

07;12

## Разработка спекл-велосиметра для самодвижущейся установки

© А. Аливердиев,<sup>1,2</sup> М. Капонеро,<sup>1</sup> К. Морикони<sup>3</sup><sup>1</sup> Robotics and Informatics Division, ENEA Casaccia, v. Anguillarese 301, 00060 Roma, Italy<sup>2</sup> Институт Физики Дагестанского научного центра РАН, 367003 Махачкала, Россия<sup>3</sup> Applied Physics Division, ENEA Frascati, v. E. Fermi 455, 00044 Frascati, Italy  
e-mail: aliverdi@mail.ru

(Поступило в Редакцию 12 ноября 2001 г.)

В настоящей работе представлены первичные лабораторные испытания разрабатываемой технологии лазерной спекл-велосиметрии. Рассматривается использование интегральной статистики в пространственно-временной плоскости. Проводится сравнение предлагаемого метода с другими методами спекл-велосиметрии. Приведены результаты экспериментальных исследований.

### Введение

Целью настоящей работы являлась разработка прецизионного велосиметра для автономной роботизированной самодвижущейся установки („снежного кота“) в условиях Антарктики.

Интерес к этой проблеме объясняется трудностями точного измерения скорости стандартными методами в условиях возможной пробуксовки и отсутствием однозначных ориентиров на обширном снежном или ледяном поле, с чем приходится сталкиваться в условиях Антарктики. Выбор спекл-велосиметрии обусловлен ее высокой точностью и возможностью работать в этих условиях.

К настоящему времени проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, который дал достаточно хорошие и обнадеживающие результаты.

### История вопроса использования спекл-эффекта для велосиметрии

Использование спекл-эффекта для велосиметрии уже не раз обсуждалось в научной литературе. Были предложены различные подходы, основанные на привлечении как временной, так и пространственной статистик, как дифференциальной, так и интегральной по времени функций интенсивности.

В 1980 г. опубликована работа [1], в которой предложено использование временной статистики дифференциальной по времени функции. Автору удалось получить весьма точные экспериментальные результаты при измерении скорости движения образца из плексигласа. Измеряемые скорости при этом варьировались от 1  $\mu\text{m/s}$  до 1  $\text{mm/s}$ . В работе приводились достаточно простые и наглядные формулы, связывающие искомую скорость с определяемыми экспериментально статистическими величинами

$$v^2 = \frac{\lambda d}{8} \frac{R_I(0)}{R_I(0)} \quad (1)$$

без когерентного опорного луча и

$$v^2 = \frac{\lambda d}{8} \frac{R_I(0)}{R_I(0)} - \frac{\pi^2 I_r}{\langle I \rangle + 2I_r} (\Delta v)^2 \quad (2)$$

с когерентным опорным лучом, где  $R_I(\tau) = \langle I(t)I(t+\tau) \rangle - \langle I(t) \rangle \langle I(t+\tau) \rangle$ ,  $R_I(\tau) = \langle \dot{I}(t)\dot{I}(t+\tau) \rangle - \langle \dot{I}(t) \rangle \langle \dot{I}(t+\tau) \rangle$ ,  $I(t)$  — интенсивность,  $\dot{I}(t)$  — производная интенсивности по времени,  $I_r$  — интенсивность опорной волны,  $\lambda$  — длина волны,  $d$  — ширина лазерного луча в направлении движения,  $\Delta v$  — доплеровское уширение рассеянного света.

Однако необходимо отметить, что входящие в формулы (1)–(2) величины не слишком просты для расчета, и автором в заключение было предложено использование аналоговых вычислительных устройств.

Несколько иначе временная статистика дифференциальной по времени функции использовалась в работах, посвященных вибрационному анализу (например, [2]), но в данном случае постановка задачи лежала в несколько иной плоскости, чем наша, поэтому мы не будем акцентировать на ней внимание.

