

Двухканальный измеритель параметров сальтирующих песчинок

А. А. ТИТОВ, С. Ф. МИРСАИТОВ

Московский государственный университет приборостроения и информатики, Москва, Россия, e-mail: dor7338@mail.ru

Предложен двухканальный измеритель размеров, формы и скорости сальтирующих песчинок, основанный на проекционном и гетеродинном методах измерений.

Ключевые слова: сальтирующие песчинки, частотомер, фазовый детектор, лазер, акустооптический модулятор, фотоприемник, микроскоп.

The two-channel instrument for size, forms and the speed of somersault turning sand grains based on the projection and heterodyne measurement methods is suggested.

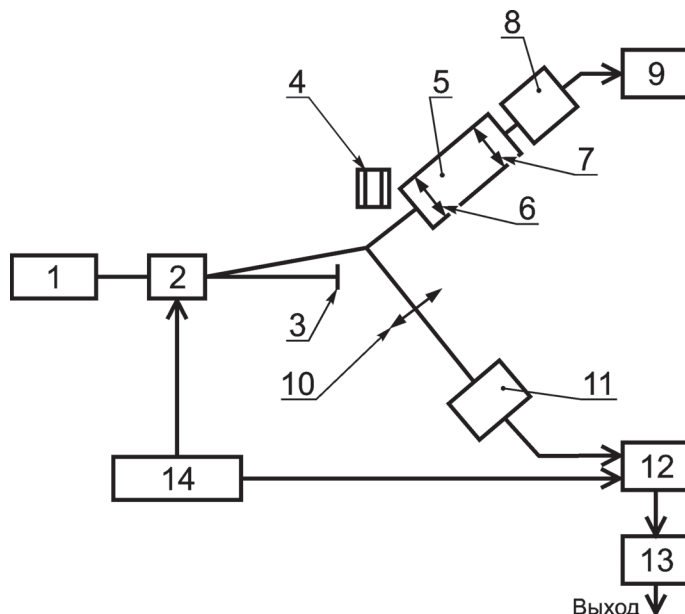
Key words: somersault turning sand grains, frequency meter, phase detector, laser, acousto-optical modulator, photodetector, microscope.

В настоящее время одной из серьезных экологических проблем является опустынивание территорий, происходящее из-за ветровой эрозии почв и переноса песка. Под действием ветра происходит сальтация — поднятие частиц песка. Для изучения явления сальтации измеряют песчинки и строят их распределение по размерам [1]. Для более полного изучения процесса сальтации ранее был предложен проекционный метод, позволяющий измерять не только размеры, но и форму песчинок [2]. Однако при этом не измеряется скорость движения песчинок, которая очень важна для оценки времени опустынивания территории. Метод измерения размеров и скорости частиц предложен в [3], но данным методом невозможно измерить форму песчинок. Поэтому в настоящей статье предложен двухканальный измеритель размеров, формы и скорости песчинок, схема которого приведена на рисунке.

Полупроводниковый лазерный модуль 1 освещает расширенным пучком акустооптический модулятор (АОМ) 2, на который из блока управления 14 подаются сигналы с двумя близко расположенными частотами, что позволяет сформировать в дифрагированном пучке интерференционную картину [4]. Пучок нулевого порядка задерживается экраном 3. С помощью трубки 4 песчинки вводятся в измерительный объем. При пролете пучка свет на песчинках рассеивается и приходит на два измерительных канала. Первый канал состоит из микроскопа 5, цифрового фотоаппарата 8 и компьютера 9; во второй канал входят объектив 10, фотоприемник 11, фазовый детектор 12, частотомер 13, блок управления 14. Рассмотрим работу указанных каналов измерения. В первом канале микроскоп увеличивает изображения песчинок. Цифровой фотоаппарат работает в режиме видеозаписи и регистрирует процесс пролета песчинок в измерительной области, затем передает полученные данные на компьютер, который с помощью специальной программы осуществляет покадровое воспроизведение видеозаписи. Далее каждый кадр обрабатывается на компьютере. При этом можно определить количество песчинок в кадре, их размер и форму, для чего необходима разработка программного обеспечения по оцифровке изображения песчинок.

