

## ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ БЫСТРОЛЕТЯЩИХ ОБЪЕКТОВ ПО АНАЛИЗУ КИНОГРАММ

Аринин В.А., Ботов Е.В.

Институт физики взрыва Российского Федерального ядерного центра  
ВНИИ экспериментальной физики (ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ)

**Введение.** Сегодня использование высокоскоростной киносъемки для измерения скорости объектов стало классическим. Точность измерения скорости при этом связана с единичным разрешаемым элементом кадра и оставляет желать лучшего при скоростях съемки в тысячи и десятки тысяч кадров в секунду. В данной работе предлагается анализировать серии изображений (кинограммы), как общую совокупность данных. Учитывая непрерывность функции скорости исследуемого объекта, можно построить итерационный алгоритм, позволяющий существенно повысить точность измерения скорости на малых длинах пролета (базах съемки). Дополнительно можно получить относительно качественное изображение метаемого объекта.

**Исходные данные.** Ограничимся рассмотрением трех характерных случаев, представленных на рис. 1. Случай а) – снаряд без особенностей на базе съемки 2,8 длины снаряда, б) – снаряд со стабилизаторами, наличие которых позволяет увеличить базу до 3,2 длины при том же масштабе съемки, в) – снаряд со стабилизаторами на базе 4,2 длины.

В данной работе намеренно рассмотрены кинограммы низкого качества: размер картинки – 234×256 пикселей (рх), разрядность АЦП – 6 бит (64 уровня квантования), на исследуемый объект приходится ≈15 уровней.

**Сущность метода.** Для определения смещения объекта от кадра к кадру на первой итерации будем брать в качестве образца изображение объекта на первом кадре. В случае если у образца есть протяженные вертикальные элементы, можно брать часть изображения объекта, что позволяет увеличить базу определения скорости. Образцы, используемые в данной работе, выделены на первых кадрах рисунка 1 белыми прямоугольниками. Собственно смещение будем определять как максимум сдвиговой корреляции образца в окрестностях изображения объекта на исследуемом кадре. Пусть имеются два изображения *A* и *B* размером  $I \times J$  элементов каждое (образец и текущий исследуемый фрагмент изображения). Тогда коэффициент их корреляции определяется соотношением (1), где *a* и *b* – приведенные изображения, полученные из *A* и *B* поэлементным вычитанием средних арифметических значений соответствующих изображений.

$$k_{\text{корр}} = \frac{\sum_{i=1,I; j=1,J} a_{i,j} \cdot b_{i,j}}{\sum_{i=1,I; j=1,J} a_{i,j} \cdot \sum_{i=1,I; j=1,J} b_{i,j}} \quad (1)$$

Перемещая изображение образца, по области поиска на другом изображении, находим функцию сдвиговой корреляции  $k(N; M)$ . Ее максимум определяет смещение с точностью до пикселя. Уменьшая решетку дискретизации с использованием трилинейной интерполяции, схема которой приведена на рисунке 2, получаем координаты максимума уже с межпиксельной точностью. Подобная процедура эффективна вплоть до шага в 0,1 пиксель. Окончательно положение максимума уточняем квадратичной интерполяцией. Пусть максимум находится в точке с координатами  $(n; m)$ , тогда искомое положение максимума по ординате (для абсциссы – аналогично)  $n + \Delta n$ , где  $\Delta n$  определяется следующим соотношением

$$\Delta n = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_{n-1,m} - k_{n+1,m}}{k_{n+1,m} - 2k_{n,m} + k_{n-1,m}}. \text{ Так как на столь малых базах снаряд движется равномерно и}$$

прямолинейно, по полученным максимумам по критерию минимального среднеквадратичного отклонения (СКО) построим прямую. Используя «уточненные» значения положения объекта, лежащие с равным шагом на полученной прямой, с помощью трилинейной интерполяции получим серию взаимно позиционированных изображений образца. Сумма этих изображений даст нам образец для второй итерации. Практика показывает, что третья итерация не имеет значимых различий со второй, то есть, метод быстро сходится.