Использование пространственной статистики интегральной по времени функции интенсивности описано в работе [3], в которой предложено достаточно простое выражение, связывающее пространственное среднеквадратичное отклонение функции интенсивности спеклов за время усреднения (экспозиции), время усреднения и характерное „время корреляции“

$$\frac{\sigma_s}{\langle I \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\tau_c}{2T}\right) \left(1 - e^{-\frac{2T}{\tau_c}}\right)}, \quad (3)$$

где  $\sigma_s(T)$  — пространственное среднеквадратичное отклонение функции интенсивности спеклов за время усреднения,  $T$  — время усреднения,  $\tau_c$  — время корреляции. Время корреляции здесь та величина, которая непосредственно определяла скорость движения создающих спеклы рассеивателей.

Позднее метод был усовершенствован, как математически, так и экспериментально [4–7]. Несомненным достоинством данного подхода являлась простота и наглядность получаемой информации. С его помощью удавалось легко оценить пространственное распределение скоростей рассеивателей, определить, на каком участке скорость больше, а на каком — меньше. Кроме того, разработанный математический аппарат позволяет добиться достаточно высокой точности.

Следует отметить, что неотъемлемым свойством этого метода является то, что скорость оценивается независимо от ее направления, т.е. по вычисляемой таким образом скорости невозможно как определить ее направление, так и установить, что регистрируется поступательное движение или вибрация. Однако этот недостаток диалектически переходит в достоинство при измерении скорости перемещения жидкости, где рассеивающие центры движутся стохастически, а не „приклеены“ друг к другу. Описанная выше методика успешно используется в частности, в медицинской диагностике, однако для нашей задачи, как это будет показано далее, ее трудно признать оптимальной.

## Постановка задачи

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что спекл-велосиметрия неплохо зарекомендовала себя, ее использование для определения скорости самодвижущейся установки требует проведения комплекса дополнительных исследований. Именно эти исследования и являлись основной целью настоящей работы.

Выбор спекл-велосиметрии обусловлен ее относительно высокой точностью и возможностью работы в условиях, когда выбор ориентира крайне затруднен. Далее предполагается оснащение установки двумя велосиметрами: описанными ниже спекл-велосиметром и доплеровским велосиметром, что позволит осуществить сравнительный анализ двух методик измерения.

В рамках поставленной задачи нами был проделан комплекс теоретических и экспериментальных работ, включающий в себя разработку математического и программного обеспечения велосиметрии плоского экрана с использованием спекл-эффекта и проведение пробных лабораторных экспериментов (рис. 1).

## Решение поставленной задачи с привлечением интегральной статистики

Рис. 2 демонстрирует спекл-фотографию, полученную на образце из пенопласта, имеющем неоднородный рельеф, что максимально имитирует ледяную поверхность.

Рассмотрим теперь разрешенную по времени картину, в которой оставим только одну пространственную координату (рис. 3). Очевидно, что тангенс угла наклона временных следов каждого спекла определяет скорость

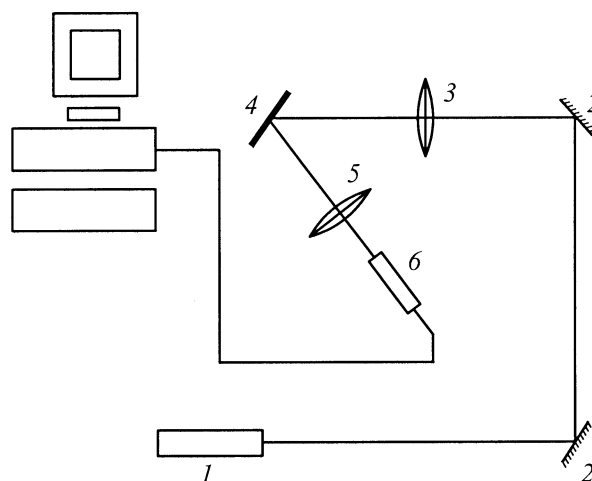


Рис. 1. Блок-схема лабораторной установки.

