER BEAM
PROFILE MEASUREMENTS BY VIBRATING WIRE

S.G. ARUTUNIAN, G.S. HARUTYNYAN, D. CHOE, M. CHUNG,
E.G. LAZAREVA, A.V. MARGARYAN

For measuring the laser beam profile a vibrating wire monitor (VWM) was used. The measurements were carried out at different speeds of scanning. Preliminary estimates for calculation of the VWM response times with respect to the thermal losses along the wire, radiative and convective losses, were made. These estimates, however, do not determine the measure of the difference between the beam profile and the frequency response of the VWM for a given scanning rate. To evaluate the measure of the reliability of the frequency response of the VWM, the comparison between forward and reverse beam scans at different speeds is used. The results of these scans are used to correct the thermal inertia in the frequency response of the VWM.