

Системы, сети и устройства телекоммуникаций

УДК 621.391

Научная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2025-28-2-33-44>

Алгоритмы комплексного обнаружения объектов в беспроводных сенсорных сетях

В. И. Парфенов[✉], Ч. Т. Буй

Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

✉ vip@phys.vsu.ru

Аннотация

Введение. Беспроводные сенсорные сети могут применяться для решения многих народнохозяйственных задач, в том числе и для обнаружения интересующего объекта (явления). Большинство известных алгоритмов обработки информации в таких сетях строятся в соответствии с радиальной архитектурой. Такой подход предполагает, что каждый сенсор имеет доступ непосредственно к центральному узлу, осуществляющему окончательное вынесение решения. В то же время данный подход не всегда реализуем на практике, в частности, из-за сложного рельефа местности. В связи с чем в статье предложен алгоритм обнаружения при последовательной передаче информации от сенсора к сенсору, позволяющий расширить зону обнаружения и увеличить время функционирования источников питания сенсоров.

Цель работы. Синтез и анализ комплексного алгоритма обнаружения объекта в беспроводной сенсорной сети с линейной топологией.

Материалы и методы. Синтез алгоритма обнаружения основывался на статистической теории оптимального обнаружения сигналов, а конкретно, на следующей априорной информации: вероятностях ошибок обнаружения объекта каждого сенсора и вероятностях ошибок в каналах связи. Анализ эффективности синтезированного алгоритма выполнялся численно с помощью программы MATLAB.

Результаты. В ходе исследований предложен алгоритм комплексного обнаружения объектов в беспроводных сенсорных сетях. Приведены результаты, характеризующие эффективность синтезированного алгоритма. В частности, проанализировано влияние таких параметров, как отношение сигнал/шум и количество сенсоров в системе на эффективность обнаружения.

Заключение. Показано, что анализ синтезированного алгоритма может быть выполнен точно. Причем параметры самого алгоритма и вероятности ошибок при переходе от сенсора к сенсору определяются достаточно простыми рекуррентными выражениями. Возможными перспективными направлениями исследований являются исследования, связанные с влиянием на эффективность обнаружения каналов связи с замираниями и рассеянием, а также разработка комплексных алгоритмов обнаружения при неизвестных координатах цели.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, сенсоры, вероятности ошибок, комплексное обнаружение, алгоритмы комплексного обнаружения

Для цитирования: Парфенов В. И., Буй Ч. Т. Алгоритмы комплексного обнаружения объектов в беспроводных сенсорных сетях // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2025. Т. 28, № 2. С. 33–44.

doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-33-44

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 02.09.2024; принята к публикации после рецензирования 24.11.2024; опубликована онлайн 30.04.2025



Algorithms for Integrated Object Detection in Wireless Sensor Networks

V. I. Parfenov✉, T. T. Bui

Voronezh State University, Voronezh, Russia

✉ vip@phys.vsu.ru

Abstract

Introduction. Wireless sensor networks can be used to solve various economic problems, including detection of objects (phenomena) of interest. Most of the well-known information processing algorithms in such networks are built according to a radial architecture. Such an approach assumes each sensor to have a direct access to the central node responsible for making the final decision. At the same time, this approach cannot always be implemented in practice, largely due to the complicated topography of the area. In this connection, the development of an integrated detection algorithm for sequential transmission of information from sensor to sensor is a relevant research task. This algorithm will contribute to improving the efficiency of decision making, extending the detection area and increasing the operation duration of the power sources of sensors.

Aim. Synthesis and analysis of an integrated algorithm for object detection in wireless sensor networks with a linear topology.

Materials and methods. The detection algorithm was synthesized based on the statistical theory of optimal signal detection and, specifically, on the following a priori information: the probability of errors in the detection of each sensor object and the probability of errors in communication channels. The efficiency of the synthesized algorithm was evaluated numerically in the MATLAB environment.

Results. An algorithm for integrated detection of objects in wireless sensor networks was proposed. The efficiency of the developed algorithm was evaluated and the influence of such parameters as the signal/noise ratio and the number of sensors in the system on the detection efficiency was analyzed.

Conclusion. The analysis of the synthesized algorithm can be performed with sufficient accuracy, with the algorithm parameters and the probability of errors when moving from sensor to sensor being determined by fairly simple recurrent expressions. Future research directions should address the influence of communication channels with fading and scattering on the detection efficiency, as well as the development of integrated detection algorithms with unknown target coordinates.

Keywords: Wireless Sensor Networks (WSN), sensors, error probability, integrated detection, integrated detection algorithms

For citation: Parfenov V. I., Bui T. T. Algorithms for Integrated Object Detection in Wireless Sensor Networks. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2025, vol. 28, no. 2, pp. 33–44.
doi: 10.32603/1993-8985-2025-28-2-33-44

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 02.09.2024; accepted 24.11.2024; published online 30.04.2025

Введение. Беспроводные сенсорные сети (БСС) обладают достаточно важными свойствами, такими как гибкость, мобильность, экономическая эффективность и пр., способствующими расширению области применения таких сетей. Действительно, их начинают активно применять не только в военных приложениях, но и в гражданских областях, особенно связанных с мониторингом окружающей среды [1–3]. К сожалению, к настоящему времени не разработано единого стандарта для построения таких сетей. Так, с точки зрения архитектуры сети может быть использована "линейная", "радиаль-

ная", "древовидная" и другие типы топологий. Для организации множественного доступа к каналу "сенсоры – центральный узел" также разработано достаточно большое количество протоколов, таких как S-MAC [4], SFSN [5] и др. Наиболее известными из протоколов БСС являются протоколы альянса ZigBee [6], которые позволяют устройствам находиться в спящем режиме большую часть времени, что продлевает срок службы батарей. Расположение сенсоров в пространстве существенным образом зависит от рельефа местности. Учитывая миниатюрный характер сенсоров и ограниченную энергоэф-

эффективность используемых в сенсорах источников питания, длины передаваемых пакетов стремятся выбирать как можно меньше.

