

УДК 53.083.62; 621.384.6

РАЗРАБОТКА НОВОГО АЛГОРИТМА В МЕТОДЕ РЕЗОНАНСНОЙ ВИБРИРУЮЩЕЙ МИШЕНИ ДЛЯ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ СКАНИРОВАНИЯ

М.А. АГИНЯН¹, Г.С. АРУТЮНЯН¹, С.Г. АРУТЮНЯН¹, С.А. БАДАЛЯН²,
М. CHUNG³, Э.Г. ЛАЗАРЕВА^{1*}, А.В. МАРГАРЯН¹, М.А. ТУМАНЯН¹

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

²Институт точной механики и вычислительной техники
им. С.А. Лебедева, Москва, Россия

³Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan, Korea

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

(Поступила в редакцию 22 февраля 2019 г.)

Работа посвящена изучению сканирования поперечного профиля пучка с помощью вибрирующей струны. Разработан новый алгоритм, позволяющий использовать метод резонансной вибрирующей мишени для больших скоростей сканирования. В основе метода лежит идея измерения вторичных/отраженных частиц/излучения, образующихся в результате взаимодействия частиц пучка с материалом струны, синхронно с частотой колебания струны. Предложенный алгоритм использования дифференциального сигнала с инверсией знака на последовательных измерениях с полупериодов колебания струны обобщен для случая, когда скорость сканирования много больше средней скорости колебания струны.

1. Введение

В основе традиционных методов сканирования лежит достаточно простая идея одновременного измерения положения сканирующей пучок проволоки и сигнала с этой проволоки [1]. Используются сканеры с отдельной системой детектирования вторичных частиц/излучения [2]. Обычно эта система располагается на достаточно большом расстоянии от месторасположения проволоки и помимо полезного сигнала с проволоки регистрирует достаточно большой фон частиц и излучения, рассеянных в результате других процессов. Сканеры, регистрирующие ток вторичных зарядов, образующихся в струне в результате взаимодействия частиц пучка с материалом струны, имеют преимущество сосредоточенности измерительной установки в одном узле, однако требуют измерений малых токов (до пА) аналоговыми методами [3]. Повышение скорости сканирования при этом является одной из актуальных задач [4].

В работах [5–6] в качестве измерительного сигнала предложено использовать частоту вибрирующей струны, зависящую от ее температуры, которая в свою очередь следит за распределением плотности частиц в пучке. Метод более чувствительный, чем предыдущие два, однако, в силу теплового принципа действия он инерционен (время измерения в фиксированном положении струны в лучшем случае составляет доли секунды). В работе [7] ряд отражений от вибрирующей струны в течение одного полупериода был использован для измерения профиля тонких пучков. Поперечный размер пучка – порядка амплитуды колебаний струны.

В работах [8–9] было предложено в качестве проволоки – мишени также использовать вибрирующую струну, однако, измерение рассеянных/отраженных частиц/фотонов было предложено производить синхронно (резонансно) с колебаниями струны. Попарное измерение этих частиц/фотонов в крайних положениях струны в процессе ее колебаний позволяет использовать процедуру дифференцирования этого сигнала, которая отсекает постоянную компоненту фона. В [9] было подчеркнуто, что для выделения пространственной компоненты распределения измеряемого пучка требуется последовательное применение процедуры дифференцирования с инверсией знака на каждом полупериоде колебаний. В итоге отсекаются также временные флуктуации фона. Такой метод был назван резонансным методом вибрирующей струны. В работе [9] приведено ограничение на скорость сканирования v_s , которое выведено из условия, что скорость сканирования много меньше средней скорости струны на ее полупериоде $v_w = 4AF$, где A – амплитуда колебаний струны (максимальное смещение центральной точки струны от ее равновесного положения), F – частота колебаний струны (предполагается, что струна колеблется на первой гармонике).

2. Теоретическая модель

В данной работе разработан метод, позволяющий производить сканирование на скоростях много больших средней скорости струны в процессе ее колебаний v_w . Метод опробован на модельном пучке.

Для определенности рассматривается процесс сканирования лазерного пучка. Данное предположение не ограничивает применение метода, однако в дальнейшем позволяет использовать термины «отраженные фотоны», «фотоны пучка» без потери общности.

2.1. Медленное сканирование лазерного пучка ($v_s \leq v_w$)

Рассмотрим сканирование лазерного пучка в случае, когда скорость сканирования меньше средней скорости движения струны в процессе ее колебаний.