Устройство и характеристики первого канала подробно рассмотрены в [2]. Следует отметить, что в отличие от [2] в данной работе песчинка пересекает интерференционную картину, однако эта картина не может быть зафиксирована с помощью фотоаппарата из-за его низкого быстродействия. Действительно, скорость записи современных фотоаппаратов составляет 25—100 кадров/с, а частота изменения интерференционной картины составляет 1,3 МГц, что будет показано далее.

Рассмотрим второй канал измерения. При пролете песчинкой интерференционной картины рассеянный на ней свет приобретает доплеровский сдвиг частоты. Для его выделе-



Двухканальный измеритель параметров сальтирующих песчинок:
1 — лазерный модуль; 2 — акустооптический модулятор; 3 — экран; 4 — трубка; 5 — микроскоп (объектив 6 и окуляр 7); 8 — цифровой фотоаппарат; 9 — компьютер; 10 — объектив; 11 — фотоприемник; 12 — фазовый детектор; 13 — частотомер; 14 — блок управления

ния рассеянный пучок собирается объективом и направляется на фотоприемник. Сигнал с фотоприемника поступает на первый вход фазового детектора, а на его второй вход подается опорный сигнал с блока управления (см. рис.), частота соответствует частоте сигнала, подаваемого на АОМ. Фазовый детектор выделяет сигнал с доплеровским сдвигом частоты, измеряемой частотомером. Проведем оценку параметров этого канала. По аналогии с [2] выберем лазерный модуль мощностью 0,01 Вт с длиной волны излучения 0,65 мкм и диаметром пучка 5 мм. В качестве материала АОМ используем парателлурит, скорость распространения звука в котором 617 м/с. Размер песчинок находится обычно в диапазоне 20—200 мкм, а максимальная скорость может достигать 10 м/с [1]. Используя эти данные, определим параметры устройства. У фотоприемника найдем мощность падающего на него излучения, а также частоту сигнала. Используя результаты работ [5, 6], получим следующее выражение для мощности сигнала на фотоприемнике:

$$P_{\text{фп}} = PS_{\text{ч}} \rho \tau M \sin^2(\varphi) \cos \alpha S_{\text{п}}^{-1}, \quad (1)$$

где P — мощность излучения лазерного модуля; $S_{\text{п}}$ — площадь пучка в месте пролета песчинок; $S_{\text{ч}}$ — площадь песчинки; φ — апертурный угол объектива; α — угол между нормалью к песчинке и направлением на объектив; ρ — коэффициент отражения песчинки; τ — потери в оптике и АОМ; M — коэффициент модуляции, зависящий от периода интерференционной картины и размера частицы.

Коэффициент $M = 0,8$ при соблюдении соотношения

$$a/\Lambda = 0,4, \quad (2)$$

где a — диаметр песчинки; Λ — период интерференционной картины.

При максимальном размере песчинки, равном 200 мкм, из (2) находим период интерференционной картины $\Lambda = 0,5$ мм. Используя [4] и указанные выше параметры АОМ, вычислим управляющую частоту, подаваемую на АОМ с блока 12:

$$f = V_{\text{зв}}/\Lambda = 1,234 \text{ МГц}, \quad (3)$$

где $V_{\text{зв}}$ — скорость звука в АОМ.

Доплеровский сдвиг частоты определим из выражения

$$f_{\text{д}} = V_{\text{п}}/\Lambda = 20 \text{ КГц}, \quad (4)$$

где $V_{\text{п}}$ — скорость движения песчинки.

Найдем остальные параметры, входящие в (1). Для расчета возьмем минимальный размер песчинки 20 мкм, диаметр пучка лазерного модуля — 5 мм. Остальные параметры выберем в соответствии с [2, 5, 7]: $\sin \varphi = 0,4$; $\tau = 0,5$; $\rho = 0,2$; $\cos 45^\circ = 0,7$. Подставив эти значения в (1), получим $P_{\text{фп}} = 3,5 \cdot 10^{-8}$ Вт.