Одной из важнейших задач в таких сетях является задача обнаружения некоторых объектов или явлений (далее – просто целей) [7–9]. Наибольшее количество информации об исследуемом объекте, очевидно, можно извлечь и эффективно использовать для решения поставленной задачи, если каждый сенсор БСС всю информацию, получаемую от объекта, будет передавать непосредственно в центральный узел (ЦУ). При этом окончательное решение о наличии или отсутствии объекта будет выноситься в этом ЦУ на основании всего объема полученных от сенсоров данных. Однако отличительными особенностями БСС являются малогабаритный характер отдельных сенсоров, их зависимость от энергоемкости используемых источников питания и пр. [10]. В связи с этим в таких сетях целесообразно использовать подход, основанный на так называемой комплексной обработке информации, при котором каждый сенсор должен сам выносить решение об обнаружении или необнаружении объекта наблюдения на основе поступающих данных и передавать эту информацию в ЦУ. Центральный узел на основе принятой от всех сенсоров информации подобного рода должен вынести окончательное (комплексное) решение о наличии или отсутствии цели. Однако следует учитывать, что передача этой информации от сенсоров к ЦУ напрямую в некоторых случаях неосуществима. Это объясняется, в частности, возможной значительной удаленностью некоторых сенсоров от ЦУ, сложным характером рельефа местности, не позволяющим обеспечить условия "прямой видимости" для каждого канала связи "*i*-й сенсор – ЦУ", и другими причинами. В таких условиях информация должна последовательно передаваться от сенсора к сенсор. Однако следует учитывать, что при таком способе передачи информация может претерпевать существенные искажения. Следовательно, необходимо разработать алгоритмы комплексного обнаружения целей в таких сетях и исследовать их эффективность. Очевидно, такие алгоритмы будут отличаться от широко известных алгоритмов, синтезированных для се-

тей с радиальной топологией типа "звезда", при которой информация от отдельных сенсоров передается непосредственно в ЦУ (например, [11–13]). Все это свидетельствует об актуальности данной темы исследования.

В данной статье рассматриваются такие беспроводные системы, в которых датчики сенсоров наблюдают за одним и тем же объектом или явлением и самостоятельно выносят решения об обнаружении или необнаружении объекта. Далее эта информация, которую можно представить в бинарной форме (обнаружен объект или нет), передается от сенсора к сенсор (например, [14]) и специальным образом обрабатывается в каждом сенсоре сети. Все сенсоры пронумерованы от 1 до K , и последний K -й сенсор располагается ближе всех к ЦУ в пределах прямой видимости.

Цель работы – синтез алгоритма комплексного обнаружения объекта в БСС и исследование его эффективности.

Методы передачи и обработки информации в БСС при последовательной передаче данных. Постановка задачи. Предположим, что БСС, содержащая K сенсоров, осуществляет наблюдение за одним общим объектом. Задача, решаемая каждым сенсором, заключается в определении наличия или отсутствия данного объекта. Сами локальные сенсоры могут располагаться в любом месте относительно ЦУ. Единственное необходимое условие: сенсоры должны располагаться так, чтобы было возможно организовать последовательную передачу информации от одного сенсора к другому. Все сенсоры равноправны, для большей эффективности располагать их целесообразно как можно ближе к объекту наблюдения (хотя это и не всегда возможно).

Топология рассматриваемой сети – "линейная". Для доставки сенсорных данных в ЦУ используется режим push [15], при котором передача данных осуществляется по командам, поступающим от ЦУ, с помощью пакетов одинаковой небольшой длины. Необходимо разработать алгоритм (желательно, оптимальный в каком-то смысле) обнаружения объекта наблюдения в ЦУ по данным, поступившим от сенсоров. Такой алгоритм может быть синтезирован по-разному, в зависимости от имеющихся ап-

паратных возможностей сенсоров. Например, в [16] предполагается, что каждый сенсор выносит собственное локальное решение о наличии или отсутствии цели и пристыковывает (инкапсулирует) эту информацию к той, которая была получена от предыдущих сенсоров. Таким образом, в ЦУ приходит пакет, содержащий решения, выносимые каждым сенсором относительно объекта наблюдения. Следовательно, чем большее расстояние проходит такой пакет передаваемых данных, тем длиннее он становится. При этом, очевидно, возрастает нагрузка на энергоёмкость источников питания каждого следующего сенсора. Если же энергоёмкости у всех сенсоров одинаковы, то удаленные сенсоры будут вырабатывать свой энергетический ресурс намного раньше, чем первые.

В связи с этой негативной особенностью подобного подхода рассмотрим следующий. Объем передаваемой информации должен быть минимален. Потенциально он должен содержать только номера сенсоров и ЦУ, а также решение, выносимое сенсором. В связи с этим будем считать, что каждый сенсор выполняет три функции. Первая функция заключается в следующем: каждый i -й локальный сенсор обладает некоторым встроенным в него алгоритмом обнаружения. Этот алгоритм может быть реализован разными способами, но наиболее часто он представляет собой стандартный энергетический приемник. Используя этот приемник, каждый сенсор выносит локальное решение о наличии или отсутствии этого объекта.

Однако далее в соответствии со второй функцией, в отличие от стандартных методов, i -й сенсор не только сам выносит решение, но и принимает информацию от соседнего $(i - 1)$ -го сенсора. Таким образом, в i -м сенсоре появляются два бинарных решения (собственное и от соседнего сенсора). Эти решения необходимо объединить в одно общее, используя некоторый комплексный алгоритм обработки этих данных. Наконец, третья функция заключается в непосредственной передаче получаемого решения далее по радиоканалу к $(i + 1)$ -му сенсору. Если $i = K$, то информация от этого сенсора передается уже непосредственно в ЦУ. Количество используемых в сети узлов фиксировано и известно априори.