Учитывая, что струна в процессе колебаний совершает одновременно два движения – равномерное и колебательное, для положения центра вибрирующей струны в направлении x воспользуемся формулой вида:

$$x_w = v_s * t + A * \cos(2\pi Ft), \quad (1)$$

где член $v_s * t$ описывает движение проекций точек закрепления струны на ось сканирования x , проведенной через центр струны (предполагается, что струна перпендикулярна этой оси). В дальнейшем движение проекций точек закрепления струны будем называть движением сканера.

Введем параметр периода колебаний струны $T = 1 / F$ и соответственно набор моментов времени измерения через каждый полупериод:

$$t_i = iT / 2, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Соответствующие положения центра струны записываются в виде

$$x_w^i = iv_s T / 2 \pm A, \quad (3)$$

где знак «+» берется для четных i и знак «-» для нечетных i .

Идея резонансного сканирования заключается в измерении отраженных фотонов пучка в предельных положениях струны в процессе ее колебаний.

Пусть $P(x)$ распределение фотонов пучка. Тогда количество измеряемых отраженных фотонов записывается в виде:

$$S_i = k * P(x_w^i) = k * P(iv_s T / 2 \pm A), \quad (4)$$

где знак «+» берется для четных i и знак «-» для нечетных i , постоянный коэффициент k определяет пропорциональность между количеством падающих на струну и отраженных фотонов. Поскольку мы интересуемся только относительными измерениями профиля без ограничения общности в дальнейшем, положим $k = 1$. По последовательным измерениям числа отраженных фотонов можно найти локальное значение градиента профиля в виде

$$G_i = (P(x_w^i) - P(x_w^{i-1})) / (x_w^i - x_w^{i-1}), \quad (5)$$

если $x_w^i > x_w^{i-1}$, и

$$G_i = (P(x_w^{i-1}) - P(x_w^i)) / (x_w^{i-1} - x_w^i), \quad (6)$$

если $x_w^{i-1} > x_w^i$.

То, что оба случая возможны, показывает рис.1, где представлены значения x_w^i от времени (индекса i). Параметры модели следующие: $v_s = 10$ мм/с, $A = 0.05$ мм, $F = 1000$ Гц, так что средняя скорость движения струны равна 200 мм/с. Как видно последовательные положения струны по полупериодам осциллируют с небольшим возрастанием среднего значения.

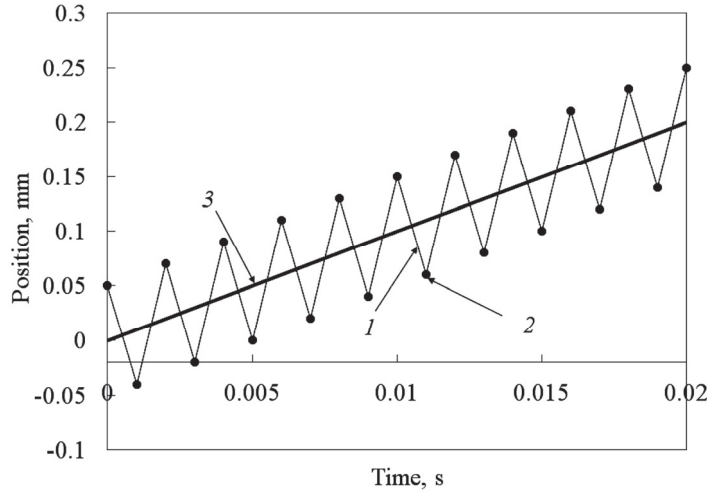


Рис.1. Зависимость координаты центра вибрирующей струны от времени: ломаная 1 – соединяет кружочки, 2 – положения максимальных отклонений струны, прямая линия 3 – положение сканера.

На рис.1 представлено движение центра вибрирующей струны со скоростью меньшей средней скорости колебаний струны.

Как видно из рисунка, последовательные положения струны возрастают немонотонно. Формулы (5, 6) перепишем в виде

$$G_i = (S_i - S_{i-1}) / (v_s T / 2 + 2A) = (P(iv_s T / 2 + A) - P((i-1)v_s T / 2 - A)) / (v_s T / 2 + 2A), \quad (7)$$

для четных i и

$$G_i = -(S_i - S_{i-1}) / (-v_s T / 2 + 2A) = (P((i-1)v_s T / 2 + A) - P(iv_s T / 2 - A)) / (-v_s T / 2 + 2A), \quad (8)$$

для нечетных i .

