

М.С. Андрущенко, кандидат технических наук

В.В. Степанов, доктор технических наук

Обработка информации в мультисенсорных системах высокоточного оружия

В статье рассмотрены возможные пути построения систем обработки данных в зарубежных мультисенсорных системах обнаружения и наведения ВТО, в том числе, основные положения классификации вариантов реализации мультисенсорных систем с использованием технологии *Sensor Data Fusion* и формализованные оценки вероятностных характеристик обнаружения по правилу Демпстера. В качестве конкретного примера рассмотрено построение системы обнаружения касетного боевого элемента PI SADARM.

Комбинации нескольких сенсоров стали практически обязательным элементом систем обнаружения и наведения современного высокоточного оружия (ВТО) [1, 2]. Можно выделить два основных варианта их использования в процессе обнаружения (наведения). В первом варианте информация последовательно передается от одного датчикового канала к другому. К этому варианту, например, может быть отнесена противорадиолокационная ракета ARMIGER [1], в которой сначала для обнару-

жения РЛС противника используется бортовая станция радиотехнической разведки, а затем на конечном участке наведение обеспечивает инфракрасный сенсор.

Иной, более сложный, вариант применения базируется на одновременном съеме информации с нескольких датчиков. Применение нескольких каналов обнаружения цели и обработка получаемой информации в современных зарубежных системах ВТО осуществляется с помощью технологии *Sensor Data Fusion* (SDF) [3].

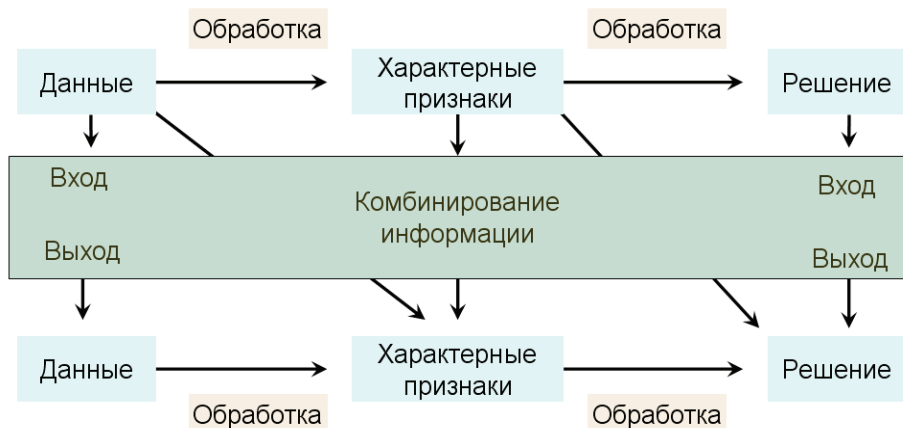


Рисунок 1 – Уровни комбинирования информации в системах SDF

Комбинирование информации в мультисенсорных системах с использованием SDF

Процесс комбинирования информации с использованием SDF производится на нескольких иерархических уровнях: от уровня комбинирования данных, регистрируемых в виде одномерных сигналов, до уровня совместной об-

работки сигналов в виде вектора состояния, или уровня принятия решения. В общем виде уровни комбинирования информации можно разделить следующим образом [4]:

- высокий уровень – уровень принятия решений (“decision level”);
- средний уровень – уровень обработки ин-

формации о локальных особенностях (характерных признаках) исследуемой сцены;

- низкий уровень – уровень обработки одномерной информации (или данных), регистрируемой сенсорами.

Чем выше уровень, тем меньшее количество информации обрабатывается при ее комбинировании. Эту общую классификацию можно детализировать более подробно с учетом вида информации на входе и выходе комбинированной системы (рисунок 1).

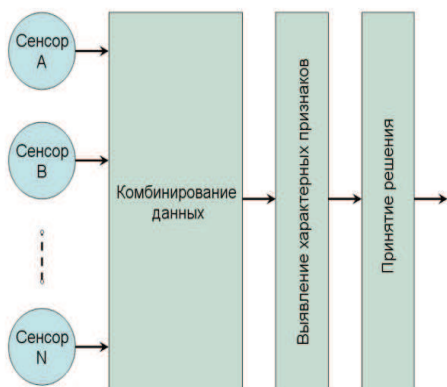


Рисунок 2 – Централизованное построение системы SDF (комбинирование данных)

При децентрализованном построении система состоит из нескольких каналов (рисунок 3) [5]. Каждый канал локально обрабатывает данные сенсора, проверяет их и проводит оценку состояния. Затем происходит обмен информацией между каналами (в виде оценок состояния или вероятностных характеристик) для ее уточнения и получения глобальных оценок на следующем этапе.

