

01;07;12

Некоторые вопросы разработки спекл-велосиметра

© А. Аливердиев,^{1,2} М. Капонеро,¹ С. Морикони³¹ Robotics and Informatics Division, ENEA Casaccia,
00060 Roma, Italy² Институт физики Дагестанского научного центра РАН,
367003 Махачкала, Россия³ Applied Physics Division, ENEA Frascati,
00044 Frascati, Italy
e-mail: aliverdi@mail.ru

(Поступило в Редакцию 21 февраля 2003 г. В окончательной редакции 5 мая 2003 г.)

Рассматривается использование интегральной статистики в пространственно-временной плоскости для лазерной спекл-велосиметрии. Предложен новый подход для определения функции контраста, позволивший значительно увеличить устойчивость решения задачи в неидеальных условиях. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Введение

Целью настоящей работы являлась разработка прецизионного велосиметра для автономной роботизированной самодвижущейся установки 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 нами проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, давший 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 функции интенсивности.

В 1980 г. была опубликована работа [1], в которой было предложено использование временной статистики дифференциальной по времени функции. Таким образом, 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 1mm/s . В работе приводились достаточно простые и наглядные формулы, связывающие искомую скорость с определяемыми экспериментально статистическими величинами.

Другой подход с использованием пространственной статистики интегральной по времени функции интен-

сивности описывался в [2], где было предложено достаточно простое отношение между пространственным среднеквадратичным отклонением функции интенсивности спеклов $\sigma_s(T)$ за время усреднения (экспозиции) T и временем усреднения и характерным „временем корреляции“ τ_c

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

где I — интенсивность спекл-картины.

Время корреляции здесь являлось величиной, которая непосредственно определяла скорость движения создающих спеклы рассеивателей. В более поздних трудах метод был усовершенствован как с теоретической, так и с экспериментальной сторон [3–6].

Несомненным достоинством данного подхода являлись простота и наглядность получаемой информации. С его помощью можно легко оценить пространственное распределение скоростей рассеивателей. Кроме того, разработанный математический аппарат позволял добиться достаточно высокой точности. Неотъемлемым свойством этого метода являлось также то, что скорость измерялась независимо от направления, т.е. по вычисляемой таким образом скорости невозможно было определить ее направление и вообще судить, что именно она характеризует — поступательное движение или вибрацию. Таким образом, описанная выше методика нашла ряд успешных приложений, в частности в медицинской диагностике, однако в приложении к нашей задаче ее трудно признать оптимальной.

Поэтому нами было предложено [7,8] несколько модифицировать анализ интегральной статистики пространственно-временной зависимости интенсивности регистрируемой спекл-картины $I(x, t)$, а именно вместо комплекса усреднений для различных периодов T проводить усреднение для одного значения T , но для комплекса углов на пространственно-временной плоскости. Ранее подобный подход был нами успешно применен для интерпретации экспериментальной

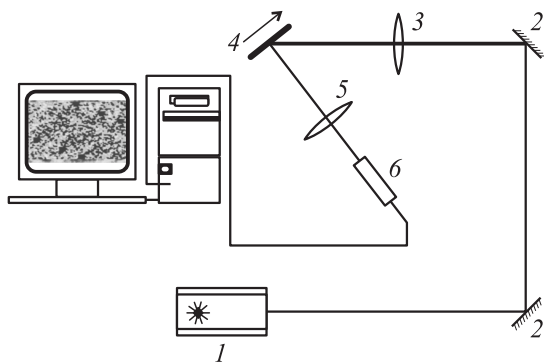


Рис. 1. Экспериментальная установка.

пространственно-временной зависимости интенсивности спонтанного излучения наносекундного электрического пробоя [9,10].

Таким образом, мы получили преобразование, подобное преобразованию Радона [9], но с фиксированными пределами на квазиоднородной пространственно-временной плоскости

$$g(s, \phi) = \int_{-T \cdot v_0}^{T \cdot v_0} I \left(s \cos(\phi) - p \sin(\phi), \frac{s}{v_0} \sin(\phi) + \frac{p}{v_0} \cos(\phi) \right) dp, \quad (2)$$

где (s, ϕ) — нормальные координаты преобразования Радона; p — переменная, по которой идет интегрирование; v_0 — отношение временного и пространственного разрешений измерительной системы.

Если время измеряется в числе кадров, а x — в числе пиксел (как это показано на рис. 1), то $v_0 = 1$, тем не менее мы должны учитывать этот коэффициент в окончательных вычислениях.