В случае, если $v_s T / 2 \ll 2A$ (условие того, что скорость сканирования много меньше средней скорости струны на ее полупериоде) формулы (7, 8) можно упростить

$$G_i = (S_i - S_{i-1}) / 2A = (P(iv_s T / 2 + A) - P((i-1)v_s T / 2 - A)) / 2A, \quad (9)$$

для четных i и

$$G_i = -(S_i - S_{i-1}) / 2A = (P((i-1)v_s T / 2 + A) - P(iv_s T / 2 - A)) / 2A, \quad (10)$$

для нечетных i .

По последовательным значениям градиента пучка интегрированием (фактически суммированием по индексу i) находится исходный профиль пучка.

Продемонстрируем процесс на примере медленного сканирования

модельного пучка, распределение фотонов которого в поперечном направлении x задается формулой

$$P(x) = 1 + \cos(\pi(1 + x / x_0)), \text{ для } 0 \leq x \leq 2x_0, \quad (11)$$

где $2x_0$ – полуширина пучка.

В дальнейшем мы будем использовать различные соотношения скоростей сканирования и колебания струны. Удобнее это сделать изменением амплитуды колебаний струны, сохраняя при этом частоту колебаний струны и вид профиля фотонного пучка, а также скорости сканирования. При этом будет сохранено количество точек измерения, что даст возможность сравнивать различные конфигурации соотношения скоростей.

Из рисунка видно, что проинтегрированный дифференциальный сигнал с инверсией знака (формулы (9, 10)) практически совпадает с исходным распределением.

Приведем пример эксперимента по медленному сканированию лазерного пучка. Сканирование осуществлялось с помощью маятника с плечом ≈ 1 м, на котором был закреплен датчик с вибрирующей струной. Лазер и фотодиод были закреплены на отдельной платформе так, чтобы при пересечении струной лазерного пучка часть отраженных от струны фотонов попадала в апертуру фотодиода. Однако на фотодиод попадали также фотоны лазерного пучка, отраженные от других частей датчика и внешний фон от искусственного освещения. В предыдущей обработке математической модели (см. рис.2) предполагалось, что сканирование совершается с постоянной скоростью. На рис.3 представлены измерения фотодиода, соответствующие двум последовательным прохождением струной

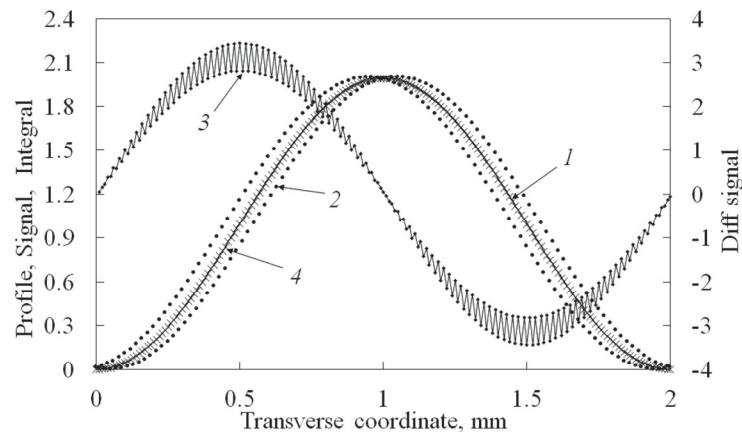


Рис.2. Медленное сканирование фотонного пучка вибрирующей струной. Сплошная линия 1 – профиль пучка, кружочки 2 – последовательные измерения по полупериодам колебаний струны, 3 – дифференциальный сигнал, крестики 4 – проинтегрированный дифференциальный сигнал.

лазерного пучка. Здесь же представлен дифференциальный сигнал. В случае с маятником это не так: маятник доходит до своего предельного положения и начинает двигаться в противоположном направлении, причем скорость движения не постоянна. На рис.3 приводится простое суммирование дифференциального сигнала без учета этого обстоятельства.