Рассмотрим конкретный пример реализации мультисенсорной системы обнаружения кассетного боевого элемента (КБЭ) PI SADARM [1, 2].

Система PI SADARM (рисунок 4) предназначена для уничтожения наземной боевой техники. Данный КБЭ представляет собой цилиндрический контейнер с взрывчаткой. Облицованная металлом кумулятивная воронка

На практике зачастую применяется комплексирование данных видов комбинирования информации, т.е. объединение нескольких уровней обработки в рамках разрабатываемого устройства или системы [5].

Централизованное и децентрализованное построение системы SDF

Централизованная архитектура предполагает, что только единственный процессор обрабатывает все данные (рисунок 2) [5].

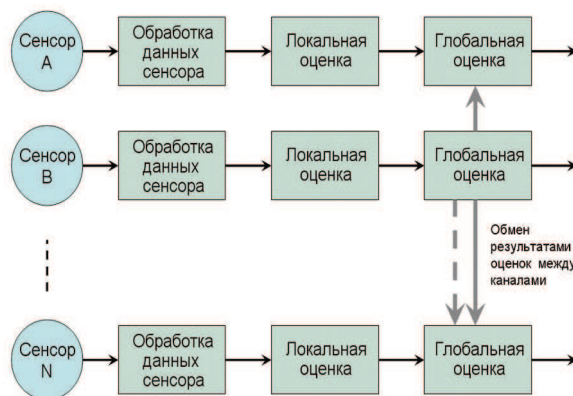


Рисунок 3 – Децентрализованное построение системы SDF

формирует при взрыве ударное ядро, способное с дальности более 200 м поразить цель типа «танк». Контейнер снабжен аэродинамическим устройством (парашютом), который после выброса из носителя обеспечивает сравнительно медленное снижение боеприпаса. Несимметричная аэродинамическая схема обеспечивает при спуске его быстрое вращение вокруг вертикальной оси. На заданной высоте КБЭ переходит в режим поиска цели. Система обнаружения PI SADARM состоит из трех датчиков обнаружения [6]: радиолокационного и радиотеплового датчиков миллиметрового диапазона длин волн (длина волны $\lambda=8\text{мм}$) и сенсора ИК-диапазона. Два первых сенсора выполнены с применением общей антенны с шириной диаграммы направленности антенны $4,5^\circ$ (рисунки 5 и 6) [6].

