

Оценка оптимального критерия совмещения совпадающих трасс в следах полей нарезов

К. О. Сорокина, В. А. Федоренко

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Аннотация. Работа посвящена оценке критерия оптимального пересечения трасс для отнесения последних к классу «совпадающие» на основе энтропии Шеннона. Для проведения модельного эксперимента была сформирована выборка, включающая 344 пары заведомо совпадающих и 344 пары заведомо не совпадающих вторичных следов. На ее основе было сгенерировано 200 валидационных подвыборок. Для каждого критерия перекрытия трасс по ширине (10%-100%, 20%-100%, ..., 100%) для всех подвыборок было подсчитано число реализаций, характеризующихся наименьшей энтропией (наибольшей упорядоченностью разделенной подвыборки по классам «совпадающие следы» и «несовпадающие следы»). Показано, что для вторичных следов на пулях, выстреленных из пистолета Макарова, таким критерием является интервал пересечений трасс по ширине от 60% до 100%.

Ключевые слова: следы полей нарезов, совпадающие трассы, энтропия Шеннона, валидация.

DOI 10.14357/20718632230105

Введение

В настоящее время активно разрабатываются алгоритмы автоматического сравнения следов полей нарезов (вторичных следов) и количественной оценки их схожести. В этой связи определение оптимального критерия отнесения трасс к категории «совпадающие» в совмещенных вторичных следах является актуальной проблемой. При прохождении пулей канала нарезного ствола (Рис. 1 а) на ее поверхности формируются различные группы динамических следов, состоящих из наборов параллельно расположенных трасс: первичные; вторичные (следы от полей нарезов); следы от дна нарезов. В момент врезания оболочки пули в нарезы образуются так называемые первичные следы, трассы в которых располагаются параллельно продольной оси пули (Рис. 1 б, отм.1). При движении пули по нарезам формируются вто-

ричные следы и следы от дна нарезов, которые имеют наклон, равный углу наклона нарезов (Рис. 1 б, отм. 2 и 3 соответственно). Сравнение однотипных динамических следов экспертами в «ручном» режиме проводится методом совмещения их разверток [1]. Эксперт, опираясь на личный опыт и внутреннее убеждение, определяет, были ли анализируемые следы сформированы одним следообразующим объектом или разными. Чем больше трасс в сравниваемых следах совместились, тем более обоснованным считается вывод о едином источнике их происхождения. Идентификация оружия может быть проведена по всем типам следов, присутствующих на выстреленных пулях, но чаще всего ее проводят по вторичным следам, которые характеризуются достаточно ярко выраженными границами в виде трасс от холостой и боевой граней (Рис. 1 б, отм.4). Наличие границ существенно облегчает процесс совмещения следов.

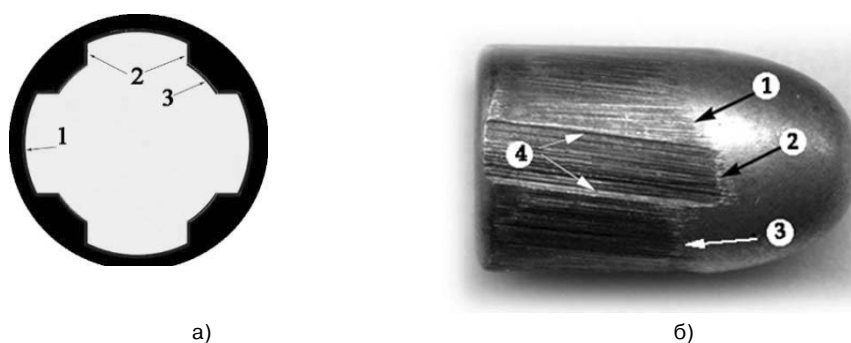


Рис. 1. а) - Поперечное сечение нарезного ствола: отм. 1 — нарез; 2 — боевая и холостая грани нарез; 3 — поле нарез; б) — следы на выстреленной пуле: отм. 1 — первичный след; 2 — след поля нарез (вторичный след); 3 — след дна нарез; 4 — следы холостой и боевой граней нарез

Сравнение вторичных следов на двух-трех пулях в «ручном» режиме обычно не представляет большой сложности, однако проведение проверок по базе данных, включающей сотни и тысячи однотипных следов, уже практически невозможно.

