

УДК 621.319

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА СЛИЯНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ



**Д.С. Нефёдов**

*Заместитель начальника кафедры тактики  
и вооружения ЗРВ факультета ПВО учре-  
ждения образования «Военная академия  
Республики Беларусь»,  
кандидат технических наук*

*Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь», Республика Беларусь  
E-mail: VARB\_NefedovDS@tut.by*

### **Д.С. Нефёдов**

Заместитель начальника кафедры тактики и вооружения ЗРВ факультета ПВО учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», кандидат технических наук (2014 г.). Область научных интересов: обнаружение наземных и воздушных объектов по возмущениям естественных физических полей, обработка сигналов.

**Аннотация.** Рассмотрен пример применения технологии слияния данных (Data Fusion) при построении систем обнаружения вторжений. Синтезирован оптимальный по критерию Неймана-Пирсона алгоритм объединения информации в пространственно распределенной системе обнаружения воздушных объектов. Особенностью синтеза является учет вероятностных характеристик обнаружения объекта датчиками системы. Использование полученного алгоритма позволяет в 2...2,4 раза увеличить расстояние между датчиками при вероятности правильного обнаружения 0,9.

**Ключевые слова:** слияние данных, система обнаружения вторжений, датчик, алгоритм обнаружения, вероятность правильного обнаружения, вероятность ложной тревоги.

**Введение.** Эффективная защита важных объектов (атомные электростанции, заводы, склады Министерства обороны и др.) от несанкционированных проникновений не возможна без применения автоматизированных систем обнаружения вторжений. Такие системы объединяют в себе технические средства наблюдения или автономные датчики (UGS – unattended ground sensors), регистрирующие возмущения различных физических полей (сейсмических, магнитных, акустических, электростатических и др.). Дальность действия средств наблюдения и датчиков под воздействием факторов естественного происхождения ограничивается десятками, а реже сотнями метров. В связи с этим при проектировании системы обнаружения вторжений протяженного объекта возникает необходимость использования большого количества датчиков, как правило, с перекрывающимися зонами обнаружения. При этом избыточность количества датчиков не всегда гарантирует требуемую вероятность правильного обнаружения и низкую интенсивность ложных срабатываний.

Одним из актуальных направлений совершенствования систем обнаружения вторжений является применение при обработке информации технологий слияния данных (Data Fusion). Под слиянием данных понимается идентификация и совместная обработка данных и информации из нескольких источников, с целью формирования уточненных оценок или

прогнозирования состояний наблюдаемых процессов [1].

В данной работе на основании известной математической модели входных воздействий системы обнаружения воздушных объектов, включающей  $N$  пространственно распределенных датчиков, предложен оптимальный алгоритм параллельного слияния данных, позволяющий при прочих равных условиях, увеличить расстояние между датчиками. Синтез оптимального алгоритма выполнен по критерию максимума вероятности правильного обнаружения при фиксированной вероятности ложной тревоги.

*Математическая модель входного воздействия.* Рассматриваемая система обнаружения воздушных объектов представляет собой совокупность пространственно распределенных датчиков и пункт совместной обработки (ПСО). Структурная схема системы изображена на рисунке 1.