Окончательно в ЦУ приходит пакет данных, содержащий обработанную информацию от последнего сенсора (рис. 1). Далее ЦУ в результате принятого от последнего сенсора сигнала должен вынести окончательное (комплексное) решение о наличии или отсутствии объекта. На рис. 1 обозначены: $S_1 \dots S_K$ – сенсоры, входящие в сеть (причем их взаимное расположение необязательно должно быть чисто линейным, как изображено на рис. 1); $P_1 \dots P_K$ – вероятности ошибок при передаче от сенсора к сенсору; ЦУ – центральный узел, принимающий данные от последнего сенсора и выносящий окончательное решение; в соответствии с типичной формулировкой задачи обнаружения сигналов на фоне помех H_1 и H_0 – гипотезы: считается, что при выполнении первой

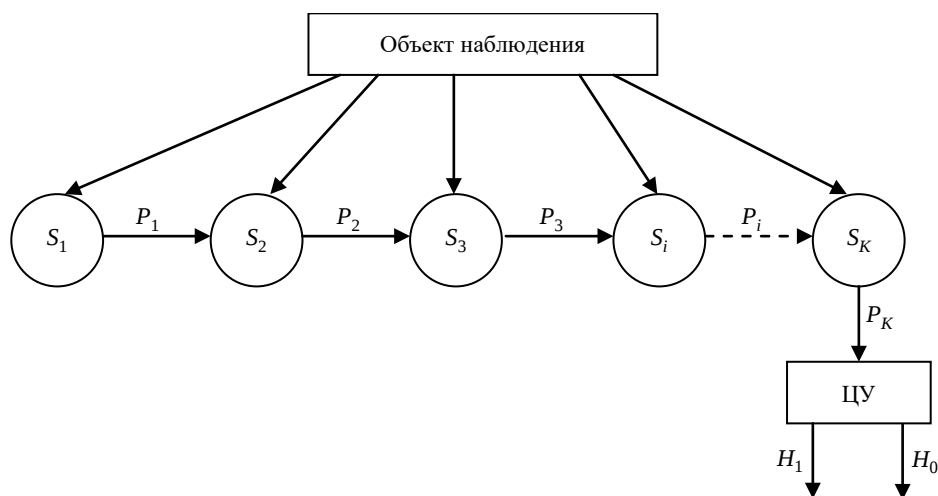


Рис. 1. Структурная схема обработки информации в беспроводных сенсорных сетях

Fig. 1. Block diagram of information processing in wireless sensor networks

из них объект присутствует в зоне наблюдения, а при выполнении второй – нет. В дальнейшем предполагалось, что априорные вероятности этих гипотез одинаковы и равны 0.5.

Таким образом, необходимо разработать наилучшие в определенном смысле алгоритмы комплексного обнаружения, причем использоваться они должны в каждом сенсоре (кроме первого) и в ЦУ. Разработке подобных алгоритмов и будет посвящена данная статья. Следует заметить, что при разработке таких алгоритмов необходимо учитывать ошибки, которые могут возникать на различных этапах функционирования разрабатываемой системы. Действительно, локальные сенсоры могут выносить неверные решения о наличии или отсутствии объекта наблюдения из-за наличия помех в каналах "объект–сенсор". Кроме того, дополнительные ошибки могут возникать из-за помех в каналах "($i-1$)-й сенсор – i -й сенсор". Поэтому комплексирование должно осуществляться с учетом всех этих возможных ошибок. Отметим, что при таком подходе не ставится задача синтезировать такой алгоритм, который основывался бы на оптимизации всей системы. Для решения подобной задачи требуется адаптивно изменять в лучшем случае параметры, а в худшем – и саму структуру алгоритмов в каждом сенсоре. Такой подход в БСС вряд ли может считаться целесообразным, учитывая, как отмечалось ранее, малогабаритный характер отдельных сенсоров и их существенную зависимость от энергоемкости используемых источников питания. В связи с этим предлагается в каждом сенсоре и в ЦУ оптимизацию осуществлять независимо в соответствии с критерием идеального наблюдателя. Именно такой подход и рассматривается в данной статье.

Итак, i -й локальный сенсор S_i выносит одно из двух локальных решений, а именно решение $u_i = 1$, если этот сенсор обнаружил объект, и $u_i = -1$, если сенсор его не обнаружил. Обозначим $\alpha_i = P[u_i = 1 | H_0]$ – вероятность ошибки первого рода (ложной тревоги); $\beta_i = P[u_i = -1 | H_1]$ – вероятность ошибки второго рода (пропуска цели) i -м сенсором

($i = 1, \dots, K$). Рассмотрим, например, первый сенсор. Он на основании своих собственных наблюдений и имеющегося у него алгоритма выносит решение $u_1 = 1$ или $u_1 = -1$ и передает его во второй сенсор с вероятностью ошибки при передаче P_1 . Таким образом, во втором сенсоре появится пакет $u_1^{(2)}$, принятый от первого сенсора. Нижний индекс показывает номер сенсора, от которого приходит информация, а верхний – в каком сенсоре эта информация далее должна обрабатываться. Пришедшая от первого сенсора информация дополняется собственной информацией второго сенсора u_2 .

Второй сенсор, основываясь на $u_1^{(2)}$ и u_2 , должен вынести общее решение первого и второго сенсоров о наличии или отсутствии объекта. В результате второй сенсор создает пакет вида U_2 , который и передается далее третьему сенсору сети. Подобная процедура продолжается в каждом последующем сенсоре. Таким образом, в отличие от [16], где длина передаваемых пакетов все время возрастает, при таком подходе каждый сенсор передает пакет одной и той же длины, что выгодно с точки зрения экономии энергоемкости источников питания сенсоров. Таким образом, окончательно в ЦУ придет один пакет U_K . В ЦУ на основе этой получаемой информации и выносится окончательное решение об обнаружении или необнаружении объекта.