Методы сравнения следов полей нарезов на выстреленных пулях при идентификации оружия условно можно разбить на три группы. Первая группа включает вероятностные методы оценки схожести динамических следов [2, 3], вторая включает корреляционные методы сравнения следов и обоснования их криминалистической тождественности [4-6]. К третьей группе можно отнести комбинированные методы, основанные как на подсчете числа совпадающих трасс, так и расчете функции взаимной корреляции с последующим применением методов машинного обучения для анализа степени схожести следов [7, 8].

Методы, относящиеся к первой группе, основаны на совмещении динамических следов, подсчете числа совпадающих трасс и собственно оценке вероятности их случайного совпадения. Чем меньше вероятность случайного совпадения комплекса трасс, тем более обоснованным является вывод, что следы сформированы одним объектом. Данные модели учитывают число трасс в следах, число совпавших трасс и серии последовательно совпадающих трасс [2, 3]. Недостатком является интуитивное определение критерия отнесения трасс к категории «совпадающие» как пересечение их по ширине не менее, чем на 50%.

Примером такой модели может служить методика А. Биазотти, [4] в которой производится

подсчет только серий с наибольшим числом последовательно совпадающих трасс. Из общих соображений ясно, чем длиннее серия последовательно совпадающих трасс, тем больший фрагмент канала ствола с идентичными неоднородностями сформировал эти трассы в сравниваемых следах, тем больше вероятность, что оба вторичных следа сформированы одним полем нарез. В данной работе к совпадающим трассам относят только те, которые практически идеально совместились, что является излишне жестким требованием.

Схожесть вторичных следов на выстреленных пулях можно оценить по максимуму функции взаимной корреляции (ФВК). Однако применение ФВК для сравнения следов часто не эффективно по следующим причинам. Во-первых, на изображениях анализируемых следов могут присутствовать разные яркостные неоднородности, не являющиеся признаками (трассами), но оказывающие существенное влияние на формирование функции взаимной корреляции. Во-вторых, максимальное значение ФВК, даже для заведомо совпадающих следов, не всегда достаточно значимо из-за присутствия в них множества несовпадающих трасс, которые сформировались неустойчивыми неоднородностями на поверхности полей нарезов, например, песчинками, окалиной, продуктами предыдущих выстрелов и т.д. В-третьих, малейшая деформация одной из пуль ведет к искажению следовой картины на ней и, соответственно, к «разбежке» совпадающих трасс в совмещенных следах. Для уменьшения негативного влияния поверхностных засветок и деформации пуль применяется метод конгру-

этно совпадающих сегментов профилей следов [5, 6]. Суть метода заключается в разбиении одного из сравниваемых изображений на 20-25 сегментов равной длины, удалении из последующего анализа сегментов, не содержащих полезной информации (засветки, потертости и т.д.), построении ФВК для каждого пригодного сегмента первого следа со вторым. Для совпадающих следов сегменты первого следа будут максимально схожи с соответствующими фрагментами второго следа (Рис. 2 а). Поэтому максимумы функции взаимной корреляции для каждого пригодного сегмента (CCF_1 , CCF_2 , ..., Рис. 2 б) должны располагаться в соответствующих позициях второго следа. Чем больше максимумов ФВК расположится в соответствующих позициях (условие конгруэнтности), тем более схожими являются анализируемые следы.

К недостаткам данной методики можно отнести следующее. Вторичные следы могут содержать всего по 10-20 трасс, в этом случае каждый сегмент будет включать в среднем по 1-2 признака, что приведет к формированию равнозначных максимумов ФВК для каждого сегмента в разных позициях второго следа. В результате эффективность метода будет низкой. Поэтому бинарная классификация пар следов только по максимальному значению функции взаимной корреляции не всегда эффективна без учета числа совпадающих и различающихся трасс.

Комбинированные методы представлены в работах [7, 8], в них учитывается как число совпадающих трасс и серии последовательно совпадающих трасс, так и функция взаимной корреляции. Последующий анализ совпадающих и различающихся признаков для отнесения исследуемой пары следов к категории «следы совпадающие» или «следы несовпадающие» проводится с помощью метода случайного леса. Применение комбинированного метода в целом позволяет улучшить точность классификации по сравнению с другими методами, но для обеспечения высокой эффективности также необходимо определить оптимальный критерий отнесения трасс к категории «совпадающие».

В настоящее время в судебно-баллистическую идентификацию широко внедряются информационные технологии с целью автоматизации процесса сравнения динамических следов, в том числе и от полей нарезов [9]. Как следует из краткого обзора методов сравнения следов на выстреленных пулях, важной операцией является подсчет числа совпадающих трасс. Поэтому актуальной задачей является определение оптимального критерия отнесения трасс к категории «совпадающие» в совмещенных вторичных следах.