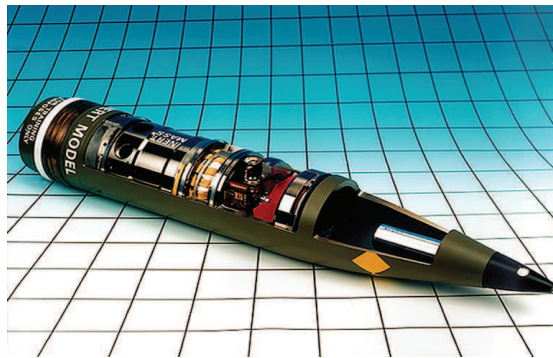


Рисунок 4 – Артиллерийский снаряд-носитель с двумя КБЭ PI SADARM

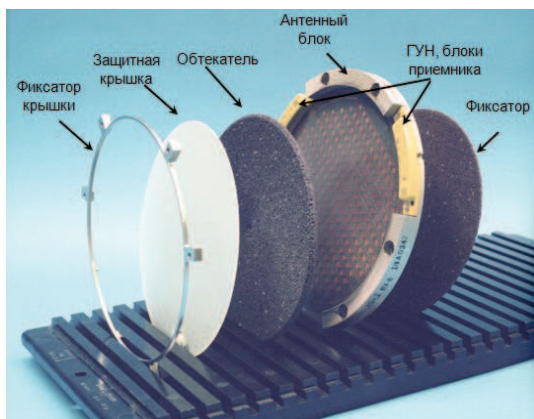


Рисунок 5 – Антенный блок радиолокационного и радиотеплового сенсоров

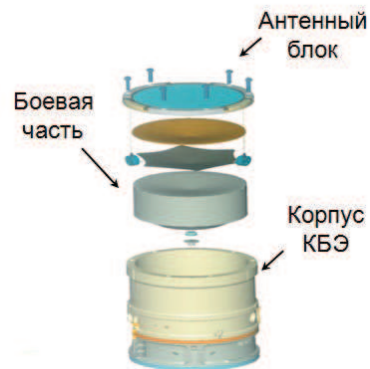


Рисунок 6 – Антенный блок, боевая часть и корпус КБЭ

ИК-датчик с линейкой из 24 фотоприемников имеет высокое разрешение и применя-

ется для определения контура цели и выбора точки прицеливания [6] (рисунки 7, 8).

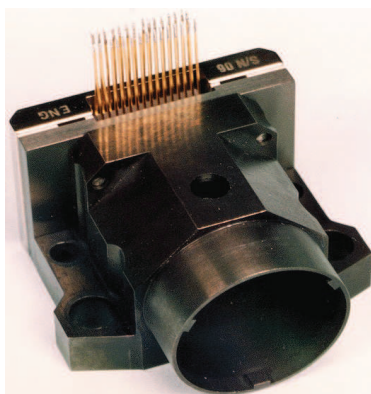


Рисунок 7 – ИК-сенсор

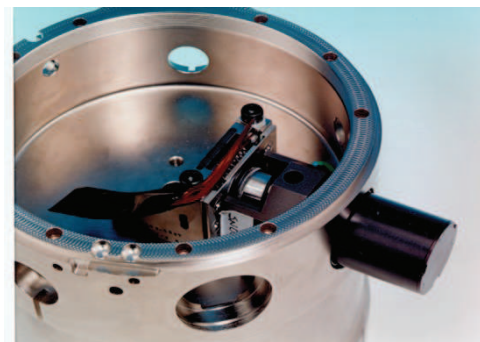


Рисунок 8 – ИК-сенсор в корпусе КБЭ

На рисунке 9 представлены взаимное расположение и геометрические размеры элементов разрешения радиолокационного и радиотеплового канала миллиметрового диапазона и линейки сенсоров ИК-канала [6].

Радиолокатор используется как в режиме поиска цели, так и в режиме высотомера. Активный поиск начинается на высоте около 165 м. Угол отклонения оси поля зрения датчиков от вертикали составляет примерно 38°.

При спуске и вращении поле зрения датчика описывает на местности сходящуюся спираль и производит сплошной просмотр местности. В системе также имеется магнитометр, приме-

няемый для определения скорости вращения (сканирования). Эта информация позволяет более точно осуществлять пространственную селекцию целей.

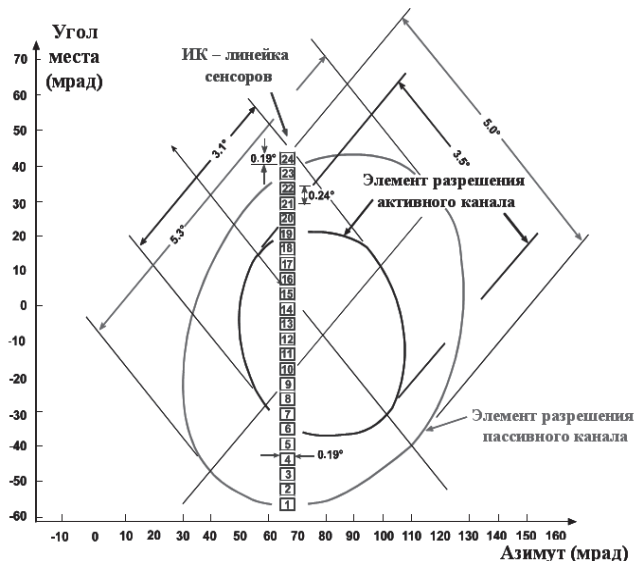


Рисунок 9 – Геометрические характеристики элементов разрешения сенсоров КБЭ PI SADARM

Процессор осуществляет непрерывную обработку поступающей с датчиков информации и формирование на ее основе сигнала инициирования боевой части. Мгновенное поле зрения датчика координировано с направлением прицеливания с учетом време-

ни срабатывания КБЭ. Боевая часть типа «ударное ядро» направляется в цель со скоростью до 2 км/с.