Из вышеизложенного становится понятным принцип, на основе которого можно синтезировать оптимальные алгоритмы обнаружения объекта, применяемые в отдельных сенсорах. Для самого первого сенсора все очевидно: этот сенсор, основываясь на своих собственных наблюдениях и встроенном в нем алгоритме обнаружения, выносит решение u_1 и передает его в сенсор с номером 2. Вероятности ошибок на этом этапе определяются помехами в канале "объект – 1-й сенсор" и равны $\alpha_{\Sigma_1} = \alpha_1$, $\beta_{\Sigma_1} = \beta_1$. Вынесенное первым сенсором решение u_1 передается во второй сенсор. Вторым сенсор также сам на основании собственных

наблюдений и встроенного алгоритма обнаружения выносит решение о наличии или отсутствии объекта u_2 . Кроме того, к нему поступает информация от первого сенсора (возможно, искаженная за счет помех), которую обозначим, как и ранее, $u_1^{(2)}$. Основываясь на этих двух информационных посылках, необходимо синтезировать оптимальный алгоритм их объединения (комплексирования) с целью получения одного решения U_2 , которое и будет передаваться далее. Синтез такого алгоритма будет, как обычно, основываться на построении отношения правдоподобия. Действительно, несложно заметить, что отношение правдоподобия в данном случае можно

$$\text{представить в виде } \Lambda_2 = \frac{P(H_{u_2}, H_{u_1^{(2)}} | H_1)}{P(H_{u_2}, H_{u_1^{(2)}} | H_0)}.$$

Здесь $P(\cdot)$ – условные совместные вероятности выполнения гипотез H_{u_2} и $H_{u_1^{(2)}}$ при выполнении соответствующей гипотезы H_j ($j = 0, 1$). Каждая из приведенных гипотез с соответствующим индексом может совпасть либо с гипотезой H_1 (наличие объекта) либо с гипотезой H_0 (отсутствие объекта). Учитывая независимость вынесения решений в пользу H_{u_2} и $H_{u_1^{(2)}}$, отношение правдоподобия можно пере-

$$\text{писать в виде } \Lambda_2 = \frac{P(H_{u_2} | H_1) P(H_{u_1^{(2)}} | H_1)}{P(H_{u_2} | H_0) P(H_{u_1^{(2)}} | H_0)}.$$

В то же время условные вероятности, входящие в это выражение, могут быть переписаны следующим образом:

$$P(H_{u_2} | H_1) = \begin{cases} (1 - \beta_2), & u_2 = 1, \\ \beta_2, & u_2 = -1; \end{cases}$$

$$P(H_{u_1^{(2)}} | H_1) = \begin{cases} \beta_1 P_1 + (1 - \beta_1)(1 - P_1), & u_1^{(2)} = 1, \\ \beta_1(1 - P_1) + (1 - \beta_1)P_1, & u_1^{(2)} = -1; \end{cases}$$

$$P(H_{u_2} | H_0) = \begin{cases} \alpha_2, & u_2 = 1, \\ 1 - \alpha_2, & u_2 = -1; \end{cases}$$

$$P(H_{u_1^{(2)}} | H_0) = \begin{cases} \alpha_1(1 - P_1) + (1 - \alpha_1)P_1, & u_1^{(2)} = 1, \\ \alpha_1 P_1 + (1 - \alpha_1)(1 - P_1), & u_1^{(2)} = -1. \end{cases}$$

Основываясь на полученных выражениях, получаем, что во втором сенсоре необходимо использовать следующий комплексный алгоритм обнаружения цели: на основе имеющихся данных u_2 и $u_1^{(2)}$ рассчитывается логарифм отношения правдоподобия M_2 и, если $M_2 > h_2$, выносится решение в пользу гипотезы H_1 , если же $M_2 < h_2$, то в пользу гипотезы H_0 , где

$$M_2 = \ln(\Lambda_2). \quad (1)$$

Здесь h_2 – порог обнаружения, который в дальнейшем определялся в соответствии с критерием идеального наблюдателя [17]. Несложно показать, что логарифм отношения правдоподобия M_2 в (1) может быть записан в виде

$$M_2 = \begin{cases} C11_2, & u_2 = 1, u_1^{(2)} = 1; \\ C12_2, & u_2 = -1, u_1^{(2)} = 1; \\ C21_2, & u_2 = 1, u_1^{(2)} = -1; \\ C22_2, & u_2 = -1, u_1^{(2)} = -1, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$C11_2 = \ln \left(\frac{(1 - \beta_2) [\beta_1 P_1 + (1 - \beta_1)(1 - P_1)]}{\alpha_2 [\alpha_1(1 - P_1) + (1 - \alpha_1)P_1]} \right);$$

$$C12_2 = \ln \left(\frac{\beta_2 [\beta_1 P_1 + (1 - \beta_1)(1 - P_1)]}{(1 - \alpha_2) [\alpha_1(1 - P_1) + (1 - \alpha_1)P_1]} \right);$$

$$C21_2 = \ln \left(\frac{(1 - \beta_2) [\beta_1(1 - P_1) + (1 - \beta_1)P_1]}{\alpha_2 [\alpha_1 P_1 + (1 - \alpha_1)(1 - P_1)]} \right);$$

$$C22_2 = \ln \left(\frac{\beta_2 [\beta_1(1 - P_1) + (1 - \beta_1)P_1]}{(1 - \alpha_2) [\alpha_1 P_1 + (1 - \alpha_1)(1 - P_1)]} \right).$$