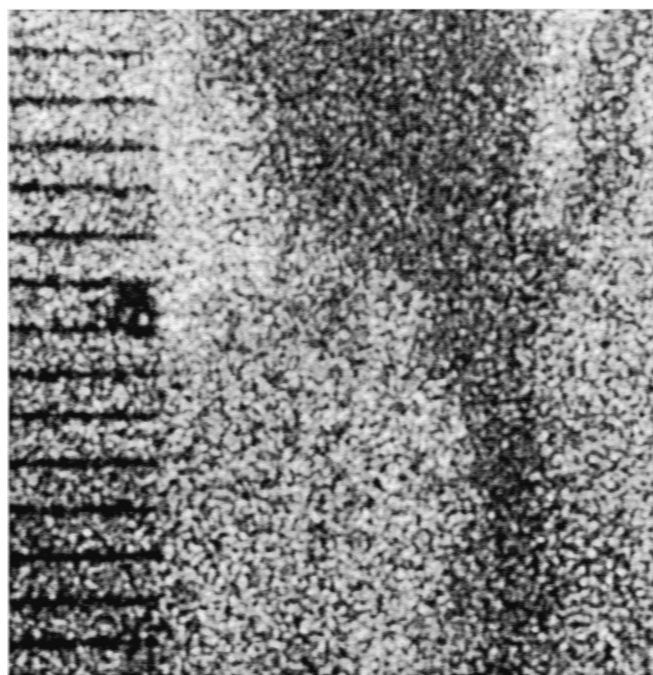
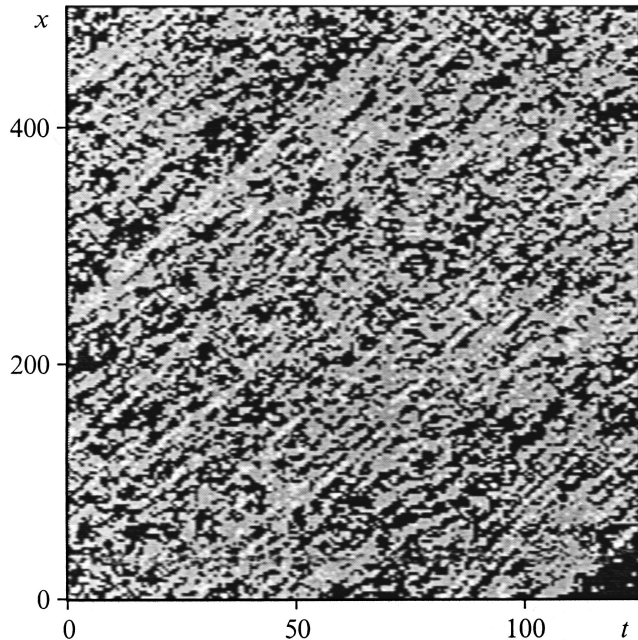


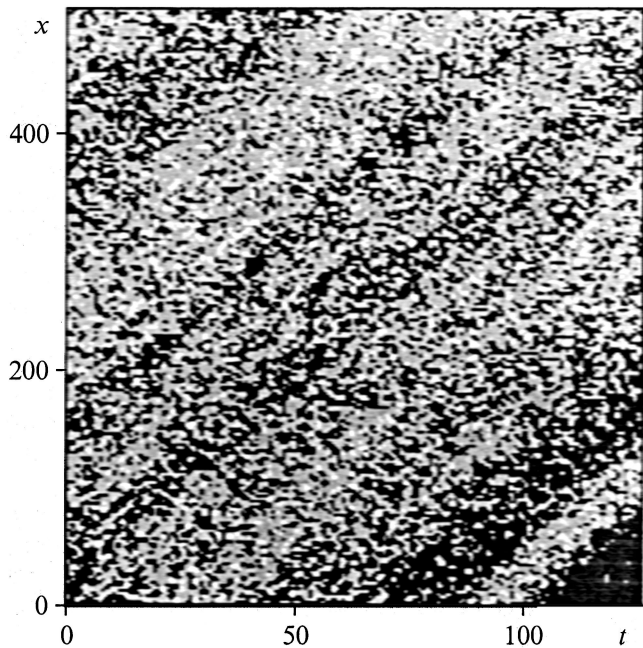
Рис. 2. Фотография спеклов. Разрешение  $512 \times 512$  pixels. Вертикальная шкала имеет миллиметровые деления.