Блок-схема системы обнаружения PI SADARM представлена на рисунке 10 [6].

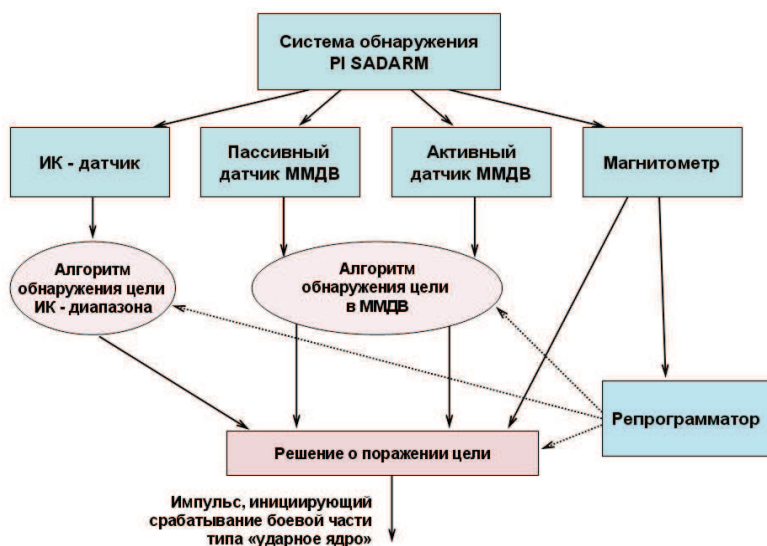


Рисунок 10 – Блок-схема системы обнаружения PI SADARM

После первичной обработки сигналов, регистрируемых каждым из датчиков СВЧ-модуля, информация о возможной цели по-

ступает в процессор блока миллиметрового диапазона, где с применением специальных алгоритмов принимается решение о наличии

или отсутствии цели. Далее информация о предполагаемой цели поступает в единый для всей системы процессор, куда также поступают данные от ИК-сенсора.

После завершающей процедуры комбинирования информации, поступившей из всех трех каналов обнаружения, принимается окончательное решение о наличии цели и

формировании импульса, инициирующего срабатывание боевой части типа «ударное ядро».

Проследивая информационные связи между различными сенсорами, применяющимися в КБЭ PI SADARM, соответствующую им схему построения системы SDF можно представить следующим образом (рисунок 11).

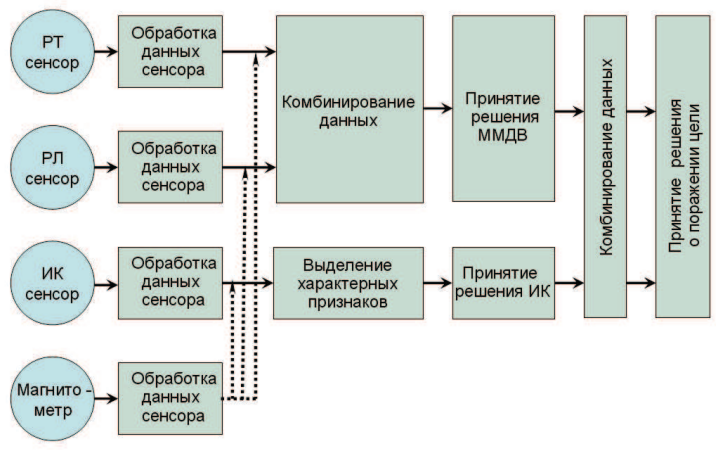


Рисунок 11 – Схема построения системы SDF в КБЭ PI SADARM

Сравнение со схемами, приведенными на рисунках 2 и 3, показывает, что здесь имеются особенности как централизованной, так и децентрализованной схем построения SDF.