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

$$\sigma_s^2(\phi) = \left\langle \left(g(s, \phi) - \langle g(s, \phi) \rangle_s \right)^2 \right\rangle_s. \quad (3)$$

Максимальное значение пространственного среднеквадратичного отклонения функции интенсивности спеклов должно наблюдаться при значении угла, который соответствует искомой скорости движения объекта

$$v = v_0 \operatorname{tg} \left(\phi \left((\sigma_s)_{\max} - \frac{\pi}{2} \right) \right). \quad (4)$$

В [7,8] нами докладывались результаты исследований, в которых все перемещения проводились пошагово и регистрировались отдельными снимками. В этих идеальных условиях метод позволил получить весьма обнадеживающие результаты.

Постановка задачи

Развивая предложенный подход, нами была поставлена задача определения не только модуля скорости, но и направления движения или, иными словами, определение вектора $v = (v_x, v_y)$.

Второй существенной задачей было создание работоспособной автоматизированной установки, осуществляющей измерение двумерной скорости движущегося объекта.

И наконец, финальной задачей настоящей работы было осуществление устойчивой и прецизионной велосиметрии в условиях, отличных от идеальных.

Описание экспериментальной установки

Для осуществления экспериментальной проверки нами была собрана экспериментальная установка, блок схема которой представлена на рис. 1. Луч от гелий-неонового лазера Siemens LGK 7621 (Q 4001-K7 654) 1 через систему зеркал 2 и линз 3 подавался на движущийся объект 4, представляющий собой экран, сделанный из белой бумаги с нанесенным на ней слабоконтрастным рисунком для имитации реальной поверхности. Поступательное движение экрана осуществлялось системой с электрическим приводом.

Далее рассеянный экраном свет через систему линз 5 фиксировался видеокамерой JVC TK-S350EG 6, связанной аналого-цифровым преобразователем изображения IMAQ PCI-1408 с IBM совместимым компьютером. Представление, сохранение и первичная автоматизация эксперимента осуществлялись пакетом оригинального программного обеспечения, написанным на C++ с использованием библиотек IMAQ LabVIEW („National Instruments“).

Основные результаты и их обсуждение

Так как при наличии ортогональной составляющей скорости следы от спеклов быстро покидают исследуемую область, нами было предложено в формуле (2) осуществлять интегрирование по ортогональному направлению, что позволило ослабить этот эффект. Таким образом, для x - и y -компонент скорости мы получили

$$g_x(s, \phi) = \int_{-T \cdot v_0}^{T \cdot v_0} \int_{-T \cdot v_0}^{T \cdot v_0} I_x \left(s \cos(\phi) - p \sin(\phi), \frac{s}{v_0} \sin(\phi) + \frac{p}{v_0} \cos(\phi) \right) dp dy, \quad (5)$$

$$g_y(s, \phi) = \int_{-T \cdot v_0}^{T \cdot v_0} \int_{-T \cdot v_0}^{T \cdot v_0} I_y \left(s \cos(\phi) - p \sin(\phi), \right. \\ \left. \frac{s}{v_0} \sin(\phi) + \frac{p}{v_0} \cos(\phi) \right) dp dx, \quad (6)$$

где $I_x(y, t)$ и $I_y(x, t)$ — пространственно-временная зависимость интенсивности регистрируемой спекл-картины для x - и y -компонент скорости соответственно.

Дальнейшая обработка сигнала осуществлялась по формулам (3), (4) для каждого из направлений.

Однако первые же эксперименты показали, что при использовании предложенной ранее методики прецизионное определение скорости было возможно только в направлении, близком к истинному направлению движения.

В этой связи нами было осуществлено исследование зависимости скорости от угла поворота камеры α между осью Ox и направлением измерения скорости. Таким образом, для каждого угла α мы имели локальную систему координат (x', y') , которая была повернута на угол α относительно системы координат (x, y) и для которой мы рассчитывали скорость в направлении Ox' .

Типичный результат представлен на рис. 2. Как видно, точное вычисление скорости (с относительной погрешностью менее 2%) действительно осуществлялось только на очень ограниченных участках, близких к истинному направлению движения.

Для анализа этого эффекта обратимся к рис. 3. Он демонстрирует зависимость максимума σ_s^2 от ϕ (вертикальная ось) и от угла поворота α (горизонтальная ось). Как видно, хотя линия, обусловленная искомой скоростью, достаточно хорошо просматривается, однако на участках, на которых отмечены существенные ошибки, она не дает абсолютный максимум.