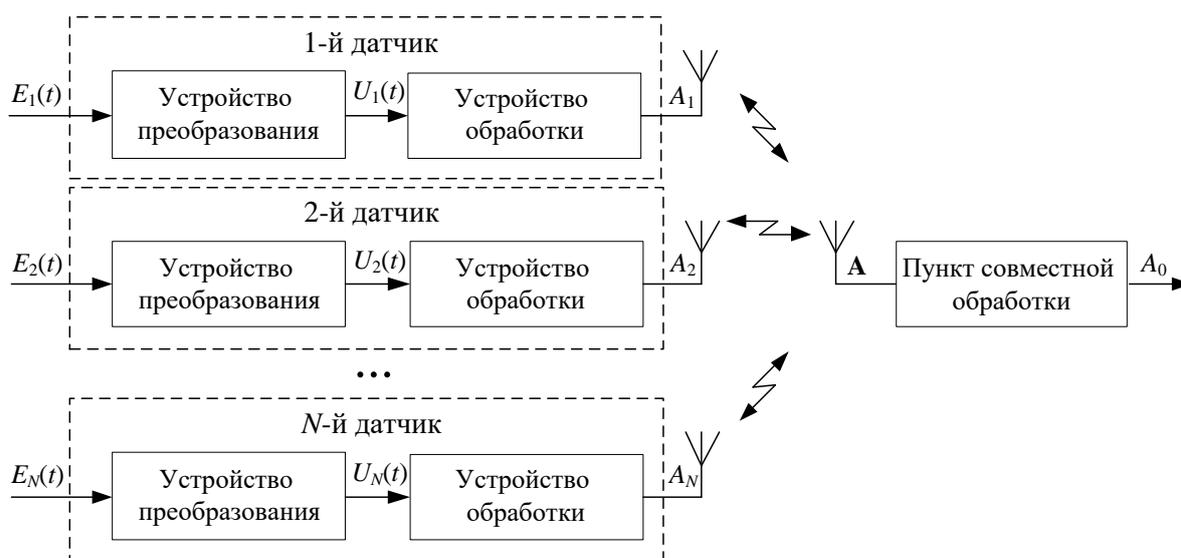


Рисунок 1. Структурная схема системы обнаружения

Каждый датчик преобразует возмущения наблюдаемого физического поля  $E(t)$  в электрический сигнал  $U(t)$  и обрабатывает его с целью принятия решения об обнаружении. Датчики передают в ПСО для совместной обработки единичные решения об обнаружении  $A_1 \dots A_N$ .

Достоинствами представленной структурной схемы является большая надежность, низкие требования к пропускной способности линий передачи данных, скрытность функционирования.

На входе ПСО присутствует совокупность решений об обнаружении, которые подчиняются распределению Бернулли [2]:

$$P(A_i) = [P(A_i)]^{A_i} [1 - P(A_i)]^{1-A_i}; \quad i = \overline{1, N}.$$

При отсутствии полезного сигнала вероятность превышения порога  $P(A)$  определяется вероятностью ложной тревоги ( $P(A) = F_{\text{ld}}$ ), а при наличии полезного сигнала – вероятностью правильного обнаружения ЛА ( $P(A) = D_{\text{pod}}$ ).

Окончательное решение  $A_0$  принимается в ПСО в результате совместной обработки решений, принятых во всех датчиках.

При отсутствии (гипотеза  $H_0$ ) и наличии (гипотеза  $H_1$ ) полезного сигнала совместные распределения вероятностей случайных величин вектора  $\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$  описываются

выражениями:

$$P(\mathbf{A} / H_0) = \prod_{i=1}^N P(A_i / H_0) = \prod_{i=1}^N F_{\text{лтд}_i}^{A_i} (1 - F_{\text{лтд}_i})^{1-A_i} ; \quad (1)$$

$$P(\mathbf{A} / H_1) = \prod_{i=1}^N P(A_i / H_1) = \prod_{i=1}^N D_{\text{под}_i}^{A_i} (1 - D_{\text{под}_i})^{1-A_i} . \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) записаны при допущениях о статистической независимости шумов и амплитудных флуктуаций полезных сигналов в пространственно распределенных датчиках. Указанные допущения справедливы для большинства физических принципов обнаружения при слабых отношениях сигнал/шум. В этом случае амплитудные флуктуации сигналов определяются естественными помехами, которые при расстояниях между датчиками сто и более метров можно считать практически некоррелированными.

Совместные распределения вероятностей (1) и (2) являются полным комплектом априорных данных, необходимых для синтеза алгоритма обнаружения по критерию Неймана-Пирсона [1].

*Синтез алгоритма обнаружения.* Процедура принятия решения об обнаружении объектов ПСО включает формирование отношения правдоподобия и сравнение его с порогом [1]. С учетом многомерных распределений вероятностей (1) и (2) логарифм отношения правдоподобия можно записать в виде:

$$Z = \sum_{i=1}^N [A_i Q_i],$$

где:  $Q_i = \ln \left( \frac{D_{\text{под}_i} (1 - F_{\text{лтд}_i})}{F_{\text{лтд}_i} (1 - D_{\text{под}_i})} \right)$  – весовой коэффициент.

Решение об обнаружении объекта в ПСО формируется по правилу:

$$\text{если } Z = \sum_{i=1}^N [A_i Q_i] \geq Z_0, \text{ то } A_0 = 1; \text{ иначе } A_0 = 0, \quad (3)$$

где  $Z_0$  – порог совместного обнаружения.

При равенстве вероятностей ложных тревог во всех датчиках максимальную вероятность правильного обнаружения дают правила « $n$  из  $N$ » (т. е. объект считается обнаруженным, если решение о его обнаружении принято хотя бы  $n$  датчиками из  $N$ ). Такие решающие правила позволяют отказаться от вычисления весовых коэффициентов  $Q_i$  и от алгоритма обнаружения (3) перейти к более простому алгоритму:

$$\text{если } Z = \sum_{i=1}^N A_i \geq Z_0, \text{ то } A_0 = 1; \text{ иначе } A_0 = 0. \quad (4)$$

Порог совместного обнаружения определяется по заданной вероятности ложной тревоги системы и может принимать дискретные значения от 1 до  $N$ .