Для уменьшения габаритных размеров устройства выберем в качестве фотоприемника быстродействующий фотодиод типа ЛФДГ-150, имеющий пороговую чувствительность $W = 5 \cdot 10^{-12}$ А/Гц^{0,5}. Диапазон воспроизводимых фотоприемником частот с учетом (3), (4) равен $\Delta f = f + f_{\text{д}} = 1,254$ МГц.

Минимально обнаруживаемую фотоприемником мощность находим из выражения

$$P_{\text{мин}} = \Delta f^{0,5} W = 5,6 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}. \quad (5)$$

Отношение сигнал—шум с учетом (1), (5) будет $C/\text{Ш} = P_{\text{фп}}/P_{\text{мин}} = 6,25$. Такая величина вполне достаточна для надежного воспроизведения информации.

Оценим возможности первого канала. Для расчета поступающего в микроскоп светового потока от песчинки используем выражение (1). Тогда с учетом (1) и [2] выведем выражение для освещенности матрицы фотоприемников цифрового фотоаппарата:

$$E = P_{\text{рт}} M \sin^2 \varphi \cos \alpha S_{\text{п}}^{-1} \beta_{\text{с}}^{-2}, \quad (6)$$

где $\beta_{\text{с}}$ — увеличение микроскопа и цифрового фотоаппарата.

Как показано в [2], $\beta_{\text{с}} = 12,5$, тогда подставив его и значения указанных выше параметров в (6), вычислим $E = 69,2$ лк, что выше пороговой освещенности для выбранного фотоаппарата, равной 0,63 лк.

Оценим, при каких возможных концентрациях песчинок можно измерять их параметры. Эксперименты из [2] показали, что для данного микроскопа измерительный объем составляет около 1 мм³. Приняв для примерной оценки сферическую форму песчинок, определим их объем для границ диапазона 20—200 мкм. В результате получим соответственно $4,19 \cdot 10^{-6}$ и $4,19 \cdot 10^{-3}$ мм³. Учитывая, что для измерений необходимо обеспечить расстояние между песчинками, предположим, что используется только половина измерительного объема. Тогда для указанного диапазона значения концентраций составят 119000 и 119 1/мм³, соответственно.

Точность измерений соответствует оценке, сделанной в [2, 3]: для размеров песчинок — 1,2 %, а для их скорости — 5 %.

Таким образом, введение второго канала измерений позволяет расширять функциональные возможности устройства.

Л и т е р а т у р а

1. **Титов А. А., Горчаков Г. И., Бунтов Д. В.** Параметры нижнего слоя сальтации на опустыненной территории // ДАН: Геофизика. 2009. Т. 424. № 1. С. 102—106.
2. **Титов А. А., Коновалов И. Н.** Измерение размеров сальтирующих песчинок проекционным методом // Измерительная техника. 2010. № 2. С. 26—28; **Titov A. A., Kononov I. N.** Measurement of dimensions of paltationing sandstone by a projection method // Measurement Techniques. 2010. V. 53. N. 2. P. 153—155.
3. **Титов А. А., Мирсаитов С. Ф.** Измерение размеров и скорости частиц аэрозоля // Метрология. 2013. № 1. С. 18—23; **Titov A. A., Mirsaitov S. F.** Measurement of Size and Speed of Aerosol Particles // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 3. P. 259.
4. **Титов А. А., Амурский В. В., Гарипов В. К.** Методы построения и расчета лазерных измерительных и запоминающих устройств. М.: Машиностроение, 2008.
5. **Титов А. А.** Гетеродинный измеритель скорости и направления падения дождевых капель // Измерительная техника. 2008. № 11. С. 43—45; **Titov A. A.** Heterodyne meter for the velocity and direction of falling raindrops // Measurement Techniques. 2008. V. 51. N. 11. P. 1200—1203.
6. **Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И.** Теория оптических систем. М.: Машиностроение, 1999.
7. **Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С.** Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982.

Дата принятия 05.05.2014 г.