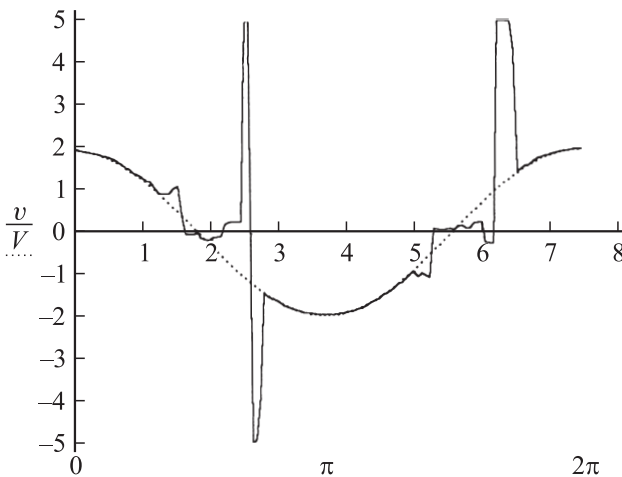


Рис. 2. Зависимость скорости от угла поворота α камеры между осью Ox и направлением измерения скорости. Сплошная кривая — значение скорости (v), вычисленное по описанной методике; пунктир — действительное значение скорости (V).

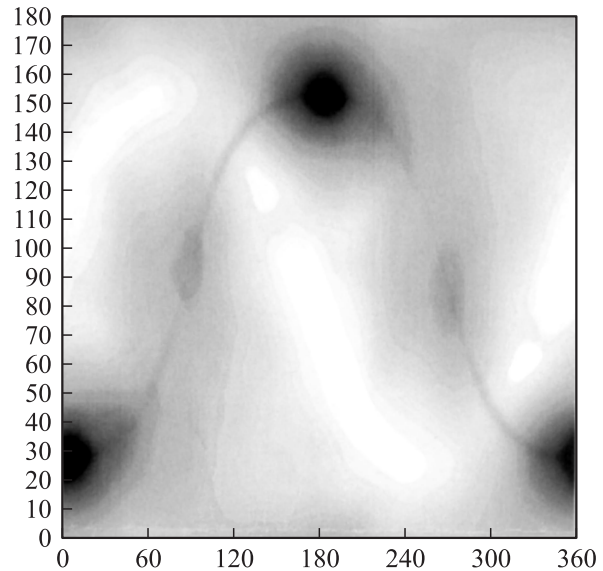


Рис. 3. Зависимость максимума σ_s^2 от ϕ (вертикальная ось) и от угла поворота α (горизонтальная ось).

Т.е. принципиально мы имели возможность прецизионной 2D-велосиметрии по регистрируемым экспериментальным данным, однако это необходимо было бы для вычисления скорости для большого набора углов, что требовало слишком много вычислительных ресурсов для практического применения в реальном времени.

В этой связи нами был поставлен вопрос, что отвечает за появление максимумов, не являющихся отражением скорости движения. Анализ зависимости $\sigma_s^2(\phi, \alpha)$ показал, что причиной являются низкочастотные компоненты спектра функции g . Исходя из этого нами было предложено для определения искомого значения ϕ вместо среднеквадратичного отклонения (3) использовать функцию, вычисляемую по формуле

$$\sigma_s'^2(\phi) = \left\langle (g(s + \Delta s, \phi) - g(s, \phi))^2 \right\rangle_s. \quad (7)$$

Функция $\sigma_s'^2(\phi)$ сильно зависит от параметра Δs . При $\Delta s \rightarrow 0$ она также стремится к нулю. Однако при ненулевом значении Δs она позволяет отсечь низкие частоты.

Расчет зависимости максимума $\sigma_s'^2$ от ϕ (вертикальная ось) и от угла поворота α (горизонтальная ось), а также зависимости скорости от угла α при использовании этого модифицированного алгоритма для рассмотренного выше эксперимента показан на рис. 4 и 5.

Как видим из рис. 5, определение скорости для любого угла с хорошей точностью ($\varepsilon < 2\%$) улаживаются на синусоиду. Таким образом, для определения вектора $\mathbf{v} = (v_x, v_y)$ мы вполне можем ограничиться двумя вычислениями скорости в ортогональных направлениях на любом угловом участке, что было невозможно в предыдущем алгоритме.