Решение данной задачи направлено на повышение эффективности бинарной классификации. Оптимальный критерий отнесения трасс к категории «совпадающие» можно определить как диапазон перекрытия трасс по ширине, при

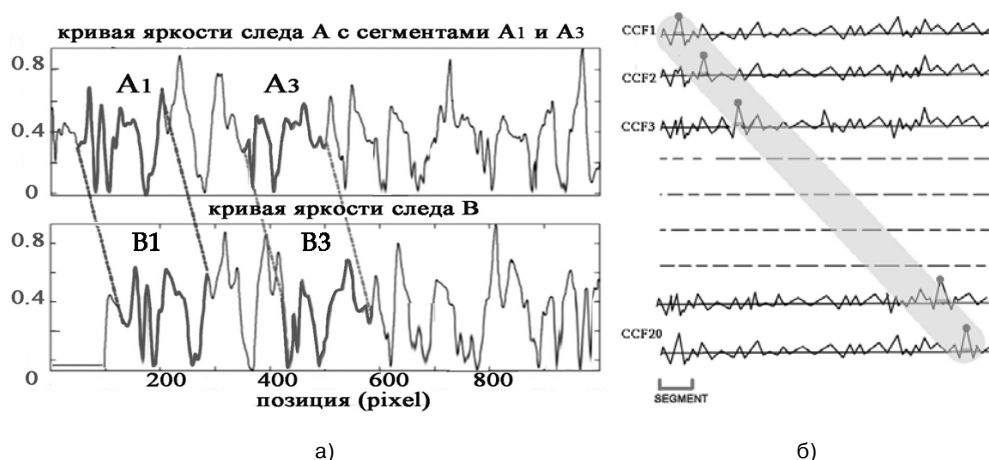


Рис.2. Метод конгруэнтно совпадающих сегментов профилей следов

а) - след А с сегментами А1 и А3. След В с соответствующими схожими сегментами В1 и В3; б) - функции взаимной корреляции каждого сегмента следа А со вторым следом В (CCF_1 , CCF_2 и т.д.), точками выделены максимумы ФВК

котором возможно наилучшее разделение множества пар совмещенных следов на два подмножества: «совпадающие следы» и «несовпадающие следы». Представим, что имеется достаточно репрезентативная выборка совмещенных заведомо совпадающих и заведомо не совпадающих следов. На ее основе формируется множество валидационных подвыборок. Подсчитывая число совпавших трасс при разных диапазонах их перекрытия по ширине (перекрытие от 90% до 100%, от 80% до 100% и т.д.) для разных подвыборок, можно определить диапазон перекрытия, при котором чаще всего наблюдается наилучшее разделение совмещенных следов по классам (Рис. 3). Этот диапазон и будет являться оптимальным критерием отнесения трасс к категории «совпадающие».

Исходя из практического опыта можно отметить, что для достаточно репрезентативной выборки совмещенных следов идеальное разделение по классам невозможно, поскольку некоторая часть заведомо совпадающих и заведомо несовпадающих следов имеют схожие характеристики. Поэтому важно определить параметр, который характеризовал бы степень разделения совмещенных следов по их классам.

1. Модель определения оптимального критерия с помощью энтропии Шеннона

В анализе данных и машинном обучении энтропия используется в алгоритмах классификации как мера классовой однородности подмножеств наблюдений, полученных в результате разбиения обучающего множества на классы. Чем выше однородность подмножества, тем меньше энтропия и тем лучше результаты классификации. В качестве меры, характеризующей степень разделения множества пар совмещенных следов на «совпадающие следы» и «несовпадающие следы», например, можно взять информационную энтропию Шеннона, которая характеризует степень хаоса в системе.

