

*В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, И.В. КОРЫТЦЕВ, канд. техн. наук,
Г.И. СИДОРОВ, канд. техн. наук, Э.К. ПОТРИМАЙ*

СИНТЕЗ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ МУЛЬТИМЕДИЙНОГО СТРЕЛКОВОГО КОМПЛЕКСА

Введение

Универсальный мультимедийный стрелковый тренажер обеспечивает приобретение навыков стрельбы в условиях, приближенных к боевым, из огнестрельного оружия, а также из макетов оружия с лазерными вставками.

Стрелок производит выстрел из огнестрельного или пневматического оружия по экрану, на который проецируется изображение видеомишени либо видеосюжета, хранящиеся в памяти компьютера. В тканевом либо пленочном экране образуется пробоина. Координаты пробоины оцениваются видеоизмерителем. Положение пробоины сопоставляется с положением мишени или видеосюжета и оценивается результат стрельбы [1].

При стрельбе из макета оружия с лазерным излучателем "пробоиной" является кратковременное пятно, образуемое лазерным лучом на экране.

Важными параметрами мультимедийного стрелкового комплекса являются:

- точность определения координат пробоины;
- промежуток между выстрелами;
- количество одновременно обрабатываемых целей.

Алгоритмы обработки сигналов, используемые в комплексе, должны обеспечить высокое быстродействие для достижения минимально возможного промежутка между выстрелами, а также высокую точность определения координат пробоины.

В статье рассматривается синтез оптимальных алгоритмов обработки сигналов с целью обнаружения и измерения координат центра пробоины или пятна, образуемого лучом лазера на экране.

Последующая оценка эффективности работы алгоритма обработки осуществляется путем анализа статистических данных, полученных при проведении моделирования и тестирования разработанного алгоритма в реальных условиях.

Синтез алгоритма обработки сигналов будет осуществлен в соответствии с упрощенной схемой системы обработки сигналов мультимедийного стрелкового комплекса, приведенной на рис. 1.

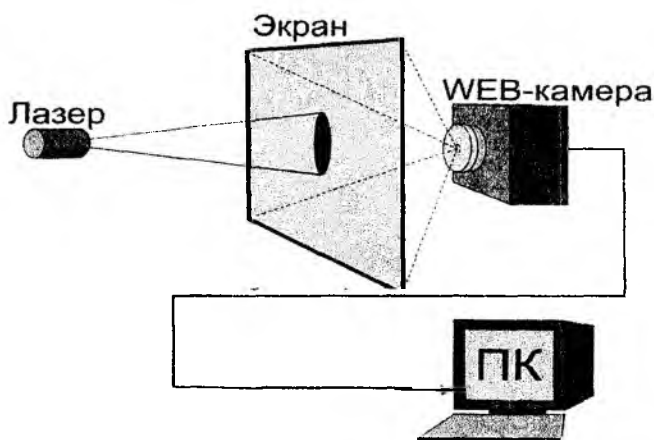


Рис. 1. Упрощенная структура системы обработки сигналов мультимедийного стрелкового комплекса

Алгоритм обнаружения сигнального пятна

Синтез алгоритмов обработки сигналов в мультимедийном стрелковом комплексе рассматривается применительно к двоично квантованному изображению, что позволит значительно повысить скорость реализации полученных алгоритмов. С точки зрения теории статистических решений, задача обнаружения пятна двоично квантованных сигналов формулируется следующим образом.

Пусть произведена выборка значений огибающей

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{11} \ x_{12} \dots x_{1N} \\ x_{21} \ x_{22} \dots x_{2N} \\ \dots \dots \dots \\ x_{N1} \ x_{N2} \dots x_{NN} \end{array} \right\}$$

на $N \times N$ соседних позициях развертки фотоприемника. Каждое из выборочных значений x_{kl} подвергается затем двоичному квантованию по амплитуде путем сравнения с пороговым уровнем x_l . Исход единичного испытания x_{kl} считается положительным, если соответствующее выборочное значение превышает порог ($x_{kl}=1$), и отрицательным, если порог не превышает ($x_{kl}=0$).

Совокупность исходов после квантования

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{11} \ x_{12} \dots x_{1N} \\ x_{21} \ x_{22} \dots x_{2N} \\ \dots \dots \dots \\ x_{N1} \ x_{N2} \dots x_{NN} \end{array} \right\}$$

представляет собой последовательность нулей и единиц. Задача решающего алгоритма состоит в том, чтобы на основе анализа принятой выборки нулей и единиц решить оптимальным образом, представляет ли эта выборка пятно полезного сигнала или она относится к помехе.