Вероятности правильного обнаружения  $D_{\text{под}}$  и ложной тревоги  $F_{\text{лтс}}$  системы, характеризующие эффективность алгоритма совместного обнаружения (4) определяются выражениями [2]:

$$D_{\text{roc}} = \sum_{k=n}^N \sum_{i_1=1}^{N-k+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{N-k+2} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^N \left[ D_{\text{pod}_{i_1}} D_{\text{pod}_{i_2}} \dots D_{\text{pod}_{i_k}} \prod_{l=1}^N (1 - D_{\text{pod}_l}) \right], l \neq i_1, \dots, i_k; \quad (5)$$

$$F_{\text{ltc}} = \sum_{k=n}^N C_N^k F_{\text{ttd}}^k (1 - F_{\text{ttd}})^{N-k}. \quad (6)$$

Из выражений (5,6) следует, что эффективность алгоритма совместного обнаружения зависит от общего количества датчиков в системе, вида решающего правила, вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги каждого датчика.

Алгоритм совместного обнаружения оптимизируется путем выбора  $n$ , обеспечивающего максимальную вероятность  $D_{\text{roc}}$ , при ограничении вида:  $F_{\text{ltc}} \leq F_{\text{ltz}}$ , где  $F_{\text{ltz}}$  – заданная вероятность ложной тревоги системы.

Для выбора оптимального значения  $n$  необходимо учитывать особенности системы обнаружения, которые описаны ниже.

1. Вероятность правильного обнаружения каждым датчиком системы определяется отношением сигнал/шум, зависящим от типа объекта, параметров его движения, используемого физического принципа обнаружения. В общем случае зависимость отношения сигнал/шум описывается функцией:

$$\gamma = l \sqrt{\frac{\rho \sigma G K_p}{r N_0 \Delta F}}, \quad (7)$$

где:  $l$  – показатель степени, зависящий от физического принципа обнаружения;  $\rho$  – эффективность устройства обработки датчика,  $\sigma$  – интенсивность возмущений регистрируемого физического поля, создаваемых объектом в точке размещения датчика;  $G$  – коэффициент, характеризующий направленные свойства устройства преобразования датчика;  $K_p$  – коэффициент преобразования регистрируемого поля в напряжение;  $r$  – расстояние между объектом и датчиком;  $N_0$  – спектральная плотность мощности внутренних шумов датчика;  $\Delta F$  – ширина полосы пропускания устройства обработки датчика.

Вероятность правильного обнаружения объекта датчиком можно рассчитать зная закон распределения статистики на входе порогового устройства, который определяется алгоритмом устройства обработки. В случае нормального распределения статистики (фильтровая обработка сигнала в датчике без квадратичного детектирования) выражение для вероятности правильного обнаружения имеет вид:

$$D_{\text{pod}} = 1 - \Phi \left[ \Phi^{-1}(1 - F_{\text{ttd}}) - \gamma \right], \quad (8)$$

где:  $\Phi$  и  $\Phi^{-1}$  – прямая и обратная функция Лапласа соответственно.

2. В отличие от ложных срабатываний системы, возникающих в случайные моменты времени, решения об обнаружении объекта датчиками принимаются последовательно на ограниченном интервале времени  $\Delta t_{\text{max}}$ . Интервал  $\Delta t_{\text{max}}$  зависит от размещения датчиков системы на местности, траектории и параметров движения объекта.

Рассматривая ложные срабатывания датчиков как пуассоновский поток событий уравнение (6) для оценки вероятности ложных срабатываний системы  $F_{\text{ltc}}$  принимает вид [4]:

$$F_{\text{лтс}} = 1 - \left\{ 1 - \sum_{k=n}^N \left[ C_N^k \left( 1 - \exp\left(-\frac{F_{\text{лтд}} \Delta t_{\text{max}}}{\Delta \tau}\right) \right)^k \left( \exp\left(-\frac{F_{\text{лтд}} \Delta t_{\text{max}}}{\Delta \tau}\right) \right)^{N-k} \right] \right\}^{\frac{T_{\text{лс}}}{\Delta t_{\text{max}}}}, \quad (9)$$

где:  $\Delta \tau$  – интервал дискретизации сигнала в датчике;  $T_{\text{лс}}$  – среднее время наработки системы на ложное срабатывание.

При однопозиционной обработке, которой соответствует правило принятия решения «1 из  $N$ », выражение (9) преобразуется к виду [4]:

$$F_{\text{лтс}} = 1 - \exp\left(-\frac{NF_{\text{лтд}}T_{\text{лс}}}{\Delta \tau}\right).$$

*Результаты и выводы.* Результаты оптимизации алгоритма обнаружения воздушного объекта с использованием датчиков, регистрирующих возмущения естественного электрического поля Земли в качестве зависимостей вероятности правильного обнаружения системы от расстояния между датчиками изображены на рисунке 2. Кривые 1...8 на рисунке 2 соответствуют решающим правилам «1 из  $N$ »...«8 из  $N$ » соответственно.