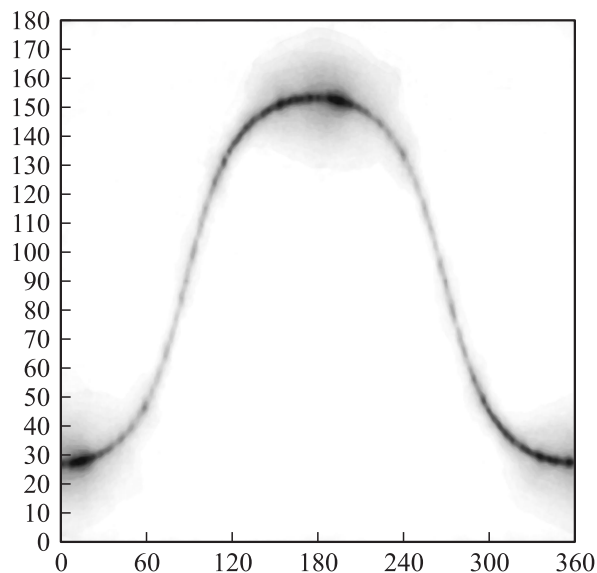


Рис. 4. Зависимость максимума $\sigma_s'^2$ от ϕ (вертикальная ось) и от угла поворота α (горизонтальная ось).

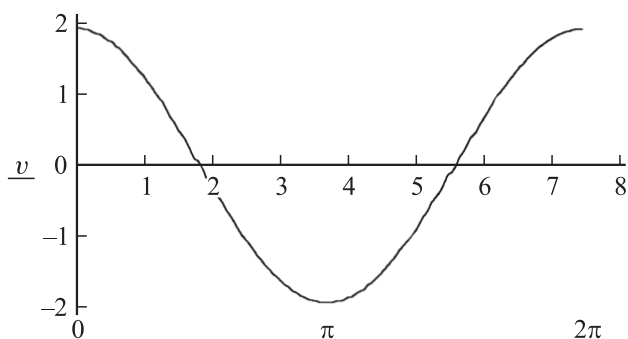


Рис. 5. Зависимость вычисленной по модифицированной методике скорости от угла поворота α камеры между осью Ox и направлением измерения скорости.

Следует отметить, что результаты, представленные на рис. 2–5, являлись типичными и повторялись во всех экспериментах с варьированием измеряемой скорости и поверхности экрана.

Заключение

Найденный алгоритм нахождения скорости из экспериментально получаемых данных в отличие от применяемых ранее алгоритмов позволил существенно увеличить точность измерения в условиях, отличных от идеальных, а также значительно уменьшить вычислительные ресурсы, что имеет значение для применения данной методики в реальном времени. Таким образом, представленные результаты имеют важное методологическое и прикладное значение.

Детальное математическое обоснование формулы (7) и построение мобильной установки в настоящее время находятся в стадии разработки и будут опубликованы позднее.

Авторы благодарны ENEA, Итальянской программе исследований в Антарктике (Project 11-15) и Минобранию России (Project PD 02-1.2-47).

Список литературы

- [1] Fercher A.F. // Opt. Commun. 1980. Vol. 33. P. 129–135.
- [2] Fercher A.F., Briers J.D. // Opt. Commun. 1981. Vol. 37. P. 326–329.
- [3] Fercher A.F., Peukert M., Roth E. // Opt. Eng. 1986. Vol. 25. P. 731–735.
- [4] Briers J.D., Webster S. // Opt. Commun. 1955. Vol. 116. P. 36–42.
- [5] Richards G., Briers J.D. // Proc. SPIE. 1997. Vol. 2981. P. 160–171.
- [6] Briers J.D., Richards G., He X.W. // J. Biomed. Opt. 1999. Vol. 4. P. 164–175.
- [7] Caponero M., Moriconi C., Aliverdiev A. Laser Velocimetry: an Application as Smart Driving Agent for Tracked Vehicles, Technical Digest of the Forth Italian-Russian Laser Symposium. St. Petersburg, 2001. P. 122–124.
- [8] Aliverdiev A., Caponero M., Moriconi C. // Technical Physics. 2002. N 8. P. 1044–1048.
- [9] Aliverdiev A.A. Proc. of 25th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Nagoya (Japan), 2001. Vol. 4. P. 59–60.
- [10] Аливєрдиев А.А. // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 9. С. 132–135.