Формализация оценок вероятностных характеристик обнаружения мультисенсорных систем

Для проведения операций по комбинированию информации в системах обнаружения SDF существует несколько подходов: метод Байеса, теория Демпстера-Шейфера, применение нечеткой логики (искусственных нейронных сетей и “Fuzzy Logic”) и др. [7, 8].

Анализ зарубежных публикаций (см. например, работы [9–11]) показывает, что наиболее часто в многоканальных системах обнаружения (наведения) ВТО применяются алгоритмы обработки информации, использующие основные положения теории свидетельств Демпстера – Шейфера (ТДШ) [12, 13]. Ее отличительной особенностью является возможность математического описания состояний *неопределенности*. Данная теория

оперирует понятиями меры *доверия* (belief) или *поддержки* (support), а также меры *правдоподобия* (plausibility). Основанием ее является неклассическая идея «*основной массы вероятности*» как альтернатива традиционной вероятности. ТДШ не требует выдвижения предположений о вероятности отдельных элементов множества или интервала. Вместо этого она дает возможность принятия решений для неполной или неопределенной информации.

По сравнению с методом Байеса, в котором рассматриваются априорные вероятности, здесь требуется предварительное назначение *основной массы вероятности*, которая отражает начальное знание о системе, включая и ее *неопределенные* состояния. Значение *основной массы вероятности* (будем ее далее также называть *массой*), обозначаемое *m*, является основной мерой, характеризующей *доверие* гипотезы:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \in P(X)} m(A) = 1 \end{cases}$$

где \emptyset – пустое множество,

A – гипотеза или множество.

Значение *массы* пустого множества по определению равно нулю. Значение *массы* оставшихся элементов показательного множества нормированы на единичную сумму. Значение *массы* $m(A)$ элемента показательного множества A выражает соотношение всех уместных и доступных свидетельств, которые поддерживают утверждение, что определенный элемент X принадлежит A , но не принадлежит ни одному подмножеству A . Значение величины $m(A)$ относится только к множеству A и не создает никаких дополнительных утверждений о других подмножествах A , каждое из которых, по определению, имеет свое собственное значение *массы*.

Исходя из присвоенных значений *массы*, могут быть определены верхняя и нижняя границы интервала возможностей. Этот интервал содержит точную величину вероятности рассматриваемого подмножества (в классическом смысле) и ограничен значениями доверия и правдоподобия:

$$bel(A) \leq P(A) \leq pl(A).$$

Доверие $bel(A)$ к множеству A определяется как сумма всех значений *массы* собственных подмножеств рассматриваемого множества:

$$bel(A) = \sum_{B|B \subseteq A} m(B).$$

Правдоподобие $pl(A)$ – это сумма значений *массы* всех множеств B , пересекающихся с рассматриваемым множеством A :

$$pl(A) = \sum_{B|B \cap A \neq \emptyset} m(B).$$

Правило комбинирования событий – правило Демпстера. Агрегация информации обычно направлена на суммирование и упрощение массива данных, получаемых из одного или нескольких источников. Правила комбинирования являются специальными мето-

дами агрегации данных. Эти данные представляют собой оценку одного и того же множества событий (гипотез). ТДШ основана на предположении, что эти источники являются независимыми. Данные этих источников используются для вычисления меры *доверия* для каждого оцениваемого состояния в соответствии с правилом Демпстера [14]:

$$m^{1,2}(C) = \frac{\sum_{A \cap B = C \neq \emptyset} m^1(A)m^2(B)}{1 - k}. \quad (1)$$

Формула (1) описывает правило для двух сенсоров. Коэффициент $k = \sum_{A \cap B = \emptyset} m^1(A)m^2(B)$. Формула (2) описывает правило для трех сенсоров.

$$m^{1,2,3}(D) = \frac{\sum_{A \cap B \cap C = D \neq \emptyset} m^1(A)m^2(B)m^3(C)}{1 - k}. \quad (2)$$

Здесь $k = \sum_{A \cap B \cap C = \emptyset} m^1(A)m^2(B)m^3(C)$ – для

трех сенсоров. Причем k соответствует значению *массы*, связанной с конфликтом, который определяется суммированием произведений значений *массы* для состояний, пересечение которых не является пустым множеством. Если значение k велико, то конфликт между источниками оценок является сильным.