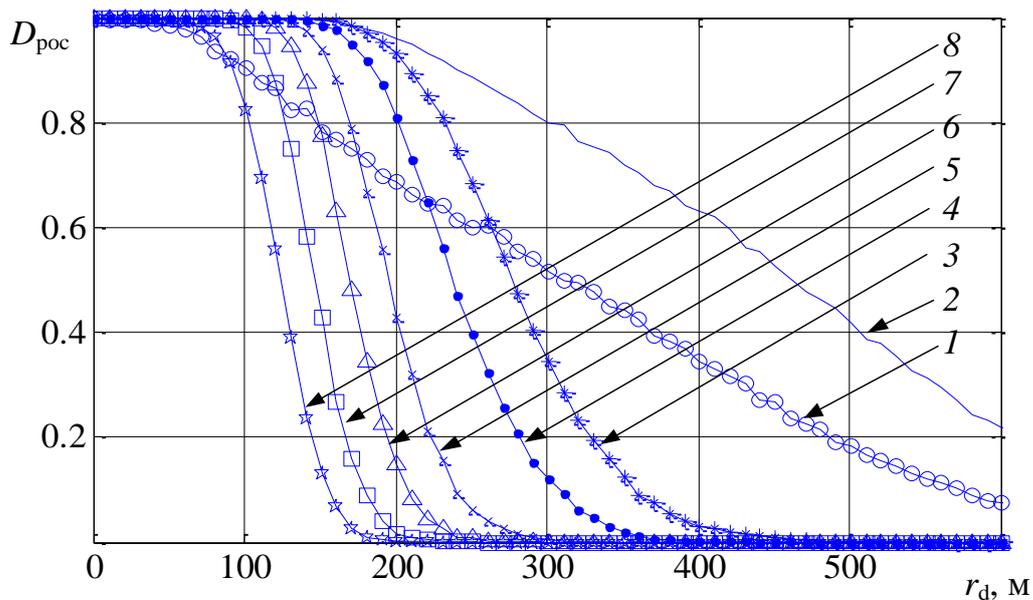


Рисунок 2. Зависимость вероятности правильного обнаружения от расстояния между датчиками

Как видно из рисунка 2, оптимальным правилом принятия решения об обнаружении объекта по критерию Неймана-Пирсона является правило «2 из  $N$ » (рисунок 2, кривая 2). Оптимум достигается в результате действия двух противоположных факторов: с одной стороны, ужесточение решающего правила приводит к необходимости обнаружения объекта большим количеством датчиков, а с другой – чтобы при более жестком правиле обеспечить заданную вероятность ложной тревоги системы, порог обнаружения в каждом датчике следует снижать, что приводит к увеличению вероятности правильного обнаружения.

Сравнивая кривые 1 и 2 на рисунке 2 можно сделать вывод, что использование сли-

ния данных в виде оптимального алгоритма совместного обнаружения объекта при вероятности правильного обнаружения 0,9 позволяет увеличить расстояние между датчиками в 2...2,4 раза.

Полученные результаты синтеза алгоритма обнаружения могут использоваться для любого количества датчиков в системе, произвольном размещении их на местности, комбинировании датчиков, использующих различные физические принципы. Перечисленные факторы учитываются путем уточнения выражений для отношения сигнал/шум (7), вероятности правильного обнаружения (8) и интервала времени  $\Delta t_{\max}$ .

#### *Литература*

- [1]. Hall, D. Handbook of Multisensor Data Fusion / D. Hall, J. Llinas. – London: CRC Press, 2001. – 541 p.
- [2]. Черняк, В.С. Многопозиционная радиолокация / В.С. Черняк. – М.: Радио и связь, 1993. – 418 с.
- [3]. Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники /Б.Р. Левин. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.
- [4]. Нефёдов, Д.С. Структура устройства совместного обнаружения летательного аппарата в электростатической многодатчиковой системе пассивной локации / Д.С. Нефедов // Докл. БГУИР. – 2013. – № 5 (75). – С. 86–92.

## **SYNTHESIS OF OPTIMAL DATA FUSION ALGORITHM FOR INTRUSION DETECTION SYSTEM**

***D.S. NEFEDOV***

*Belarusian Military Academy,  
Air Defense Faculty*

*Belarusian Military Academy, Republic of Belarus  
E-mail: VARB\_NefedovDS@tut.by*

**Abstract.** In the article described example of using data fusion algorithm in the intrusion detection system. The optimal algorithm synthesized according to the Neyman-Pearson criterion. Feature of synthesis is the account of sensors detection probability characteristics. The obtained algorithm allows increasing the distance between the sensors by 2...2,4 times.

**Keywords:** data fusion, intrusion detection system, sensor, detection algorithm, correct detection probability, false alarm probability.