Идея заключается в следующем. Формируется репрезентативная выборка совмещенных пар следов. Из исходного множества генерируется набор валидационных подвыборок, например, из 100 пар совпадающих и 100 пар несовпадающих следов каждая. Отношение (n/N_1)

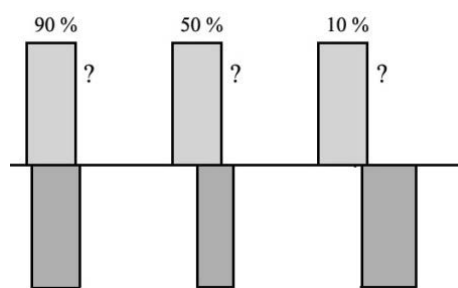


Рис. 3. Различные перекрытия трасс

числа совпавших трасс (n) к числу трасс (N_1) в одном из совмещенных следов можно считать независимой переменной, характеризующей каждую пару следов. N_1 подсчитывается для следа с меньшим числом трасс. Тогда динамический диапазон независимой переменной будет лежать от 0 (если $n = 0$) до 1 (если $n=N_1$). В качестве категориальной переменной здесь выступает класс совмещенных следов: «совпадающие следы»; «несовпадающие следы».

Для каждой пары следов определяется параметр n/N_1 . Все объекты валидационной подвыборки располагаются на числовой оси от 0 до 1 в соответствии с их значением n/N_1 . Для всех валидационных подвыборок для каждого диапазона совмещения трасс (10-100%, ..., 90-100%) определяется значение минимальной энтропии при делении по всем узлам (объектам). Далее из всех минимальных значений энтропии определяется наименьшее, которое информирует, при каком диапазоне совмещения трасс данная выборка делится на два подмножества с наибольшей упорядоченностью. Этот диапазон и будет являться оптимальным критерием отнесения трасс к категории «совпадающие» исходя из условия наилучшего разделения пар совмещенных вторичных следов по классам.

2. Методика расчета энтропии Шеннона

Энтропия Шеннона для дискретных случайных событий с N возможными состояниями определяется следующим образом [10]:

$$S = - \sum_{i=1}^N p_i * \log_N(p_i), \quad (1)$$

где p_i - вероятность обнаружения объекта i -го класса.

Для одномерного множества объектов, относящихся к двум классам, параметр N в формуле (1) будет равен 2. При идеальном разделении энтропия каждого класса будет равной нулю и энтропия всей системы, соответственно, также равной нулю. Поскольку такое разделение совмещенных следов по классам невозможно, то минимизация значения энтропии позволит определить оптимальный диапазон перекрытия трасс для их отнесения к категории «совпадающие».

В качестве примера рассмотрим кратко методику расчета энтропии Шеннона для множества, представленного на Рис. 4 а) и состоящего из объектов двух классов, при его делении на узлах. Объекты в данном случае являются аналогами совмещенных следов. Например, черные шарики соответствуют несовпадающим следам, а светлые – совпадающим. После деления на каждом узле будет получаться по 2 подмножества объектов (Рис. 4. б). Для каждого подмножества следует рассчитать значения энтропии (S_1^j и S_2^j) и затем сложить их, чтобы определить среднюю энтропию S^j всей системы.

$$S^j = S_1^j + S_2^j$$

Верхний индекс j означает номер узла деления, а нижний означает левую и правую ветвь. Значение энтропии должно учитывать весовой коэффициент при каждом делении. Если до деления набор включал N объектов, то после деления левая и правая ветвь будут включать N_1 и N_2 объектов соответственно ($N_1 + N_2 = N$). Весовой коэффициент для левой и правой ветви будет равен соответственно:

$$K_1 = N_1/N, K_2 = N_2/N.$$

Введем следующие обозначения:

n_{11}, n_{21} – число объектов 1 и 2 класса в левой ветви (второй индекс 1);

n_{12}, n_{22} – число объектов 1 и 2 класса в правой ветви (второй индекс 2);

Тогда энтропию после деления исходного набора данных на 2 части на j -ом узле можно записать в виде:

$$S^j = K_1 * S_1^j + K_2 * S_2^j;$$

$$S^j = K_1 * [-n_{11}/N_1 * \log_2(n_{11}/N_1) - n_{21}/N_1 * \log_2(n_{21}/N_1)] +$$

$$+ K_2 * [-n_{12}/N_2 * \log_2(n_{12}/N_2) - n_{22}/N_2 * \log_2(n_{22}/N_2)] \quad (2)$$