Вероятности ошибок (ложной тревоги и пропуска сигнала) для этого алгоритма могут быть найдены по определению [17] и записаны в виде

$$\alpha_{\Sigma 2} = [\alpha_1(1 - P_1) + (1 - \alpha_1)P_1] \times \\ \times \{ \alpha_2 \sigma(C11_2 - h_2) + (1 - \alpha_2) \sigma(C12_2 - h_2) \} +$$

$$\begin{aligned}
 & + [\alpha_1 P_1 + (1 - \alpha_1)(1 - P_1)] \times \\
 & \times \{ \alpha_2 \sigma(C21_2 - h_2) + (1 - \alpha_2) \sigma(C22_2 - h_2) \}; \\
 & \beta_{\Sigma_2} = [\beta_1 P_1 + (1 - \beta_1)(1 - P_1)] \times \\
 & \times \{ (1 - \beta_2) \sigma(h_2 - C11_2) + \beta_2 \sigma(h_2 - C12_2) \} + \\
 & + [\beta_1 (1 - P_1) + (1 - \beta_1) P_1] \times \\
 & \times \{ (1 - \beta_2) \sigma(h_2 - C21_2) + \beta_2 \sigma(h_2 - C22_2) \},
 \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sigma(\cdot)$ – функция единичного скачка (функция Хевисайда).

Подобные рассуждения выполняем последовательно для каждого сенсора: третьего, четвертого, ..., K -го. Несложно показать, что для последнего K -го сенсора в сети комплексный алгоритм обнаружения будет выглядеть аналогично (1), (2), а именно выносятся решение в пользу гипотезы H_1 , если $M_K = \ln(\Lambda_K) > h_K$; если же $M_K = \ln(\Lambda_K) < h_K$, то решение выносятся в пользу H_0 . Здесь, как и ранее, M_K – логарифм отношения правдоподобия, а h_K – порог обнаружения. Причем логарифм отношения правдоподобия описывается формулой, аналогичной (2), куда вместо индекса "2" следует подставить индекс " K ", а индекс "1" заменить на " $K - 1$ ". Кроме того,

$$\begin{aligned}
 C11_K &= \\
 &= \ln \left[\frac{(1 - \beta_K) [\beta_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})]}{\alpha_K [\alpha_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}]} \right]; \\
 C12_K &= \\
 &= \ln \left[\frac{\beta_K [\beta_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})]}{(1 - \alpha_K) [\alpha_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}]} \right];
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 C21_K &= \\
 &= \ln \left[\frac{(1 - \beta_K) [\beta_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}]}{\alpha_K [\alpha_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})]} \right]; \\
 C22_K &= \\
 &= \ln \left[\frac{\beta_K [\beta_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}]}{(1 - \alpha_K) [\alpha_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})]} \right].
 \end{aligned}$$

Порог обнаружения h_K также выбирается в соответствии с критерием идеального наблюдателя, причем вероятности ошибок обнаружения будут определяться аналогично (3):

$$\begin{aligned}
 \alpha_{\Sigma_K} &= [\alpha_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}] \times \\
 & \times \{ \alpha_K \sigma(C11_K - h_K) + (1 - \alpha_K) \sigma(C12_K - h_K) \} + \\
 & + [\alpha_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \alpha_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})] \times \\
 & \times \{ \alpha_K \sigma(C21_K - h_K) + (1 - \alpha_K) \sigma(C22_K - h_K) \}; \\
 \beta_{\Sigma_K} &= [\beta_{\Sigma_{K-1}} P_{K-1} + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}})(1 - P_{K-1})] \times \\
 & \times \{ (1 - \beta_K) \sigma(h_K - C11_K) + \beta_K \sigma(h_K - C12_K) \} + \\
 & + [\beta_{\Sigma_{K-1}} (1 - P_{K-1}) + (1 - \beta_{\Sigma_{K-1}}) P_{K-1}] \times \\
 & \times \{ (1 - \beta_K) \sigma(h_K - C21_K) + \beta_K \sigma(h_K - C22_K) \}.
 \end{aligned} \quad (5)$$

Рассмотрим процедуру синтеза алгоритма, используемого в ЦУ. От K -го сенсора в ЦУ передается U_K , из-за возможных искажений при такой передаче эта информация может исказиться. Поэтому входными данными для ЦУ будет, возможно, искаженный пакет, который обозначим как $u_K^{(\text{ЦУ})}$. Алгоритм вынесения окончательного решения в ЦУ также основывается на построении отношения правдоподобия $\Lambda_{\text{ЦУ}}$, причем он будет зависеть от вероятностей ошибок (5) и вероятностей P_i ($i = 1, \dots, K$). Несложно показать, что выражение для такого логарифма отношения правдоподобия можно представить в виде

$$M_{\text{ЦУ}} = \ln(\Lambda_{\text{ЦУ}}) = \begin{cases} c_1, & u_K^{(\text{ЦУ})} = 1; \\ c_2, & u_K^{(\text{ЦУ})} = -1, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned}
 c_1 &= \ln \left[\frac{(1 - \beta_{\Sigma_K})(1 - P_K) + \beta_{\Sigma_K} P_K}{\alpha_{\Sigma_K} (1 - P_K) + (1 - \alpha_{\Sigma_K}) P_K} \right]; \\
 c_2 &= \ln \left[\frac{(1 - \beta_{\Sigma_K}) P_K + \beta_{\Sigma_K} (1 - P_K)}{\alpha_{\Sigma_K} P_K + (1 - \alpha_{\Sigma_K})(1 - P_K)} \right].
 \end{aligned}$$

Окончательно получаем, что в ЦУ на основе принятых данных $u_K^{(\text{ЦУ})}$ решение о наличии или

отсутствии объекта наблюдения будет выноситься в соответствии с алгоритмом:

1) если $M_{ЦУ} = \ln(\Lambda_{ЦУ}) > h_{ЦУ}$, то выносится решение о том, что объект присутствует в зоне наблюдения сети (выполняется гипотеза H_1);

2) если же $M_{ЦУ} = \ln(\Lambda_{ЦУ}) < h_{ЦУ}$, то решение выносится в пользу H_0 (объект отсутствует в зоне наблюдения).