Для решения сформулированной задачи решающий алгоритм сводится к проверке гипотезы H_0 об отсутствии полезного сигнала против альтернативной гипотезы H_1 о его наличии, т.е. к образованию отношения правдоподобия и сравнению этого отношения с некоторым наперед заданным числом, выбираемым исходя из априорной вероятности наличия сигнала и потерь, приписываемых ошибочным решениям (критерий среднего риска), или исходя из допустимой вероятности ложного обнаружения (критерий Неймана - Пирсона) [2, 3].

Для синтеза алгоритма обнаружения необходимо прежде всего определить функцию правдоподобия гипотез H_0 и H_1 . Обозначим p_{kl} – вероятность получения единицы на позиции (k, l) пачки, а q_{kl} – вероятность получения нуля на этой позиции. Вероятность получения любого из двух возможных исходов в результате испытания с номером (k, l) можно записать в виде

$$P(x_{kl}) = p_{kl}^{x_{kl}} \cdot q_{kl}^{1-x_{kl}} \quad (1)$$

Будем в дальнейшем считать выборки огибающей статистически независимыми. Тогда совместная вероятность получения некоторой комбинации нулей и единиц на всех N^2 позициях пачки

$$P(x_{11} \dots x_{NN}) = \prod_{k=1}^N \prod_{l=1}^N p_{kl}^{x_{kl}} \cdot q_{kl}^{1-x_{kl}} \quad (2)$$

Теперь на основании формулы (2) можно записать выражение для условной вероятности любой комбинации нулей и единиц при наличии и отсутствии полезного сигнала.

При наличии полезного сигнала

$$P(x_{11} \dots x_{NN} | H_1) = \prod_{k=1}^N \prod_{l=1}^N p_{S_{kl}}^{x_{kl}} \cdot q_{S_{kl}}^{1-x_{kl}}, \quad (3)$$

где $p_{S_{kl}}$ - вероятность получения единицы на позиции (k, l) сигнального пятна;

$$q_{S_{kl}} = 1 - p_{S_{kl}}.$$

При отсутствии сигнала

$$P(x_{11} \dots x_{NN} | H_0) = \prod_{k=1}^N \prod_{l=1}^N p_{N_{kl}}^{x_{kl}} \cdot q_{N_{kl}}^{1-x_{kl}}, \quad (4)$$

где $p_{N_{kl}}$ - вероятность получения единицы на позиции (k, l) в области помехи, одинаковая для всех (k, l) ;

$$q_{N_{kl}} = 1 - p_{N_{kl}}.$$

Будем считать заданным порог обнаружения l_0 . Тогда, с учетом выражений (3) и (4) условие оптимального обнаружения пятна запишется в виде

$$\prod_{k=1}^N \prod_{l=1}^N \left(\frac{p_{S_{kl}}}{p_N} \right)^{x_{kl}} \cdot \left(\frac{q_{S_{kl}}}{q_N} \right)^{1-x_{kl}} \geq l_0. \quad (5)$$

Логарифмируя выражение (5), получаем

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \left[x_{kl} \ln \frac{p_{S_{kl}}}{p_N} + (1-x_{kl}) \ln \frac{q_{S_{kl}}}{q_N} \right] \geq \ln l_0.$$

Последнее выражение после элементарных преобразований приводится к виду

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \ln \frac{p_{S_{kl}} q_N}{p_N q_{S_{kl}}} \geq \ln l_0 - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \ln \frac{q_{S_{kl}}}{q_N}. \quad (6)$$

Обозначая в выражении (6)

$$\eta_{kl} = \ln \frac{p_{S_{kl}} q_N}{p_N q_{S_{kl}}}, \quad \mathfrak{S} = \ln l_0 - \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \ln \frac{q_{S_{kl}}}{q_N},$$

запишем формулу для алгоритма оптимального обнаружения пачки двоично квантованных сигналов в следующем окончательном виде

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \eta_{kl} \geq \mathfrak{S}. \quad (7)$$

В соответствии с формулой (7) алгоритм оптимального обнаружения пачки квантованных сигналов сводится к выполнению следующих операций.

1. Прием и запоминание квантованных сигналов (нулей и единиц) в пределах размеров приемной матрицы (на $m \times n$ позициях).
2. Суммирование значений предварительно запрограммированной весовой функции на позициях подматрицы размерностью $N \times N$, на которых получены единицы.
3. Сравнение полученной суммы с пороговым числом \mathfrak{S} и выдача решения об обнаружении или необнаружении пятна.