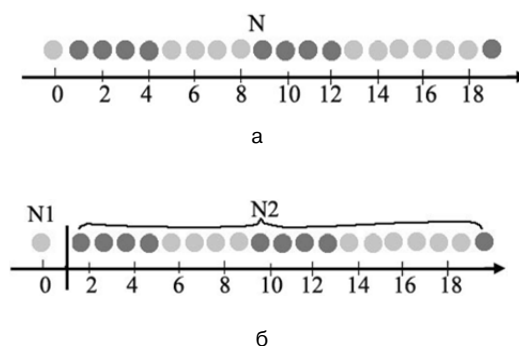


Рис. 4. Деление бинарного множества

а) — исходное множество

б) — деление на узле с координатой 1

Таким образом, рассчитывая энтропию системы на каждом узле, можно определить условие, при котором разделенная система будет характеризоваться минимальной энтропией, что соответствует максимальной упорядоченности объектов. Например, начальное значение энтропии (S^0) всего множества, представленного на Рис. 4 а, равно 0.99, после деления на первом узле $S^1=0.95$ (Рис. 4 б), после деления на 13 узле $S^{13}=0.82$, а после деления на 20 узле $S^{20}=0.95$. Значение энтропии при делении на 13 узле будет наименьшим, поэтому оно характеризует максимальную упорядоченность системы.

3. Формирование выборки пар совмещенных вторичных следов

Исходная выборка пар совмещенных следов включала 344 пары совпадающих и 344 пары не совпадающих вторичных следов, сформированных на 9 мм пулях, выстреленных из пистолета Макарова. Для класса «совпадающие следы» были отобраны пары совмещенных следов с большим и средним числом совпадающих трасс. Класс «несовпадающие следы» сформирован из следов с большим и средним числом трасс (Рис. 5 а, б). Исследуемые пары изображений следов, представленных в градациях серого, имели один размер по горизонтальной оси (720 пс) и одно пространственное разрешение равное 3.5 мкм/пиксель. Подсчет числа трасс в следах и числа совпадающих трасс велся в автоматическом режиме. Для этого изображения следов, совмещенных оператором на предвари-

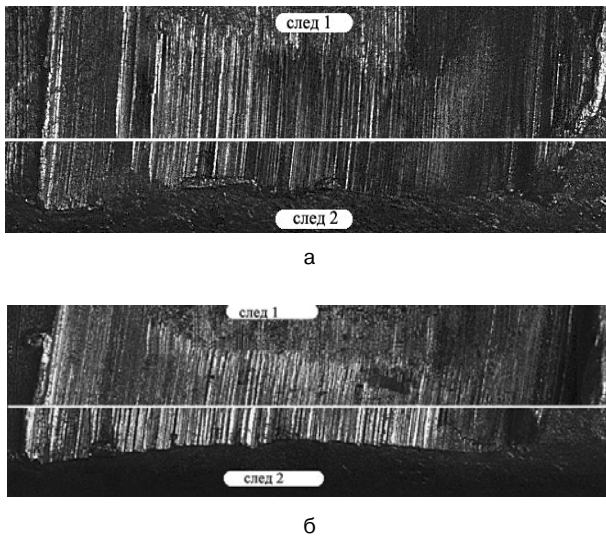


Рис. 5. Характерные пары совмещенных следов

- а) - заведомо совпадающие следы
б) - заведомо несовпадающие следы

тельном этапе, были бинаризованы в соответствии с методикой, описанной в работах [3, 6], суть которой заключается в следующем.

Каждый след поворачивался так, чтобы трассы стали вертикальными. Затем, для каждой матрицы изображения строилась нормиро-

ванная кривая средней яркости по столбцам. В местах положения трасс кривая яркости характеризуется присутствием локальных максимумов. Для удаления низкочастотных засветок и выделения яркостных пиков к кривой яркости применялась низкочастотная фильтрация. Затем низкочастотная составляющая вычиталась из исходной кривой яркости. Для удаления высокочастотных пространственных шумов к полученной кривой яркости применялся линейный сглаживающий фильтр размером 1×5 пикселей. На сглаженной кривой яркости определялись координаты локальных максимумов Z_{imax} и минимумов Z_{imin} (Рис. 6 а). Для каждого i -го максимума строилась трасса, ширина которой определялась точками пересечения кривой $Z(x)$ с горизонтальной прямой, проведенной на уровне U_i (Рис. 6 а). Величина U_i определялась как значение середины интервала между текущим локальным максимумом и ближайшим к нему минимумом. На Рис. 6 б в качестве иллюстрации представлено изображение в градациях серого повернутого вторичного следа с наложенной на него кривой яркости и бинарное изображение этого же следа, полученное по описанной выше методике.