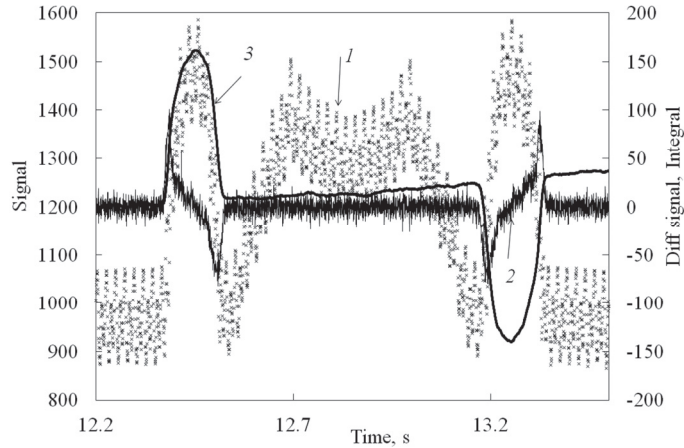


Рис.3. Результаты сканирования лазерного пучка сканером, закрепленным на плече маятника. Крестики 1 – измерение фотодиода, 2 – дифференциальный сигнал, сплошная линия 3 – суммирование дифференциального сигнала.

На графике сигнала с фотодиода четко просматривается 50 Гц – компонента освещения. Видно также, что дифференциальный сигнал полностью отсекает эту компоненту, а также центральное плато сигнала с фотодиода, которое связано с фотонами, отраженными от механических элементов датчика (невибрирующей струны). На рис.3 представлено также суммирование дифференциального сигнала – необходимый этап перед восстановлением профиля лазерного пучка. Видно, что профиль лазерного пучка на втором сканировании перевернут из-за того, что скорость сканирования поменяла знак. Дрейф сигнала суммы связан с тем, что суммирование не учитывает изменение скорости сканирования. Подробнее о процедуре восстановления профиля при медленном неравномерном сканировании см. в [9].

2.2. Быстрое сканирование лазерного пучка ($v_s \geq v_w$)

Предыдущие результаты были получены на базе приближенных формул (9, 10). Однако точными формулами (7, 8) можно пользоваться только при условии $v_s < v_w$, так как знаменатель в формуле уменьшается и даже может обнулиться. На рис.4 показано несколько графиков зависимости центральной точки движущейся струны в зависимости от амплитуды колебаний. В случае $A =$

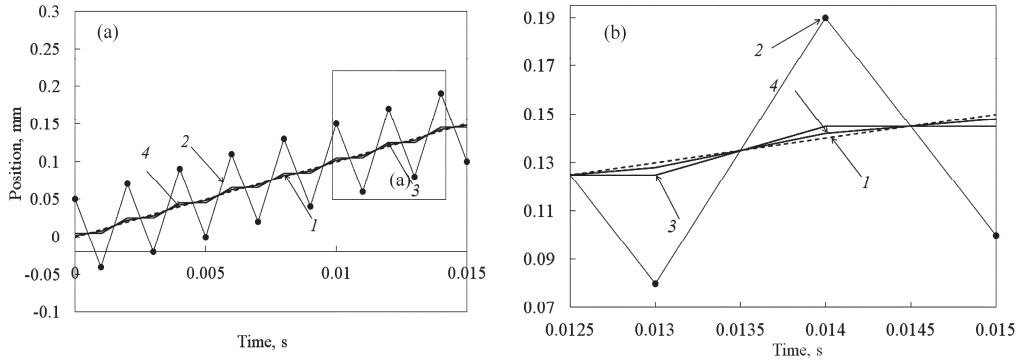


Рис.4. (а) Положения сканера и центра вибрирующей струны на последовательных полупериодах колебаний для различных значений амплитуд: пунктирная линия 1 – положение сканера, 2, 3 и 4 – положения струны с амплитудами колебаний $A = 0.05$ мм (медленное движение), $A = 0.005$ мм (скорость движения сканера равна скорости движения струны) и $A = 0.002$ мм (скорость движения сканера в 2.5 раза превышает скорость движения струны) соответственно. (б) Фрагмент в увеличенном масштабе.

0.005 мм, v_w – средняя скорость колебания струны сравнивается со скоростью сканирования $v_s = 10$ мм/с и на полупериоде, когда струна совершает движение против движения сканирования, положения центра струны в начале и в конце этого полупериода совпадают. Это соответствует обнулению знаменателя в формуле (8). В случае, когда $v_s \geq v_w$ положение центра струны при сканировании монотонно возрастает, приближаясь к графику положения точки закрепления струны (на рис.4 – это график, соответствующий $A = 0.002$ мм, при этом $v_w = 4$ мм/с).