C – пересечение состояний A и B в уравнении (1);

D – пересечение A , B и C в (2);

$m^{1,2}(C)$ – новая оценка, полученная после обработки оценки $m^1(A)$, полученной сенсором 1, и оценки $m^2(B)$, полученной сенсором 2.

Аналогично в формуле (2) $m^{1,2,3}(D)$ – новая оценка, полученная из оценок $m^1(A)$, $m^2(B)$ и $m^3(C)$ сенсоров 1, 2 и 3 соответственно.

Правило для N сенсоров записывается аналогично формулам (1) и (2):

$$m^{1,2,\dots,N}(D) = \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_N = D \neq \emptyset} \prod_{1 \leq i \leq N} m^i(A_i)}{1 - k}, \quad (3)$$

$$k = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_N = \emptyset} \prod_{1 \leq i \leq N} m^i(A_i).$$

Правило комбинирования Демпстера является ассоциативным и коммутативным [14]. Это означает, что значение *массы* (например, в формуле (3)) может быть результатом предыдущего комбинирования, поэтому весь процесс комбинирования может протекать по цепочке. Причем его порядок не влияет на конечный результат. Это является одной из основных причин широкого применения теории Демпстера-Шейфера для формализации процесса SDF в различных исследованиях, в том числе, проводимых в интересах оборонных отраслей.

Заключение

В данной работе были рассмотрены возможные пути построения систем обработки данных в зарубежных мультисенсорных си-

стемах обнаружения и наведения ВТО, в том числе, основные положения классификации вариантов реализации мультисенсорных систем с использованием технологии Sensor Data Fusion. В качестве конкретного примера рассмотрено построение системы обнаружения кассетного боевого элемента PI SADARM. Рассмотрена формализация оценок вероятностных характеристик обнаружения по правилу Демпстера для систем, состоящих из двух, трех и n -сенсоров.

Рассмотренные особенности построения и обработки информации в мультисенсорных системах могут быть использованы при разработке отечественных образцов ВТО, а также при оценке эффективности средств защиты военной техники.

Список использованных источников

1. Высокоточное оружие и борьба с ним: Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2013. – 496 с.
2. Евдокимов В.И., Гуменюк Г.А., Андриющенко М.С. Неконтактная защита боевой техники. – СПб.: Реноме, 2009. – 176 с.
3. Андриющенко М. С., Евдокимов В. И., Соколов В. Я. Защита танка от ВТО с комбинированными датчиковыми системами, использующими технологию SENSOR FUSION // Известия РАН. – 2010. – № 1 (63). – С. 38–43.
4. Waltz E., Llinas J. Multisensor Data Fusion. – Artech Hous, Norwood NA, 1990. – 466 p.
5. Hall David L., Llinas J. Handbook of multisensor data fusion. – CRC Press, 2001. – 568 p.
6. SADARM Product Improvement Program: “Aerojet” and “Alliant Techsystems” Research Presentation. – 1999 // <http://www.pica.army.mil>.
7. Klein L.A. Sensor and Data Fusion Concepts and Applications. – SPIE Optical Engineering Press, 1999. – 131 p.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
9. Klein L.A. Sensor and Data Fusion: A Tool for Information Assessment and Decision Making. – SPIE Press, 2004. – 362 p.
10. Huadong Wu. Sensor Data Fusion for Context-Aware Computing Using Dempster-Shafer Theory: Ph.D. dissertation. – The Robotics Institute Carnegie Mellon University Pittsburgh, Pennsylvania, December 2003. – 195 p.
11. Tzu-Chao L., Pao-Ta Yu. Thresholding Noise-Free Ordered Mean Filter Based on Dempster-Shafer Theory for Image Restoration // IEEE Transactions On Circuits and Systems – I: Regular Papers. – May 2006. – vol. 53. – N. 5. – P. 1057-1064.
12. Dempster A.P. Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping // The Annals of Statistics. – 1967. – P. 342-349.
13. Shafer Glenn. A Mathematical Theory of Evidence. – Princeton University Press, 1976. – 314 p.
14. Sentz K., Scott F. Combination of Evidence in Dempster-Shafer Theory / Technical Report, April 2002. – Los Alamos: Los Alamos National Laboratory // <http://www.sandia.gov/epistemic/Reports/SAND2002-0835.pdf>.