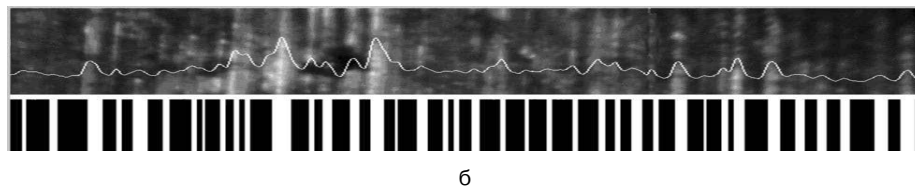
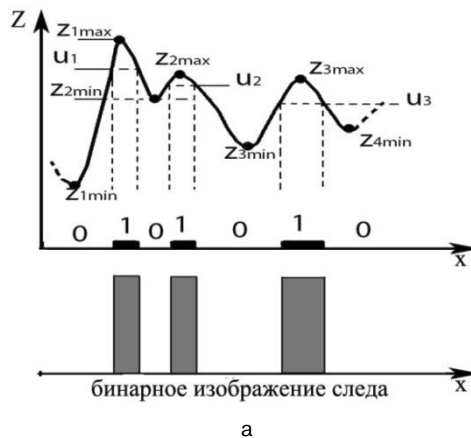


Рис.6. Формирование бинарного изображения вторичного следа

- а) - фрагмент кривой яркости с уровнями бинаризации U_1, U_2, U_3
б) - исходное изображение следа в градациях серого с наложенной кривой яркости и бинарное изображение этого же следа

На следующем этапе подсчитывается число трасс в каждом следе и число совпадающих трасс в каждой паре следов в соответствии с условием перекрытия трасс. Для этого бинарные изображения следов совмещались так, как это было сделано на предварительном этапе с изображениями, представленными в градациях серого. Это является исходным положением всех пар следов. Затем один след (условно первый) смещался относительно другого на 20 пикселей влево и проводился подсчет числа совпавших трасс в соответствии с критерием допустимого перекрытия по ширине совпадающих трасс, например, от 10% до 100%. Степень перекрытия определялась для более широкой трассы, если сопоставляемые трассы не равны по ширине. Затем первый след сдвигался на 1 пиксель вправо и процедура подсчета числа совпадающих трасс повторялась. В конечном счете первый след смещался на ± 20 пикселей относительно начального положения. Из 41 позиции определялось положение с максимальным числом совпадающих трасс для каждого критерия перекрытия совпадающих трасс (10-100%, 20-100% и т.д.). Таким образом, для каждой пары совмещенных следов для каждого критерия перекрытия трасс определялось максимальное число совпадающих трасс и, соответственно, значение параметра n_j/N_{j1} . Индекс j здесь означает условный номер пары совмещенных следов в текущей валидационной подвыборке. В последующем подсчете энтропии Шеннона учитываются только максимальные значения параметра n_j/N_{j1} для каждой пары следов.

Для каждой валидационной выборки определяется диапазон перекрытия трасс с наименьшим значением энтропии. Диапазон,

при котором чаще всего наблюдается наименьшая энтропия по всем подвыборкам и является оптимальным с точки зрения разделения объектов по категориям.

При разделении множества объектов на узлах может возникнуть проблема, обусловленная тем, что несколько объектов (обычно два) разных классов имеют одно значение n/N_1 . Эту проблему можно решить разными способами. В данном случае на вырожденном узле объекты разделялись так, чтобы получалась энтропия с минимально возможным в данном случае значением.

4. Реализация методики определения оптимального критерия совмещения трасс

Как уже отмечалось, была сформирована исходная выборка, состоящая из 344 пар заведомо совпадающих и 344 пар заведомо несовпадающих вторичных следов. На ее основе было сформировано 200 валидационных подвыборок, каждая из которых формировалась методом случайного выбора 100 пар заведомо совпадающих и 100 пар несовпадающих следов.

Для каждого критерия перекрытия (всего 10 вариантов) для всех подвыборок было подсчитано число реализаций, характеризующихся наименьшей энтропией, и построена гистограмма (Рис. 7). Из гистограммы видно, что оптимальное разделение множества пар совмещенных следов по категориям «парные следы» и «непарные следы» происходит при диапазоне перекрытия трасс по ширине от 60% до 100%. Явное доминирование данного диапазона возможно связано с тем, что изображения следов,