движения образца. Это дает принципиальную возможность определения скорости непосредственно, практически не прибегая к статистическим вычислениям. Однако, как видно из рис. 3, даже в практически идеальных лабораторных условиях, в которых была получена эта картина, строгое выделение следов отдельных спеклов для последующего анализа тангенса наклона представляет собой не тривиальную задачу. Кроме того, даже небольшой шум, неизбежный при вибрации (рис. 4), может оказаться для такого „прямого“ метода катастрофическим. Это явилось причиной того, что этот самый простой путь не получил широкого распространения ранее.

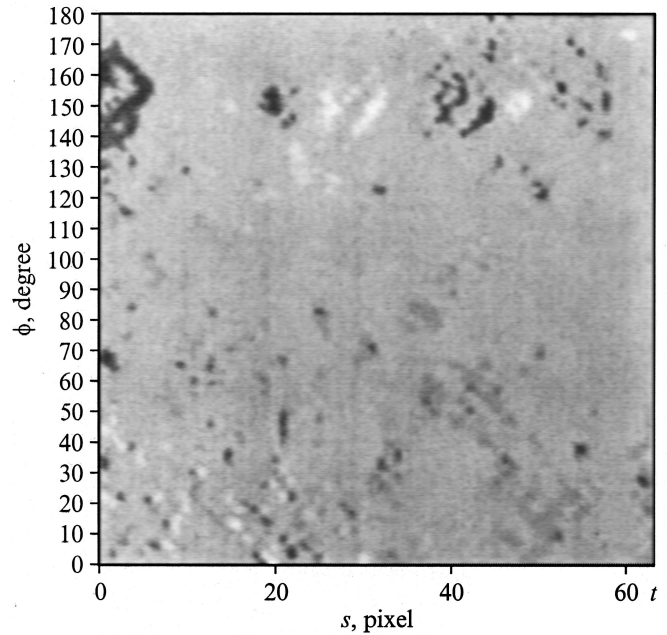
Рассмотрим возможность применения к данной задаче статистического анализа. Предпочтение было отдано анализу интегральной по времени функции интенсивности спеклов, по причине большей устойчивости таких решений в условиях сильных помех, которые могут иметь место в нашем случае. Представленные на рис. 3 данные (в общем случае вместе с полным набором



**Рис. 3.** Разрешенная по времени картина спеклов. Размерность — pixel,  $v_0 = 0.732$  mm/s.



**Рис. 4.** Разрешенная по времени картина спеклов. Размерность — pixel,  $v_0 = 0.732$  mm/s. Наличие вибрации в ортогональном направлении.



**Рис. 5.** Преобразование Радона от разрешенной по времени спекл-картины.  $v_0 = 0.732$  mm/s. Наличие вибрации в ортогональном направлении.

по координате  $y$ ) достаточны, чтобы провести по ним анализ по Briers'у, т.е. получить набор среднеквадратичных отклонений функции интенсивности спеклов для набора времен усреднения, и далее, вычислив  $\tau_c$ , найти искомую скорость. Однако в этом случае мы неоправданно ограничили бы себя в имеющейся информации, которая использовалась в „прямом“ методе. Поэтому нами было предложено несколько модифицировать анализ интегральной статистики, а именно вместо комплекса усреднений для различных периодов  $T$ , проводить усреднение для одного значения  $T$ , но для комплекса углов на пространственно-временной плоскости [8]. В этом случае получим преобразование, подобное преобразованию Радона [9], но с фиксированным пределом на квазиоднородной плоскости (рис. 5). Каждая прямая, по которой идет усреднение, будет иметь нормальные координаты  $(s, \phi)$ , т.е. получим функцию

$$g(s, \phi) = \int_{-Tv_0}^{Tv_0} I\left(s \cos(\phi) - p \sin(\phi), \frac{s}{v_0} \sin(\phi) + \frac{p}{v_0} \cos(\phi)\right) dp. \quad (4)$$

Параметр  $s$  в данном случае выступает аналогом пространственного параметра, по которому можно вычислить пространственное среднеквадратичное отклонение функции интенсивности спеклов

$$\sigma_s^2(\phi) = \left\langle (g(s, \phi) - \langle g(s, \phi) \rangle_s)^2 \right\rangle_s. \quad (5)$$

Максимальное значение пространственного средне-квадратичного отклонения функции интенсивности спеклов будет наблюдаться при значении угла, который соответствует искомой скорости движения объекта

$$v = v_0 \cdot \operatorname{tg} \left( \phi((\sigma_s)_{\max}) - \frac{\pi}{2} \right), \quad (6)$$

где  $v_0$  является отношением временного и пространственного разрешений ТВ-камеры, которое в данном случае было равно  $v_0 = 0.732 \text{ mm/s}$ .