Порог обнаружения $h_{ЦУ}$, как и ранее, выбирался в соответствии с критерием идеального наблюдателя, а вероятности ошибок обнаружения будут находиться аналогично (3), (5):

$$\begin{aligned} \alpha_{\Sigma_{ЦУ}} &= \\ &= [\alpha_{\Sigma_K} (1 - P_K) + (1 - \alpha_{\Sigma_K}) P_K] \sigma(c_1 - h_{ЦУ}) + \\ &+ [\alpha_{\Sigma_K} P_K + (1 - \alpha_{\Sigma_K}) (1 - P_K)] \sigma(c_2 - h_{ЦУ}); \\ \beta_{\Sigma_{ЦУ}} &= \\ &= [(1 - \beta_{\Sigma_K}) (1 - P_K) + \beta_{\Sigma_K} P_K] \sigma(h_{ЦУ} - c_1) + \\ &+ [(1 - \beta_{\Sigma_K}) P_K + \beta_{\Sigma_K} (1 - P_K)] \sigma(h_{ЦУ} - c_2). \end{aligned} \quad (7)$$

Параметры, определяющие работу алгоритмов в каждом сенсоре (2), (4), (6), и их характеристики эффективности (3), (5), (7) описываются достаточно простыми рекуррентными формулами, особенно удобными при цифровой реализации.

Подчеркнем еще раз, что для использования синтезированных алгоритмов необходимо знать не только вероятности ошибок обнаружения для каждого локального сенсора α_i и β_i , но и вероятности ошибок при передаче информации в каналах связи, т. е. при передаче информации от i -го сенсора к $(i + 1)$ -му сенсору P_i ($i = 1, \dots, K$). В дальнейшем предполагалось, что информация от сенсора к сенсору передается с помощью радиосигналов с фазовой манипуляцией. Как известно [18], если в канале присутствует только гауссовский белый шум, то искомая вероятность ошибки может быть найдена по формуле [14]

$$P_i = \Phi(-z_i),$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt$ – интеграл

вероятностей [17]; $z_i = \frac{Z_0}{1 + \varepsilon d_i^\gamma}$ – отношение

сигнал/шум (ОСШ) для i -го локального сенсора (Z_0 – ОСШ на нулевом расстоянии от объекта наблюдения; ε – коэффициент пропорциональности, зависящий от рассматриваемых условий; d_i – расстояние от i -го сенсора до $(i + 1)$ -го сенсора; γ – коэффициент ослабления).

Таким образом, приведенные формулы (2), (4), (6) полностью определяют структуру синтезированных комплексных алгоритмов обнаружения, используемых как непосредственно в самих локальных сенсорах, так и при окончательном вынесении решения – в ЦУ. Эффективность обнаружения всей системы будем характеризовать минимальной вероятностью полной ошибки $P_{\Sigma_{\min}} = (\alpha_{\Sigma_{ЦУ}} + \beta_{\Sigma_{ЦУ}})/2$, достигаемой при некотором значении порога $h_{ЦУ}$. Исходя из приведенных формул (3), (5), (7), нетрудно заметить, что искомая вероятность полной ошибки зависит от количества сенсоров в сети, от ОСШ в каналах связи объекта, а также от координат объекта наблюдения.

Исследование эффективности комплексного алгоритма. Исследование эффективности разработанного комплексного алгоритма обнаружения, т. е. определение минимальной вероятности полной ошибки всей системы, выполнялось для различных условий наблюдения, отличающихся друг от друга количеством используемых сенсоров, ОСШ в каналах связи и местоположением объекта. Расчеты выполнялись при следующих предположениях: местоположение объекта априори известно; вероятность ложной тревоги для всех сенсоров одинакова и равна $\alpha = 10^{-1}$; вероятность пропуска сигнала для каждого сенсора, зависящая от расстояния до объекта, вычислялась по известным формулам [17, 18].

На рис. 2 показана зависимость $P_{\Sigma_{\min}}$ от количества сенсоров в сети при разных значениях ОСШ Z_0 . Предполагалось, что сенсоры расположены на прямой линии длиной $L = 40$ (в дальнейшем все числовые значения приводятся в некоторых безразмерных единицах). Координаты объекта наблюдения считались известными:

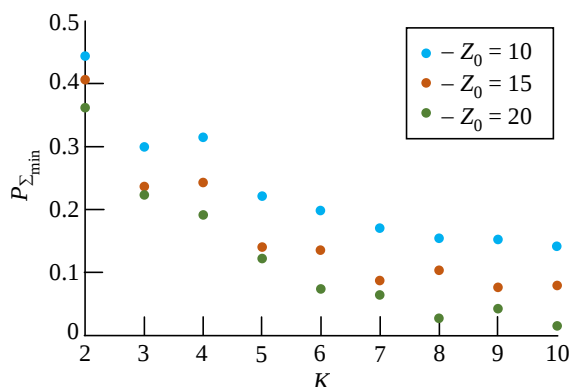


Рис. 2. Зависимость вероятности полной ошибки всей системы от K при разных значениях ОСШ

Fig. 2. Dependence of the total error probability of the entire system on K for different SNR values

$(x_0; y_0) = (20; 5)$; координаты ЦУ также предполагались известными и равными $(x_x; y_y) = (35; -3)$, т. е. объект находился примерно посередине, а ЦУ – ближе к краю (к последнему K -му сенсору) сети. Параметры $\varepsilon = 1, \gamma = 2$.

Из приведенных результатов следует, что вероятность полной ошибки в целом уменьшается с ростом количества сенсоров. Однако это уменьшение не плавное: в некоторых случаях вероятность полной ошибки может даже несколько возрасти при увеличении количества сенсоров, учитывая то, что при не очень большом количестве сенсоров на эффективность обнаружения достаточно сильно влияет их взаимное расположение относительно объекта наблюдения. Это расположение может зависеть от того, какое количество сенсоров имеется в сети: четное или нечетное. Увеличение количества сенсоров более 10...15 в рассматриваемых условиях нецелесообразно, так как не приводит к существенному уменьшению вероятности полной ошибки. Таким образом, рис. 2 позволяет определить необходимое количество сенсоров в сети для достижения заданной эффективности обнаружения в конкретных условиях наблюдения.