Для случая $v_s \geq v_w$ предлагается продолжать пользоваться формулами (9, 10) с инверсией знака на последовательных полупериодах, хотя итоговый дифференциальный сигнал далек от реального градиента пучка. Далее предлагается проинтегрировать сформированный таким образом дифференциальный сигнал и, наконец, применить процедуру текущего среднего интегрального сигнала по двум последовательным точкам. Математически все это выглядит так – вычисляется дифференциальный сигнал

$$\begin{aligned} G_i &= (S_{i-1} - S_i) / 2A, \quad i = 1, 3, 5, \dots, \\ G_i &= (S_i - S_{i-1}) / 2A, \quad i = 2, 4, 6, \dots \end{aligned} \quad (12)$$

Далее вычисляется интегральный сигнал

$$I_i = I_{i-1} + \Delta_s G_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (13)$$

где $\Delta_s = v_s T / 2$ смещение сканера в течение полупериода колебаний струны. В итоге вычисляется текущее среднее от интегрального сигнала по двум последовательным точкам

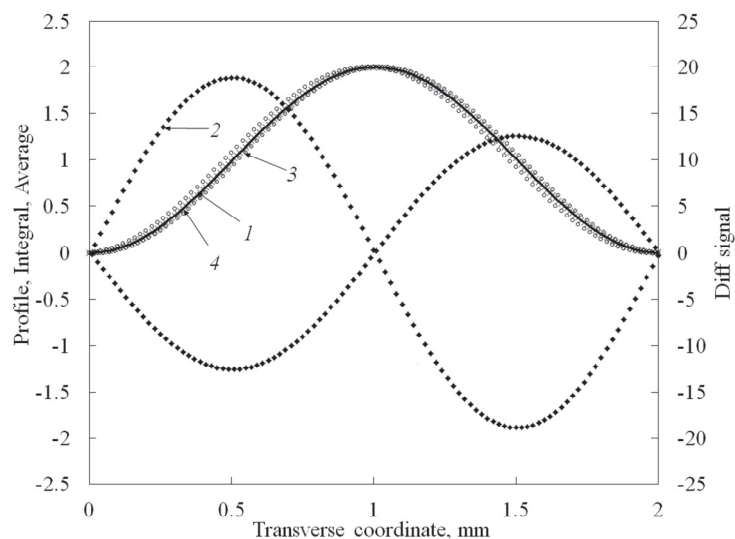


Рис.5. Восстановление профиля пучка при амплитуде $A = 0.001$ мм. Сплошная линия 1 – профиль фотонного пучка, ромбики 2 – дифференциальный сигнал, кружочки 3 – проинтегрированный дифференциальный сигнал, крестики 4 – усредненный от 3 сигнал.

$$\bar{I}_i = (I_i + I_{i-1}) / 2, i = 1, 2, 3, \dots \quad (14)$$

Результат процедур (12–14) при амплитуде $A = 0.001$ мм показан на рис.5.

На рис.6 к предыдущему результату добавлены результаты применения алгоритма (12–14) к положению сканера. Как видно из рисунка, в итоге получается нулевой результат.

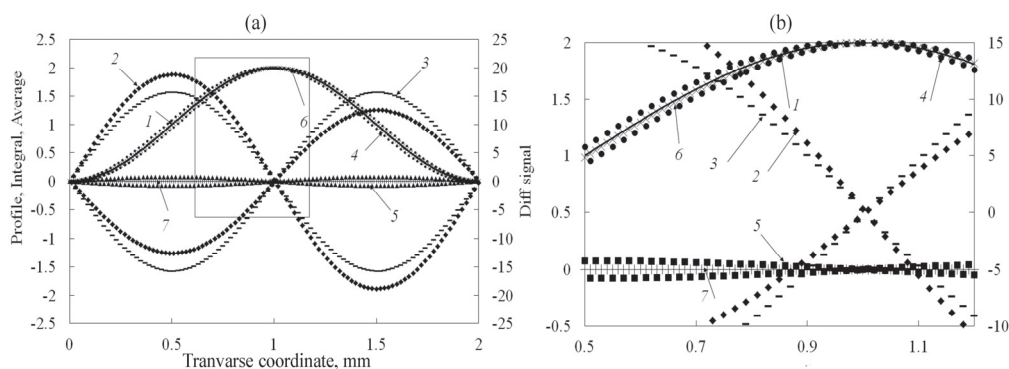


Рис.6. (а). Восстановление профиля пучка при амплитуде $A = 0.001$ мм и применение алгоритма к невибрирующей струне. Сплошная линия 1 – профиль фотонного пучка, ромбики 2 и дефисы 3 – дифференциальные сигналы от вибрирующей и невибрирующей струны соответственно, кружочки 4 и треугольники 5 – проинтегрированные сигналы 2 и 3, косые крестики 6 и прямые крестики 7 – сигналы, усредненные от 4 и 5. (б). Фрагмент в увеличенном масштабе.