Значение  $v_0$  определяет примерный диапазон измерений скорости с хорошей точностью. Грубо его можно оценить от  $0.1 v_0$  до  $10 v_0$ . При больших значениях  $v$  тангенс стремится к бесконечности и точность падает, а при очень малых возникает рост относительной погрешности за счет уменьшения абсолютного значения стоящего в знаменателе.

Таким образом, для повышения точности измерения при больших скоростях нужно или уменьшить пространственное разрешение (ограничение здесь — размер спекла, который должен быть больше пиксела), или увеличить временное разрешение (ограничение здесь: возможности оборудования, как камеры, так вычислительных систем, работающих в реальном времени).

## Описание экспериментальной установки

Блок-схема лабораторной установки представлена на рис. 1. Луч от гелий-неонового лазера Simens LGK 7621 (Q-4001-K7 654) (1) через систему зеркал (2) и линз (3) подавался на движущийся объект (4), представляющий собой экран, сделанный из пенопласта и размещенный на стенде, позволяющем осуществлять его перемещение в трех направлениях с микрометрической точностью.

Далее рассеянный экраном свет с помощью системы линз (5) проецировался на видеокамеру JVC-TK-S350EG (6), связанную грабером IMAQ PCI-1408 с IBM совместимым компьютером. Получение, сохранение и первичная автоматизация обработки результатов эксперимента осуществлялась пакетом оригинального программного обеспечения, написанным на C++ с использованием библиотек IMAQ Lab VIEW („National Instruments“).

Все эксперименты имитировали движение, а именно: все перемещения проводились пошагово и регистрировались отдельными снимками. После этого предлагалось, что частота съемки являются стандартной для телевизионной камеры, т.е. 25 кадров в секунду. Так как спеклы определяются положением и не имеют прямой зависимости от времени и скорости, то подобная имитация является адекватной и позволяет провести первичные оценки измерения по очень точным заданным значениям.

Общая относительная погрешность эксперимента, в данном случае определяется суммой относительной

погрешности задания перемещения трансляционными устройствами и относительной погрешностью определения перемещения телевизионной камерой, что в сумме составляло от 0.1 до 0.5%.

## Экспериментальные данные и их обсуждение

Проведен комплекс предварительных экспериментов с различными скоростями, различными образцами экранов и в различных условиях эксперимента (амплитуда и частота ортогональной вибрации и т.д.).

Общие результаты таковы: относительная ошибка измерения менее 1% в отсутствии вибрации; менее 2% с имитацией сильной ортогональной вибрации (на порядок превышающей реальные значения для автоматизируемой установки) для скоростей до 2.5 mm/s (смещение 0.1 mm за один кадр); относительная ошибка измерения менее 5% для скорости 12.5 mm/s (смещение 0.5 mm за один кадр).

Результат для 12.5 mm/s (и несколько больших скоростей до 5–10 cm/s) может быть улучшен в реальных измерениях (за достаточно большую часть ошибки измерения ответственна недостаточность комплекта временных данных, имеющая место в данном эксперименте, ввиду ограничений микрометрического оборудования). Дальнейшее увеличение измеряемой скорости возможно, но только с увеличением временного разрешения. Практически хороших результатов с обработкой в реальном времени ожидается достичь вплоть до скоростей порядка нескольких метров в секунду.

Рассмотрим подробно данные, полученные в результате нескольких экспериментальных исследований.

а) Реальная величина измеряемой скорости составляла  $v_{\text{real}} = 2.5 \text{ mm/s}$ , пространственное разрешение системы составляло 512 pixel/15 mm, временное разрешение — 25 pixel/s. Таким образом, мы имели  $v_0 = 0.732 \text{ mm/s}$  и  $v_{\text{real}}/v_0 = 3.413$ .