На рис. 3 показана зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ Z_0 при разном количестве сенсоров в сети K . Как и следовало ожидать, с увеличением ОСШ полная вероятность ошибки уменьшается. Причем степень влияния ОСШ на эффективность обнаружения разная для разного количества сенсоров в сети. Действительно, если $K = 3$, а ОСШ увеличивается с 10 до 20, то вероятность полной ошибки уменьшается всего

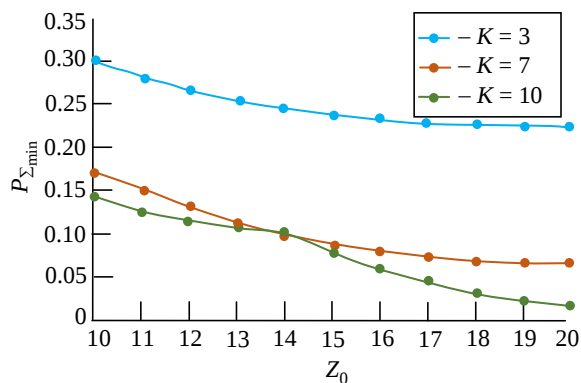


Рис. 3. Зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ при разных значениях K

Fig. 3. Dependence of the probability of total error on SNR for different values of K

в 1.25 раз. В то же время при $K = 10$ этот выигрыш увеличивается до 8 раз.

Далее было исследовано влияние местоположения объекта на эффективность его обнаружения. На рис. 4 приведена зависимость $P_{\Sigma min}(x_0)$ при $y_0 = 5, Z_0 = 20$ для разного количества сенсоров. Из рисунка можно сделать следующие выводы. Чем меньше сенсоров в сети, тем сильнее ощущается влияние координат объекта на эффективность его обнаружения, особенно если объект располагается достаточно близко к последнему K -му сенсору сети. При увеличении количества сенсоров в сети местоположение объекта начинает влиять на эффективность обнаружения не столь значительно. Следовательно, даже априорное незнание координат объекта при достаточно большом количестве используемых сенсоров (в рассматриваемых условиях, не менее 7) не препятствует применению разработанного алгоритма обнаружения.

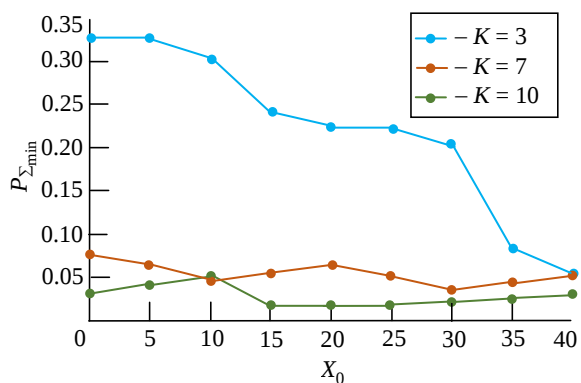


Рис. 4. Зависимость вероятности полной ошибки от местоположения объекта при разных значениях K в сети

Fig. 4. Dependence of the probability of total error on the location of the object for different values of K in the network

Представляет интерес сравнение эффективности обнаружения предложенного метода с методом, описанным в [16], а также с методом, основанным на применении радиальной топологии беспроводной сети (например, [12], [19]). Как отмечалось ранее, подход, изложенный в [16], основывается также на последовательной передаче информации от сенсора к сенсору. Однако информация, полученная от предыдущего сенсора, при этом дополнительно не обрабатывается, а просто добавляется к формируемому в данном сенсоре пакету. Сравнительный анализ эффективности обнаружения алгоритмов предлагаемого и изложенного в [16] свидетельствует о следующем. Эффективность предлагаемого алгоритма всегда, по крайней мере, не лучше эффективности алгоритма из [16]. Однако имеющийся проигрыш весьма незначителен: в рассматриваемых условиях вероятность полной ошибки может возрасти максимум в 5–7 раз, причем только при очень больших значениях ОСШ Z_0 и большом количестве сенсоров в сети (порядка 10 и более). В остальных случаях проигрыша либо вообще нет, либо он незначителен. Однако нельзя забывать, что предложенный алгоритм, как отмечалось ранее, существенно выигрывает с точки зрения увеличения энергетического ресурса сети (увеличения времени функционирования сети). Сравнение предложенного алгоритма с алгоритмом, основанным на применении радиальной архитектуры сети, свидетельствует о следующем. В одинаковых условиях, т. е. при одинаковых уровнях шумов в обоих случаях (что, кстати, не всегда возможно выполнить в реальных условиях), алгоритмы из [16] и [12]

обладают практически одинаковой эффективностью. Следовательно, приведенный вывод об энергетическом проигрыше разработанного алгоритма относительно известного (с радиальной архитектурой) остаются справедливыми и в данном случае. Опять же не следует забывать, что сеть с радиальной архитектурой не всегда может быть использована на практике в связи со сложным рельефом местности.

Заключение и выводы. В статье был выполнен статистический синтез и анализ алгоритма комплексного обнаружения объекта излучения в сети, содержащей некоторое количество измерительных сенсоров, осуществляющих комплексную обработку информации, поступающей от объекта и соседнего сенсора. Окончательное решение выносится в ЦУ на основе вынесенных решений в локальных сенсорах. Рассматривалась так называемая линейная топология сети, в которой информация передается последовательно от сенсора к сенсору. Получены точные (рекуррентные) выражения для характеристик, описывающих эффективность синтезированного комплексного алгоритма. Приведенные результаты исследования эффективности обнаружения синтезированным алгоритмом позволяют сделать обоснованный выбор параметров сети для достижения наилучшей эффективности обнаружения в заданных условиях. Возможными перспективными направлениями исследований являются исследования, связанные с влиянием на эффективность обнаружения каналов связи с замираниями и рассеянием, а также разработка комплексных алгоритмов обнаружения при неизвестных координатах цели [19].