Метод можно применить также при гораздо большем соотношении скоростей: $v_s = 10$ мм/с, $v_w = 0.2$ мм/с (см. рис.7). Представлены также результаты применения алгоритма (12–14) для движения невибрирующей струны (сканера).

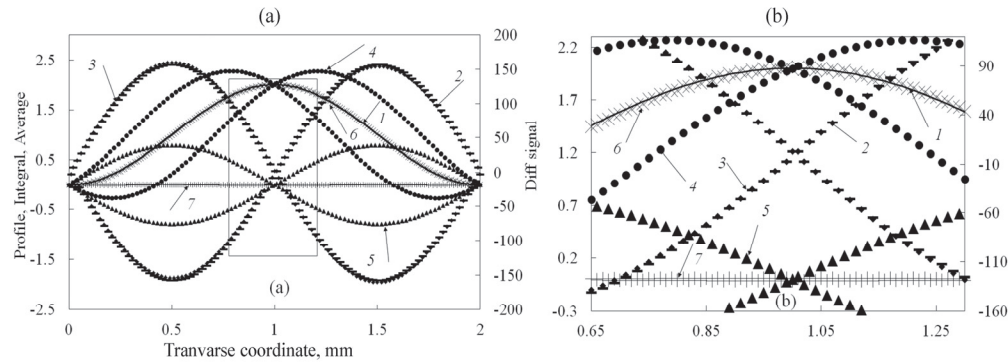


Рис.7. (а) Восстановление профиля пучка при амплитуде $A = 0.0001$ мм и применение алгоритма к невибрирующей струне. Сплошная линия 1 – профиль фотонного пучка, ромбики 2 и дефисы 3 – дифференциальные сигналы от вибрирующей и невибрирующей струны соответственно, кружочки 4 и треугольники 5 – проинтегрированные сигналы 2 и 3, косые крестики 6 и прямые крестики 7 – сигналы, усредненные от 4 и 5. (б) Фрагмент в увеличенном масштабе.

2.3. Модель с фоном

Введем в нашу модель фон, зависящий от времени, но однородный в пределах апертуры фотодиода. Математически это означает, что вместо (4) следует использовать формулу вида

$$S_i = P(x_w(t_i)) + \Phi(t_i). \quad (15)$$

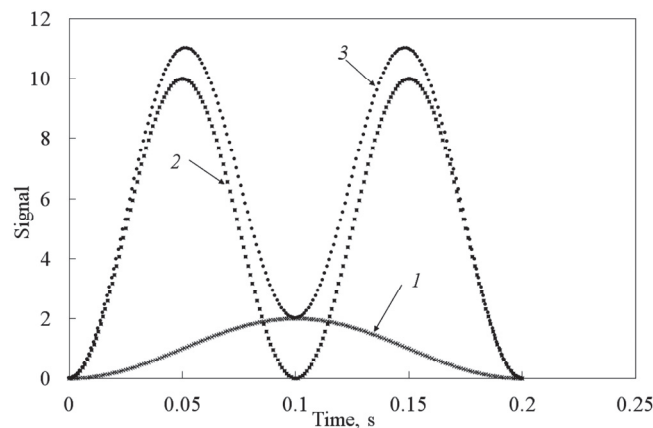


Рис.8. Зависимость показаний фотодиода от времени: крестики 1 – отражения от вибрирующей струны, квадратики 2 – фон, кружочки 3 – полный сигнал с фотодиода.