Кроме того, проводилось усреднение по 32 ортогональным линиям. Измерения и обработка по описанной выше методике дали  $v_{\text{exp}}/v_0 = 3.508$ .

Таблица 1.

$N$ (усреднение)	1 (без усреднения)	2	4
$V$	0.877	0.868	0.849
$\varepsilon$ , (%)	2.7%	1.7%	0.5%

Таблица 2.

$N$ (усреднение)	1 (без усреднения)	2	4
$V$	0.371	0.882	0.846
$\varepsilon$ , (%)	56%	3.3%	0.8%

Таблица 3.

N (усреднение)	1 (без усреднения)		2		4	
	(x, t)	(t, x)	(x, t)	(t, x)	(x, t)	(t, x)
V	-0.51	1.253	0.88	0.883	0.844	0.848
$\varepsilon, (\%)$	160%	47%	3.1%	3.4%	1.0%	0.7%
$ \langle \phi_{(x,t)} + \phi_{(t,x)} - 270 \rangle $ (degree)	68.5		0.1		0.2	

Таблица 4.

N (усреднение)	1 (без усреднения)	2	4
V	0.371 (0.769)	0.692 (0.849)	0.87 (0.869)
$\varepsilon, (\%)$	48% (8.4%)	16% (0.4%)	1.7% (1.6%)

Погрешность в измерениях составила 2.7%, что превышало погрешность эксперимента, но оставалось вполне пригодной для реального применения.

Для повышения точности мы изменили алгоритм обработки данных, а именно: ввели пространственное усреднение вдоль оси иксов, сокращая тем самым пространственное разрешение. Усреднение проводилось по двум и по четырем точкам. Результаты приведены в табл. 1.

При усреднении пространственное разрешение уменьшается, а  $v_0$  растет. Как указывалось ранее, лучшая точность достигается при  $v/v_0 \approx 1$ ; поэтому за единицу скорости в табл. 1 мы взяли единицу при ожидаемом наилучшем результате усреднения (при шаге усреднения  $N = 4$ ), а все остальные относительные скорости для удобства сравнения приведены в тех же единицах ( $V = \frac{v}{v_0} \cdot \frac{N}{4}$ ). Реальная величина измеряемой скорости в данных относительных единицах составляла 0.853. Как видно из данных табл. 1 ошибка при четвертом усреднении не превышает 0.5% и находится в пределах погрешности эксперимента.

б) Рассмотрим еще один пример. Проводилось измерение скорости другой части того же экрана. Реальная измеряемая скорость была такой же, что и в примере (а). Данные эксперимента представлены в табл. 2. Видно, что без усреднения имеет место катастрофическое уменьшение точности измерения. Причина этого ясна из графика функции  $\sigma_x$  от угла  $\phi$  для каждого  $y$  (рис. 6). В самом деле, для некоторых значений  $y$  ложные максимумы при нулевом значении угла  $\phi$  превышают максимумы, определяемые искомой скоростью.

В этом случае точность измерения может быть повышена выбором приемлемых рамок для поиска миниму-

ма, и это может быть сделано автоматически: исходя из данных предыдущих по времени измерений, по сопоставительному анализу с таким же интегральным преобразованием, но с зеркально-симметричным выбором осей  $x$  и  $t$ .

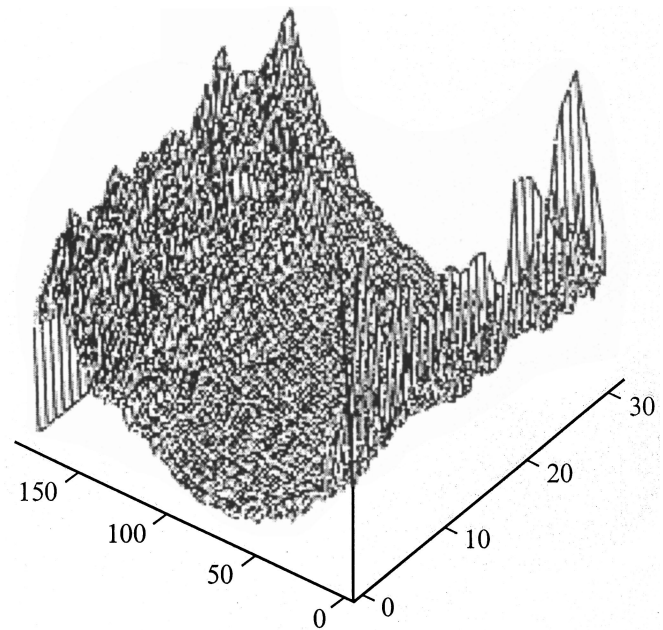
Несложно определить, что максимумы соответствующих диаграмм от координат  $(t, x)$  и  $(x, t)$  подчиняются следующему закону:

$$\phi(x, t) + \phi(t, x) = \frac{3}{2}\pi. \quad (6)$$

Не подчиняющиеся этому закону ложные максимумы могут быть вычтены автоматически.

Средняя величина скоростей, вычисленных по координатам  $(t, x)$  и  $(x, t)$ , приведена в табл. 1, 2. Данные каждой из этих путей из табл. 2 приведены в табл. 3.

Анализируя полученные результаты, можно заключить, что большая часть вычислений по координатам  $(t, x)$  и  $(x, t)$  одна и та же, поэтому их можно (и нужно) объединить в один блок-цикл, что, во-первых, увеличит точность окончательных расчетов, во-вторых, послужит дополнительным критерием для

Рис. 6. Зависимость  $\sigma_x$  от  $\phi$  (degree) и  $y$  (pixel), пример б.

отсева артефактов и в-третьих, не скажется существенно на затрачиваемых вычислительных ресурсах.

с) Рассмотрим еще один пример, проиллюстрированный ранее на рис. 3.

Для хорошего сравнительного анализа мы использовали ту же скорость, что и в двух первых примерах, но с добавлением имитации вибрации в ортогональном к плоскости движущегося экрана направлении с частотой  $0.2 \pm 0.05$  относительных единиц частоты и амплитудой 1 относительных единиц амплитуды (т.е. скорость в ортогональном направлении в 5 раз превосходила измеряемую скорость). Данные этого измерения приведены в табл. 4. В скобках — данные с исключением ложного максимума по критерию (4).

Как видно из табл. 4, даже достаточно сильная вибрация не приводит к существенной потере точности, которая составляет 1.6%, что является вполне приемлемой величиной для практического использования.

## Заключение

Таким образом, можно заключить, что экспериментальные исследования дали достаточно обнадеживающие для практического применения результаты. В ближайшем будущем нами предполагается создание полевого велосиметра и проведение ряда полевых испытаний.

В заключение следует сказать несколько слов о возможности измерения угловой скорости. Для этого может быть применен метод Briers'a для контроля пространственного контраста на полной плоскости  $(x, y)$  по временному усреднению. Если движение поступательное, то пространственный контраст на всей картине будет постоянен (независимо от пространственных координат). При наличии же вращения реальная скорость различных точек объекта будет разной. Таким образом, можно оценить  $\omega$ , после чего вычислить ее с большой точностью, сравнивая со скоростью поступательного движения.

## Список литературы

- [1] *Fercher A.F.* // Opt. Commun. 1980. Vol. 33. P. 129–135.
- [2] *Takai N.* // Opt. Commun. 1978. Vol. 25. P. 31–34.
- [3] *Fercher A.F., Briers J.D.* // Opt. Commun. 1981. Vol. 37. P. 326–329.
- [4] *Fercher A.F., Peukert M., Roth E.* // Opt. Eng. 1986. Vol. 25. P. 731–735.
- [5] *Briers J.D., Webster S.* // Opt. Commun. 1995. Vol. 116. P. 36–42.
- [6] *Richards G., Briers J.D.* Proc. SPIE. 1997. Vol. 2981. P. 160–171.
- [7] *Briers J.D., Richards G., He X.W.* // J. Biomed. Opt. 1999. Vol. 4. P. 164–175.
- [8] *Caponero M., Moriconi C., Aliverdiev A.* // Technical Digest of the Forth Italian-Russian Laser Symposium. St.Petersburg, 2001. P. 122–124.
- [9] *Aliverdiev A.* // Technical Physics. 1997. N 9. P. 1102–1103.