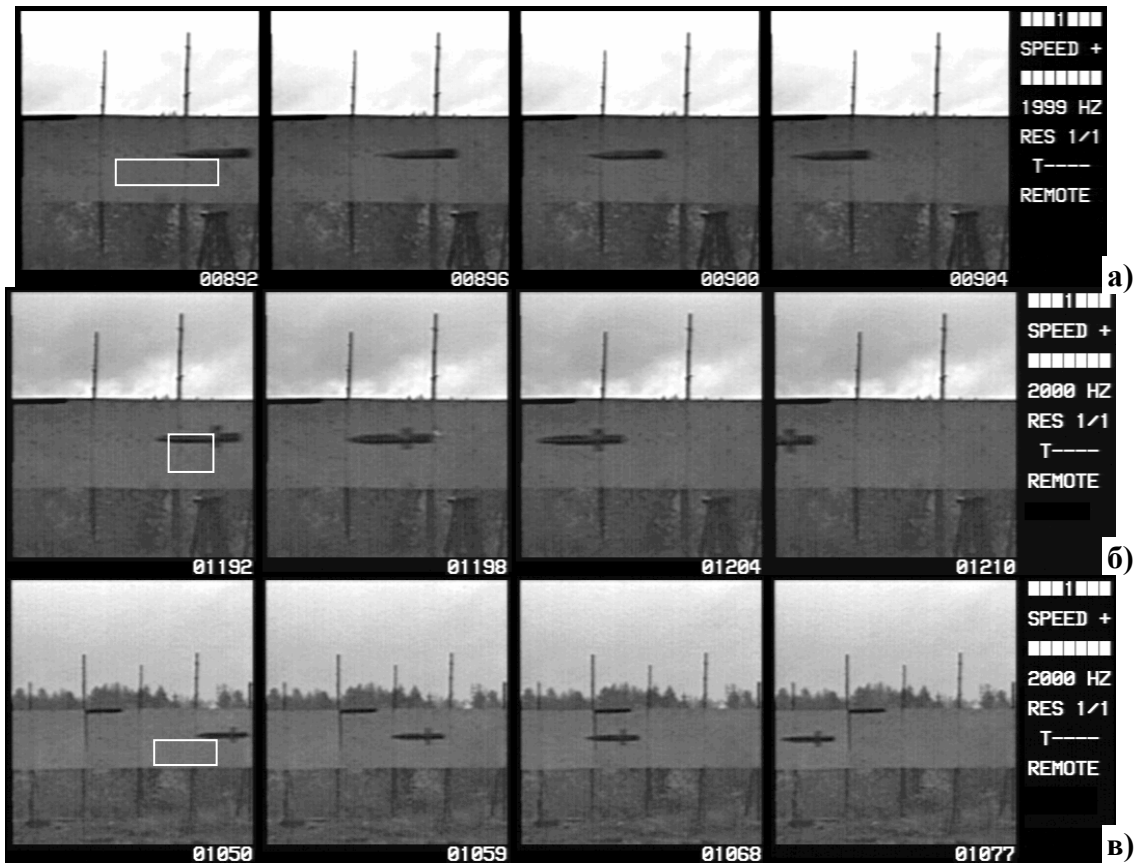


Рис. 1 –Сверху – 4 кадра из 14 кинограммы снаряда без особенностей, в середине – 4 кадра из 19 кинограммы снаряда со стабилизаторами, внизу – 4 из 28 кадров снаряда со стабилизаторами меньшего в 1,53 раза масштаба. Образцы для корреляционного анализа выделены белыми прямоугольниками

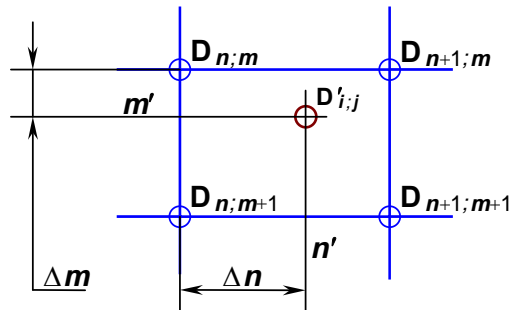


Рис. 2 – Схема трилинейной межпиксельной интерполяции

Искомые значения  $D'$  определяется по соседним значениям  $D$  следующим образом:

$$\begin{aligned}
 n &= \text{int}(n'); & \Delta n &= n' - n; \\
 m &= \text{int}(m'); & \Delta m &= m' - m; \\
 D'_t &= D_{n;m} + \Delta n (D_{n+1;m} - D_{n;m}); \\
 D'_b &= D_{n;m+1} + \Delta n (D_{n+1;m+1} - D_{n;m+1}); \\
 D'_{i;j} &= D'_t + \Delta m (D'_b - D'_t).
 \end{aligned}$$

**Полученные результаты.** Результаты измерения скорости объектов приведены в таблице. Отметим, что в первом случае точность измерения ниже из-за отсутствия ярковыраженных вертикальных границ, что дает большую горизонтальную погрешность определения максимума функции сдвиговой корреляции. Оценка погрешности метода определялась через СКО полученных координат объекта от построенной по ним прямой. Данная оценка представительна, так как базируется на анализе достаточно большого количества кадров.