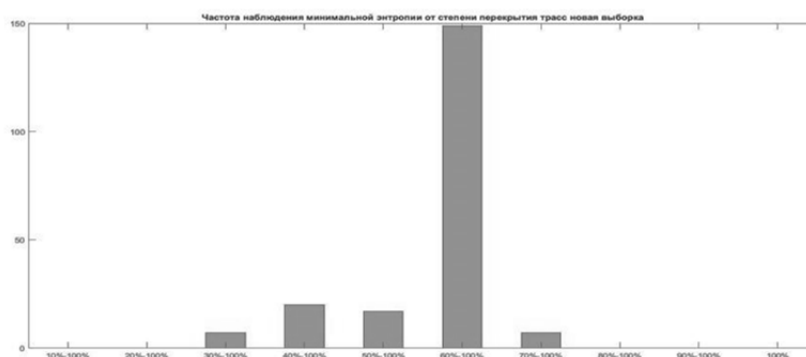


Рис. 7. Гистограмма частоты разделения объектов по категориям с минимальной энтропией для разных диапазонов перекрытия совпадающих трасс

полученные с помощью автоматизированной баллистической идентификационной системы «POISC», имеют не достаточно высокое разрешение (порядка 3.5 мкм/пиксель) из-за чего все трассы шириной 1-3.5 мкм будут иметь одинаковую ширину, равную 1 пикселю.

5. Дискуссия

1. Вероятно, что для вторичных следов, сформированных на пулях, выстреленных из других моделей оружия, например, из АКМ, оптимальным может оказаться другой критерий перекрытия совпадающих трасс.

2. Для лучшей предварительной обработки цифровых изображений следов требуется повысить разрешение изображений до 1 мкм на пиксель.

Заключение

Показано, что существует достаточно выраженный критерий отнесения трасс к категории «совпадающие» в совмещенных вторичных следах. Для изображений вторичных следов на пулях, выстреленных из пистолета Макарова, при разрешении 3.5 мкм/пиксель данным критерием является диапазон перекрытия трасс по ширине от 60% до 100%.

Результаты представленных исследований позволяют корректно подсчитывать число совпадающих/несовпадающих трасс и, соответственно, более эффективно проводить сравнение вторичных следов в автоматическом режиме.

Литература

1. Типовые экспертные методики исследования вещественных доказательств. Ч.1., Под редакцией Ю.М.Дильдина. Москва, ИНТЕРКРИМ-ПРЕСС, 2010, с.72-81.
2. Федоренко В.А., Мыльцина О.А. Концепция математической модели оценки уникальности наборов совпадающих трасс во вторичных следах на выстреленных пулях // Известия Саратовского государственного университета. Новая серия. Экономика. Управление. Право / 2016, 16(2), с. 209-213.
3. Федоренко В.А., Навроцкая Е.В. Критерии и алгоритм оценки уникальности комплексов совпадающих трасс в следах на выстреленных пулях // Информационные технологии и вычислительные системы / 2019, №1, с.110-119.
4. Biasotti A. 1959. A Statistical Study of the Individual Characteristics of Fired Bullets. *Journal Forensic Sciences*. 4 (1):34–50.
5. Chen Z., Chu W., Soons J. A., Thompson R. M., Song J., Zhao X. 2019. Fired bullet signature correlation using the Congruent Matching Profile Segments (CMPS) method. *Forensic Science International*. 305:10-19.
6. Chen Z., Song J., Soons J. A., Thompson R. M., Zhao X. 2020. Pilot study on deformed bullet correlation. *Forensic Science International*. 306:1-11.
7. Eric Hare, Heike Hofmann, Alicia Carriquiry, Automatic Matching of Bullet Land // *The Annals of Applied Statistics*, 2017, Vol. 11, No. 4, 2332–2356 <https://doi.org/10.1214/17-AOAS1080>
8. Eric Hare, Heike Hofmann, Alicia Carriquiry, Algorithmic Approaches to Match Degraded Land Impressions // *Law Probability and Risk*. December 2017.
9. The IBIS Solution <https://www.ultraforensictechnology.com/en/products-and-services/firearm-and-tool-mark-identification-ibisr/the-ibisr-solution-integrated-ballistic-identification-system> дата обращения 12.12.2022 г.
10. <https://wiki.loginom.ru/articles/inform-entropy.html> дата обращения -15 декабря 2022 г.