Далее в случае необнаружения рассматривается следующая подматрица $N \times N$, сдвинутая по горизонтальной оси вправо на одну позицию. Аналогично осуществляется сдвиг по вертикальной оси сверху вниз. Операции 2 и 3 повторяются до тех пор, пока не будет принято решение об обнаружении пятна на экране или не будут проанализированы все позиции на приемной матрице.

Алгоритм оценки координат центра пятна

Пусть центр пятна O имеет горизонтальную координату m_0 и вертикальную n_0 . Для оценки координат центра пятна используется функция правдоподобия оцениваемых параметров m_0 и n_0 , получаемая непосредственно из выражения (3) для условной вероятности комбинации нулей и единиц при наличии сигнала

$$L(m_0, n_0) = \prod_{k=1}^N \prod_{l=1}^N p_{S_{kl}}^{x_{kl}} \cdot q_{S_{kl}}^{1-x_{kl}}.$$

Входящая в это выражение вероятность обнаружения сигнала на единичной позиции (k, l) $p_{S_{kl}}$ для случая нефлуктуирующего сигнала определяется формулой

$$p_S(k, l) = 1 - \int_0^{x_l} x_{kl} \exp\left(-\frac{x_{kl}^2 + a_{kl}^2}{2}\right) I_0(a_{kl} x_{kl}) dx_{kl},$$

т.е. является функцией параметра a_{kl} (параметр x_l считается фиксированным). Однако все значения a_{kl} определяются однозначно, если известна зависимость

$$a_{kl} = a_0 \cdot g((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)), \quad (8)$$

где $g((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))$ - функция огибающей пятна; (m_{kl}, n_{kl}) - координаты позиции пятна (k, l) ; a_0 - отношение сигнала к помехе в центре пятна.

Таким образом, вероятность $p_{S_{kl}} = f(a_0, (m_0, n_0))$ является функцией трех неизвестных параметров $a_0, (m_0, n_0)$. В дальнейшем будем считать параметр a_0 фиксированным.

С учетом (8) и сделанных допущений функция правдоподобия для оценки (m_0, n_0) записывается в виде

$$L(m_0, n_0) = \prod_{k=1}^N \prod_{l=1}^N p_{S_{kl}}^{x_{kl}}((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) \cdot q_{S_{kl}}^{1-x_{kl}}((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)).$$

Как известно, функция правдоподобия может быть заменена некоторой своей монотонной функцией [4], в соответствии с этим получим логарифм функции правдоподобия

$$\ln L(m_0, n_0) = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} [\ln p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))] - \ln q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \ln q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)). \quad (9)$$

Для нахождения уравнений правдоподобия продифференцируем (9) по оцениваемым параметрам m_0 и n_0

$$\frac{\partial \ln L}{\partial m_0} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \left[\frac{1}{p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0} - \frac{1}{q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0} \right] + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \frac{1}{q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0}, \quad (10.1)$$

$$\frac{\partial \ln L}{\partial n_0} = \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \left[\frac{1}{p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial n_0} - \frac{1}{q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial n_0} \right] + \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N \frac{1}{q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial n_0} \quad (10.2)$$

Вторая сумма в правой части выражений (10.1) и (10.2) не зависит от выборки принимаемых сигналов, а определяется только формой огибающей пятна. При симметричной форме этой огибающей рассматриваемая сумма приблизительно равна нулю.

Учитывая последнее обстоятельство, а также используя очевидные соотношения

$$\frac{\partial q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0} = -\frac{\partial p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial n_0} = -\frac{\partial p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial n_0},$$

получим уравнения правдоподобия для оценки координат m_0 и n_0 в виде

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \cdot \frac{1}{p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) \cdot q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0} \Bigg|_{m_0 = \tilde{m}_0} = 0, \quad (12.1)$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \cdot \frac{1}{p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) \cdot q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial n_0} \Bigg|_{n_0 = \tilde{n}_0} = 0. \quad (12.2)$$

Обозначим

$$\eta_m((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) = \frac{1}{p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) \cdot q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0}, \quad (13.1)$$

$$\eta_n((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) = \frac{1}{p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) \cdot q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial n_0}. \quad (13.2)$$

Дискретные функции (13.1) и (13.2) можно рассматривать как функции веса позиций пятна в оценке координат точки попадания в цель. Огибающие этих функций характеризуют количество информации о точке попадания, содержащееся в «единицах», расположенных на различных расстояниях от центра пятна.