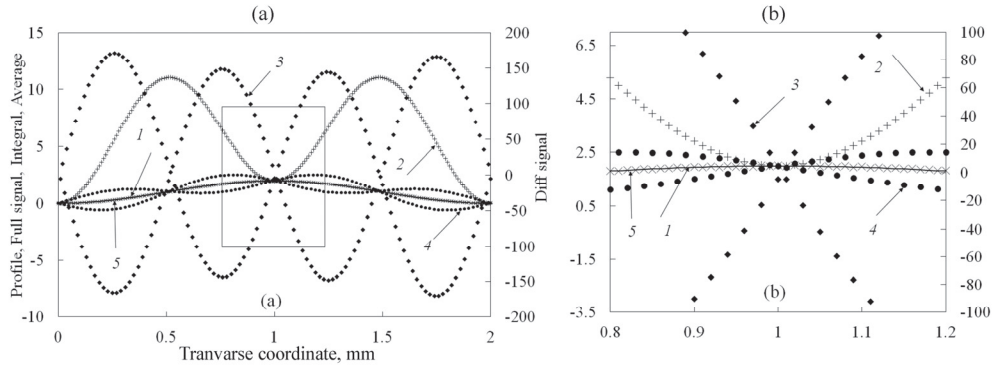


Рис.9. (а) Восстановление профиля при амплитуде $A = 0.001$ мм в присутствии фона. Сплошная линия 1 – профиль фотонного пучка, прямые крестики 2 – полный сигнал с фотодиода, ромбики 3 – дифференциальный сигнал, кружочки 4 – проинтегрированный дифференциальный сигнал, косые крестики 5 – усредненный от 4 сигнал. (б) Фрагмент в увеличенном масштабе.

В наших моделях мы фиксировали значение скорости сканирования 10 мм/с. Весь процесс сканирования пучка с шириной 2 мм длится 0.2 с. Рассмотрим фон с двумя осцилляциями в течение этого времени

$$\Phi(t) = B(1 + \cos(\pi(1 + 4t / t_0))) , \quad (16)$$

где $t_0 = 2x_0 / v_s$ время сканирования, $2B$ – максимальное значение фона.

На рис.8 показан суммарный сигнал с фотодиода, содержащий компоненту отражений от вибрирующей струны при амплитуде $A = 0.001$ и большой фон.

Процесс выделения профиля по алгоритму (12–14) изображен на рис.9.

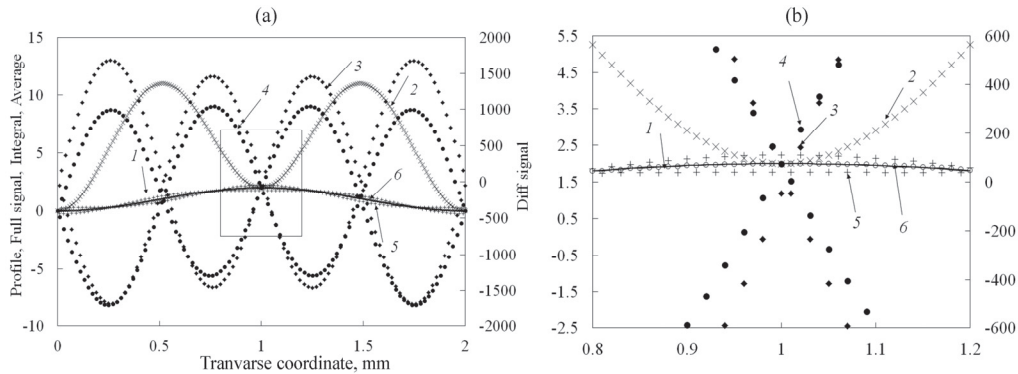


Рис.10. (а) Восстановление профиля при амплитуде $A = 0.0001$ мм в присутствии фона. Сплошная линия 1 – профиль фотонного пучка, косые крестики 2 – полный сигнал с фотодиода, ромбики 3 – дифференциальный сигнал, кружочки 4 – проинтегрированный дифференциальный сигнал, прямые крестики 5 – усредненный от 4 сигнал, полые кружочки 6 – второе усреднение сигнала 4. (б) Фрагмент в увеличенном масштабе.

Если соотношение скорость сканирования/скорость струны увеличить (амплитуда $A = 0.0001$ мм), усреднение от интегрального сигнала (треугольники на рис.10) еще не налагается на профиль пучка. Еще одно усреднение этого сигнала по текущему среднему, аналогичному (14), восстанавливает профиль пучка с хорошей точностью.

На рис.11 изображен случай, когда на фотодиод не падают фотоны отраженные от вибрирующей струны (отсутствует первый член справа в формуле (15)).