На рис. 3 приведены суммарные изображения, полученные на третьей итерации. При сравнении их с исходными, видно, на сколько повысилось качество регистрации снаряда.

Таблица 1 – Результаты обработки кинограмм

Случай/ итерация	Средние покадровые данные			Результат	
	V, px/кадр	$\sigma_{Vx}$ , px	$\sigma_{Vy}$ , px	V, px/c	$\pm 3\sigma$ , px/c
1/1	10,627	0,338	0,197	21254	$\pm 250$ ( $\pm 0,85\%$ )
1/2	10,703	0,245	0,059	21406	$\pm 116$ ( $\pm 0,53\%$ )
1/3	10,711	0,246	0,058	21422	$\pm 117$ ( $\pm 0,55\%$ )
2/1	10,117	0,266	0,048	20235	$\pm 90,0$ ( $\pm 0,45\%$ )
2/2	10,114	0,175	0,035	20227	$\pm 59,4$ ( $\pm 0,29\%$ )
2/3	10,114	0,174	0,035	20228	$\pm 59,2$ ( $\pm 0,29\%$ )
3/1	6,3436	0,340	0,048	12687	$\pm 76,3$ ( $\pm 0,60\%$ )
3/2	6,3437	0,275	0,036	12687	$\pm 61,6$ ( $\pm 0,49\%$ )
3/3	6,3437	0,272	0,034	12688	$\pm 60,9$ ( $\pm 0,48\%$ )

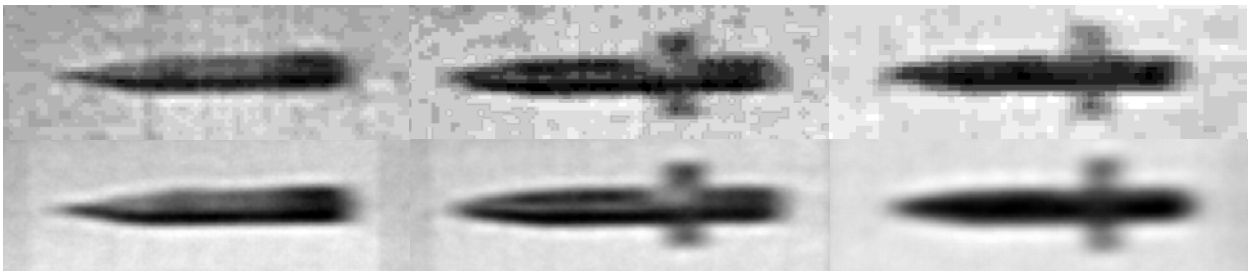


Рис. 3 – Вверху – фрагменты кадров кинограмм, содержащие изображения исследуемых объектов, внизу – изображения, полученные после суммирования кадров.

Исследования показали, что наличие протяженных вертикальных элементов (стабилизаторов) повышает точность определения скорости приблизительно на величину уширения габарита снаряда. При изменении масштаба съемки точность пропорциональна полной площади, покрываемой снарядом на кинограмме (на всех ее кадрах). Эти предположения хорошо согласуются с точностными свойствами максимума функции сдвиговой корреляции.

**Методические вопросы обработки кинограмм.** Высокая точность описанного здесь метода предъявляет особые требования к постановке эксперимента, в частности к определению масштаба съемки. Для того, чтобы ошибки определения масштаба не влияли на конечный результат, необходимо проводить предварительную съемку двух параллельных реек, длина которых существенно больше габаритов снаряда. Учитывая то, что при этом можно просуммировать сколь угодно кадров, относительную ошибку в определении масштаба всегда можно сделать много меньше ошибки определения скорости. Для дальнейшего увеличения точности взаимного позиционирования исследуемого объекта и, как следствие, метода, на метаемый объект целесообразно нанести регулярный контрастный рисунок в виде поперечных полос или шахматного поля (при отсутствии вращения).

**Заключение.** Оценка точности, которая может быть получена при обработке таких кинограмм классическими методами по методике, изложенной в [1], дает погрешность  $\pm 2\%$  (по критерию  $3\sigma$ ). Использование предлагаемого подхода увеличивает точность приблизительно в 5 раз, что изменяет класс измерения, определяемого по методике [2], и, как следствие, позволяет использовать для подобных исследований существенно более дешевую аппаратуру.

**Благодарности.** Авторы благодарят сотрудников ИФВ Лизунова К. В. за активное участие в экспериментах, Ткаченко Б. И. за программную поддержку проекта, Хворостина В. Н. за обсуждение данной работы.

#### Литература

1. А. С. Дубовик «Фотографическая регистрация быстротекущих процессов», М.: «Наука»; 1964.
2. Г. Л. Шнирман «Успехи научной фотографии», выпуск VI, 1959.