С учетом (13.1) и (13.2) уравнения правдоподобия (12.1) и (12.2) записываются в виде

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \cdot \eta_m((m_{kl}, n_{kl}), (\tilde{m}_0, \tilde{n}_0)) = 0, \quad (14.1)$$

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \cdot \eta_n((m_{kl}, n_{kl}), (\tilde{m}_0, \tilde{n}_0)) = 0. \quad (14.2)$$

В соответствии с этими уравнениями, оценка максимального правдоподобия координат центра пятна получается из условия равенства нулю суммы значений функций η_m и η_n на позициях, где сигнальные импульсы превышают пороговый уровень амплитудного квантования (в этих точках $x_{kl} = 1$). Принципиально алгоритм (14.1), (14.2) реализуется путем сдвига весовых функций относительно принятой реализации сигнала (изображения). При этом процесс сдвига и суммирование значений весовых функций на позициях, где $x_{kl} = 1$, повторяется до тех пор, пока суммы (14.1) и (14.2) не станут равными нулю (или меньше по абсолютной величине некоторого фиксированного числа).

Пояснение процесса оценки положения центра пятна для одномерного случая приведено на рис. 4.

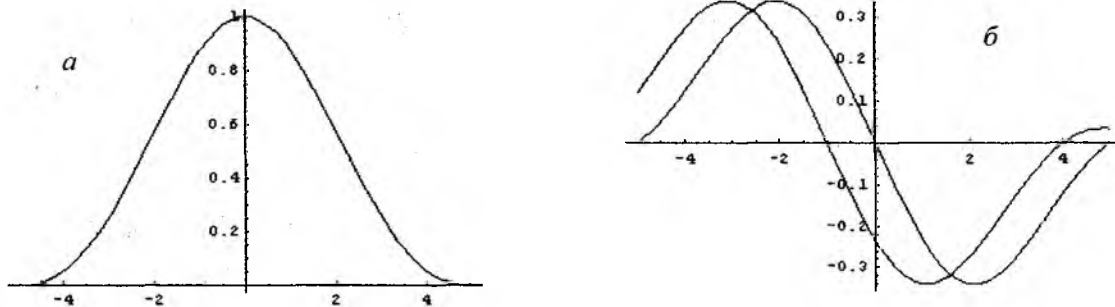


Рис. 4. Пояснение процесса оценки координат центра пятна сигнала:
a – огибающая пятна, *б* – сдвиг весовой функции относительно анализируемой реализации

Вид модельных функций, применяемых в описанной выше задаче определения координат центра пятна, приведен на рис. 5.