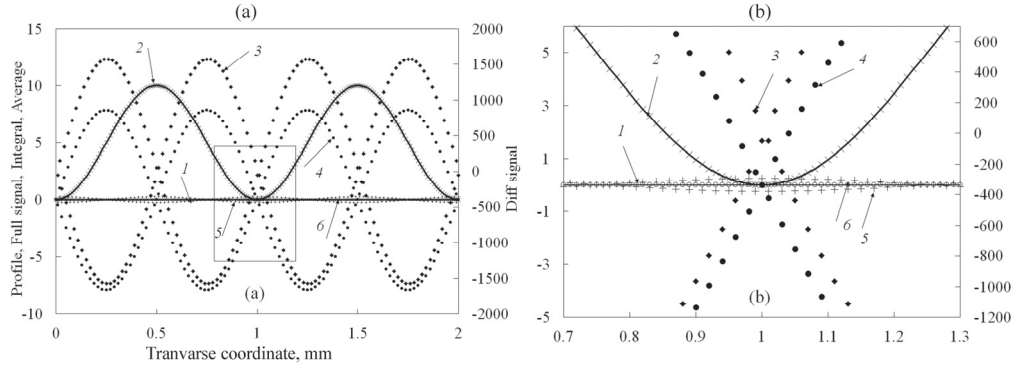


Рис.11. (а) Применение алгоритма восстановления пучка к фону. Сплошная линия 1 – профиль фотонного пучка, косые крестики 2 – полный сигнал с фотодиода, ромбики 3 – дифференциальный сигнал, кружочки 4 – проинтегрированный дифференциальный сигнал, прямые крестики 5 – усредненный от 4 сигнал, полые кружочки 6 – второй усредненный сигнал. (б) Фрагмент в увеличенном масштабе.

Как следует из рис.11, фон не дает никакого вклада в конечный результирующий сигнал, что еще раз подтверждает исключительную способность алгоритма отфильтровывать только полезный сигнал, образующийся от взаимодействия с вибрирующей струной.

3. Заключение

Разработан новый алгоритм в случае, когда скорость сканирования много больше средней скорости колебания струны. Метод позволяет существенно сократить время сканирования пучка. Алгоритм использования метода отработан в присутствии фонов отражения лазерного пучка от конструкции сканера и внешнего нестабильного излучения.

Возможность уменьшения амплитуды колебаний вибрирующей струны полезна также с точки зрения повышения стабильности колебаний.

Предложенный алгоритм достаточно универсален и может быть использован для измерения профилей пучков заряженных частиц, нейтронов и электромагнитного излучения в широком диапазоне спектра.

В случае профилирования пучков ускорителей возможно потребуются использование детекторов частиц высоких энергий (сцинтиллятор плюс фотоэлектронный умножитель). Однако, с учетом высокой степени избирательности предложенной схемы не исключено, что можно будет использовать фотодиоды для рентгеновского диапазона.

Метод может быть полезен для обнаружения объектов, содержащих колеблющиеся с известной частотой составные части, например, пропеллеры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **K. Wittenburg.** Specific Instrumentation and Diagnostics for High Intensity Hadron Beams, DESY, Hamburg, Germany, 2013, p. 21.
2. **P. Tenenbaum, T. Shintake.** Annual Review of Nuclear and Particle Science, **49**, 125 (1999).
3. **W.T. Weng, I-H. Chiang, G.A. Smith, A. Soukas.** IEEE Transactions on Nuclear Science, **10**, 2331 (1983).
4. **H. Akikawa.** Proc. Linear Accelerator Conference, August, Knoxville, USA, 2006, p. 21.
5. **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).
6. **S.G. Arutunian.** Beam Instrumentation Workshop, BIW08, USA, 2008, p. 1.
7. **E.G. Lazareva.** J. Contemp. Phys. (Armenian Ac. Sci.), **53**, 136 (2018).
8. **S.G. Arutunian, A.V. Margaryan.** Proceedings of International Particle Accelerator Conference IPAC2014, Dresden, Germany, 2014, p. 3412.
9. **S.G. Arutunian, M. Chung, G.S. Harutyunyan, A.V. Margaryan, E.G. Lazareva, L.M. Lazarev, L.A. Shahinyan.** Review of Scientific Instruments, **87**, 023108 (2016).

DEVELOPMENT OF NEW ALGORITHM IN THE METHOD OF A RESONANT VIBRATING TARGET FOR LARGE SCANNING SPEEDS

M.A. AGINYAN, G.S. HARUTYUNYAN, S.G. ARUTUNIAN, S.A. BADALYAN,
M. CHUNG, E.G. LAZAREVA, A.V. MARGARYAN, M.A. TUMANYAN

The work is devoted to the study of scanning the transverse profile of a beam using a vibrating wire. A new algorithm has been developed that allows the use of a resonant vibrating target method for high scanning speeds. The method is based on the idea of measuring secondary/reflected particles/radiation generated from the interaction of the beam particles with the wire material, synchronously with the frequency of the wire oscillation. The proposed algorithm for using a differential signal with sign inversion on consecutive measurements from half-periods of wire oscillations is generalized for the case when the scanning speed is much higher than the average speed of the wire oscillation.