Сорокина Ксения Олеговна. ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского», Саратов. Программист. Количество печатных работ: 8. Область научных интересов: идентификация огнестрельного оружия, обработка цифровых изображений, информационные технологии. E-mail: lorredos@gmail.com

Федоренко Владимир Александрович. ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского», Саратов. Заведующий лабораторией, кандидат физико-математических наук, доцент. Количество печатных работ: более 110 (в т.ч. 2 монографии). Область научных интересов: идентификация огнестрельного оружия, обработка цифровых изображений. E-mail: fed77@yandex.ru

Estimation of the Optimal Criterion for Matching Coinciding Stria in Marks of Rifling Lands

K. O. Sorokina, V. A. Fedorenko

Saratov State University, Saratov, Russia

Abstract. Algorithms for automatic comparison of the traces of the rifling lands (secondary toolmarks) are currently under active development. The calculation of a quantitative estimate based on the results of the comparison of the similarity of the traces of the rifling lands is also being investigated. Determining the optimal criterion for categorizing striae as "matching" in coincident secondary toolmarks is an actual problem. Our studies have shown that assigning traces to the "matching" class can be performed using Shannon information entropy. In this case, the Shannon entropy is used to estimate the criterion of optimal striae intersection. To carry out a model experiment, a sample of 344 pairs of obviously matching and 344 pairs of obviously non-matching secondary toolmarks was formed. On its basis, 200 validation subsamples were formed. The realizations characterized by the lowest entropy were calculated for each criterion of striae overlap in width (10%-100%, 20%-100%, ..., 100%) for all subsamples. It was shown that for secondary toolmarks on bullets fired from a Makarov pistol, this criterion is the interval of striae overlaps in width from 60% to 100%.

Keywords: traces of rifling lands, matching striae, Shannon entropy, validation.

DOI 10.14357/20718632230105

References

1. Tipovye ekspertnye metodiki issledovaniia veshchestvennykh dokazatel'stv. Ch.1., Pod redaktsiei Iu.M.Dil'dina. [Typical Expert Methods of Examination of Physical Evidence. Part 1, Under the editorship of Yu.M. Dildin]. Moscow: INTERKRIM-PRESS, 2010, pp. 72-81.
2. Fedorenko V.A., Myl'tsina O.A. 2016. Kontseptsiiia matematicheskoi modeli otsenki unikal'nosti naborov sovpadayushchikh trass vo vtorichnykh sledakh na vystrelennykh puliakh [The concept of a mathematical model for estimating the uniqueness of sets of matching striae in the secondary toolmarks on the fired bullets]. Izvestia Saratovskogo gosudarstvennogo universiteta. Novaia seriia. Ekonomika. Upravlenie. Pravo [Proceedings of Saratov State University. New series. Economics. Management. Law.]. 16(2):209-213.
3. Fedorenko V. A., Navrotskaya E. V. 2019. Kriterii i algoritm otsenki unikal'nosti kompleksov sovpadayushchikh trass v sledakh na vystrelennykh pulyakh. [Criteria and algorithm for evaluating the uniqueness of complexes of matching tracks in traces on fired bullets]. Informatsionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy [Information Technologies and computing systems]. 1:110-120.
4. Biasotti A. 1959. A Statistical Study of the Individual Characteristics of Fired Bullets. Journal Forensic Sciences. 4 (1):34-50.
5. Chen Z., Chu W., Soons J. A., Thompson R. M., Song J., Zhao X. 2019. Fired bullet signature correlation using the Congruent Matching Profile Segments (CMPS) method. Forensic Science International. 305:10-19.
6. Chen Z., Song J., Soons J. A., Thompson R. M., Zhao X. 2020. Pilot study on deformed bullet correlation. Forensic Science International. 306:1-11.
7. Eric Hare, Heike Hofmann, Alicia Carriquiry, Automatic Matching of Bullet Land // The Annals of Applied Statistics, 2017, Vol. 11, No. 4, 2332-2356 <https://doi.org/10.1214/17-AOAS1080>
8. Eric Hare, Heike Hofmann, Alicia Carriquiry, Algorithmic Approaches to Match Degraded Land Impressions // Law Probability and Risk. December 2017.
9. The IBIS Solution <https://www.ultraforensictechnology.com/en/products-and-services/firearm-and-tool-mark-identification-ibisr/the-ibisr-solution-integrated-ballistic-identification-system> дата обращения 12.12.2022 г.
10. <https://wiki.loginom.ru/articles/inform-entropy.html> дата обращения 15 декабря 2022 г.

Sorokina K.O. Programmer of the educational and scientific laboratory of forensic materials engineering of the Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, e-mail: lorredos@gmail.com

Fedorenko V.A. Candidat of Physico-Mathematical Sciences. Head of the educational and scientific laboratory of forensic materials engineering of the Saratov State University, 83, Astrakhanskaya Str., Saratov, 410012, Russia, e-mail: fed77@yandex.ru