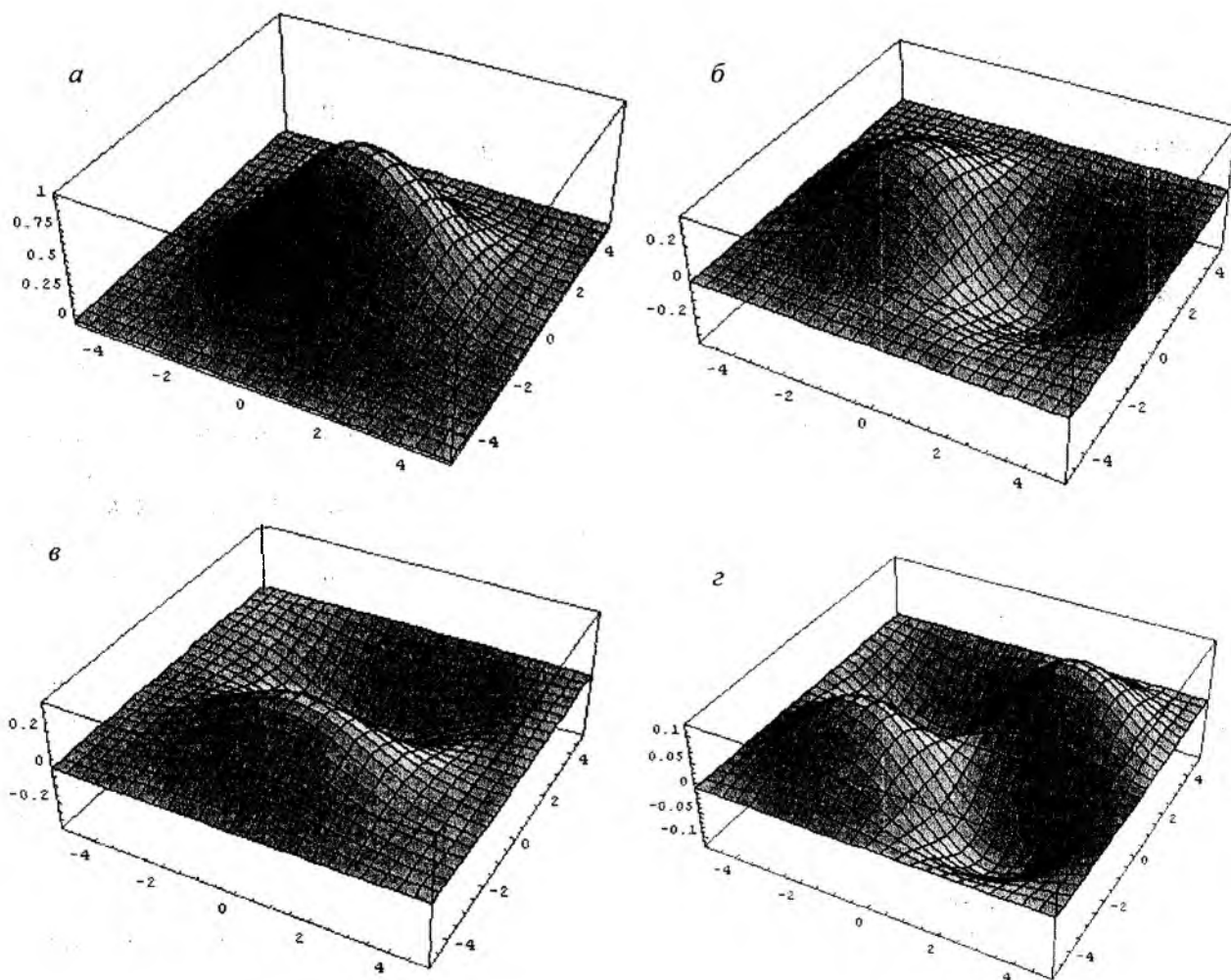


Рис. 5. Формы огибающих сигнала и весовых функций:
a – форма огибающей пятна, *б* – весовая функция для определения горизонтальной координаты центра пятна, *в* – весовая функция для определения вертикальной координаты центра пятна, *г* – весовая функция для определения двух координат центра пятна

Для оценки координат центра пятна может быть использована несколько иная модификация рассмотренного алгоритма. С целью получения модифицированного алгоритма возьмем двойную смешанную производную логарифма функции правдоподобия, определяемого выражением (9), по оцениваемым параметрам $\frac{\partial^2 \ln L}{\partial m_0 \partial n_0}$. С учетом (11) получим следующее уравнение правдоподобия для оценки двух координат центра пятна:

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \cdot \frac{1}{p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) \cdot q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial^2 p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0 \partial n_0} \Bigg|_{\substack{m_0 = \tilde{m}_0 \\ n_0 = \tilde{n}_0}} = 0. \quad (15)$$

Введем обозначение

$$\eta_{mn}((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) = \frac{1}{p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0)) \cdot q((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))} \cdot \frac{\partial^2 p((m_{kl}, n_{kl}), (m_0, n_0))}{\partial m_0 \partial n_0}. \quad (16)$$

Тогда уравнение правдоподобия запишется в виде

$$\sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N x_{kl} \cdot \eta_{mn}((m_{kl}, n_{kl}), (\tilde{m}_0, \tilde{n}_0)) = 0. \quad (17)$$

Вид весовой функции η_{mn} , используемой в выражении (17), представлен на рисунке 5,2. Реализуется алгоритм (14.1), (14.2) оценки координат центра пятна также путем последовательного сдвига используемых весовых функций относительно принятой реализации сигнала (изображения) и выполнения на каждом шаге итераций математических операций, предусмотренных алгоритмом.

Выводы

Синтезированы оптимальные алгоритмы обработки сигналов в мультимедийном стрелковом тренажере методом теории статистических решений. Получен алгоритм оптимального обнаружения «пробоины», формируемой стрелковым оружием, или обнаружения светового пятна, образуемого лучом лазерного оружия. Синтезирован оптимальный алгоритм, позволяющий формировать максимально правдоподобные оценки пространственных координат центра светового пятна или пробоины на экране комплекса.

Полученные оптимальные алгоритмы обработки сигналов позволят существенно повысить качественные показатели мультимедийных стрелковых тренажеров.

Список литературы: 1. *Спосіб визначення координат точки влучення кулі у відеоішень при навчанні стрільби та пристрій для його здійснення* : Патент на винахід №95007. Україна. МПК F41G3/26 / О.В. Зубков, І.В. Коритцев, Г.І. Сидоров, Я.Г. Сидоров - №а2009 12569; Заяв. 04.04.2009; Опубл. 25.06.2011, Бюл. №12. - 3 с. 2. *Чердынцев В.А.* Радиотехнические системы. – М. : Высш. шк., 1988. 3. *Тихонов, В.И.* Оптимальный прием сигналов. – М. : Радио и связь, 1983. 4. *Коростелев, А.А.* Пространственно-временная теория радиосистем. – М. : Радио и связь, 1987.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 17.02.2012