Список литературы

1. Wireless Sensor Network as a Mesh: Vision and Challenges / Z. Nurlan, T. Zhukabayeva, M. Othman, A. Adamova, N. Zhakiyev // IEEE Access. 2021. Vol. 10. P. 46–67. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137341
2. Manuel E. M., Pankajakshan V., Mohan M. T. Efficient Strategies for Signal Aggregation in Low-Power Wireless Sensor Networks With Discrete Transmission Ranges // IEEE Sensors Letters. 2023. Vol. 7, iss. 3. Art. № 7500304. doi: 10.1109/LENS.2023.3250432
3. Hyun-Ho Choi, Sengly Muy, Jung-Ryun Lee. Geometric Analysis-Based Cluster Head Selection for Sectorized Wireless Powered Sensor Networks // IEEE Wireless

- Communications Letters. 2021. Vol. 10, iss. 3. P. 649–653. doi: 10.1109/LWC.2020.3044902
4. Marinescu D. C. Complex systems and clouds. A self-organization and self-management perspective. Amsterdam: Elsevier, 2017. 238 p.
5. Ye W., Heidemann J., Estrin D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks // Proc. of 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, New York, USA, 23–27 June 2002. IEEE, 2002. Vol. 3. P. 1567–1576. doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019408
6. ZigBee Specification. ZigBee Alliance Std., 2007. URL: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf> (дата обращения 20.03.2025).

7. Adaptive Scale Patch-Based Contrast Measure for Dim and Small Infrared Target Detection / Z. Qiu, Y. Ma, F. Fan, J. Huang, M. Wu // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022. Vol. 19. P. 1–5.
doi: 10.1109/LGRS.2020.3036842

8. Rao M., Kamila N. K. Target Tracking in Wireless Sensor Networks: The Current State of Art // Sensor Technology: Concepts, Methodologies, Tools and Applications. 2020. Vol. 2. P. 857–880.
doi: 10.4018/978-1-7998-2454-1.ch041

9. Amutha J., Sharma S., Nagar J. WSN Strategies Based on Sensors, Deployment, Sensing Models, Coverage and Energy Efficiency: Review, Approaches and Open Issues // Wireless Personal Communications. 2020. Vol. 111. P. 1089–1115.
doi: 10.1007/s11277-019-06903-z

10. Surenter I., Sridhar K. P., Roberts M. K. Maximizing energy efficiency in wireless sensor networks for data transmission: A Deep Learning-Based Grouping Model approach // Alexandria Engineering J. 2023. Vol. 83. P. 53–65.
doi: 10.1016/j.aej.2023.10.016

11. Nedham W. B., Al-Qurabat A. K. M. A Comprehensive review of clustering approaches for energy efficiency in wireless sensor networks // Int. J. of Computer Applications in Technology. 2023. Vol. 72, № 2. P. 139–160.
doi: 10.1504/IJCAT.2023.10058667

12. Парфенов В. И., Ле В. Д. Применение беспроводной сенсорной системы для охраны объектов с использованием датчиков инфракрасного излучения // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45, № 3. С. 364–371.
doi: 10.18287/2412-6179-CO-788

13. Robustness of the Counting Rule for Distributed Detection in Wireless Sensor Network / A. Goel, A. Patel, K. G. Nagananda, P. K. Varshney // IEEE Signal Processing Letters. 2018. Vol. 25, iss. 8. P. 1191–1195.
doi: 10.1109/LSP.2018.2850529

14. Парфенов В. И., Ле В. Д. Беспроводные сенсорные сети. Принципы комплексирования информации от сенсоров при обнаружении объекта излучения. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2025. 104 с.

15. ПСНТ 422–2020 (ИСО/МЭК 30128:2014) Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. Информационные технологии. Сети сенсорные. Сетевой интерфейс прикладного программирования датчика / Утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 23.07.2020 № 31-пнст.

16. Парфенов В. И., Буй Ч. Т. Оптимальный алгоритм комплексного обнаружения целей в беспроводных сетях с "линейной" топологией // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXX Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2024. Т. 1. С. 276–285.

17. Тихонов В. И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь, 1983. 320 с.

18. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. 1104 с.

19. Parfenov V. I., Le V. D. Optimal fusion rule for distributed detection with channel errors taking into account sensors' unreliability probability when protecting coastlines // Int. J. of Sensor Networks. 2022. Vol. 38, iss. 2. P. 71–84.
doi: 10.1504/IJNET.2022.121157

Информация об авторах

Парфенов Владимир Иванович – доктор физико-математических наук (2002), профессор (2009), профессор кафедры радиофизики Воронежского госуниверситета, профессор кафедры технической экспертизы и компьютерной безопасности Воронежского института МВД России, ведущий научный сотрудник концерна "Созвездие". Автор более 200 научных работ. Сфера научных интересов – разработка и исследование эффективности алгоритмов обработки сигналов (стохастических, хаотических, оптических и пр.) на фоне помех с учетом особенностей их практического применения.

Адрес: Воронежский государственный университет, пл. Университетская, д. 1, Воронеж, 394018, Россия

E-mail: vip@phys.vsu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9815-5657>

Буй Чонг Тиен – инженер по специальности "Специальные радиотехнические системы" (2023, ВУНЦ ВВС Военно-воздушной академии им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина), аспирант физического факультета Воронежского государственного университета. Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – обработка сигналов на фоне помех с целью разработки алгоритмов для обнаружения целей; разведка.

Адрес: Воронежский государственный университет, пл. Университетская, д. 1, Воронеж, 394018, Россия

E-mail: trongtienpt98@gmail.com

References

1. Nurlan Z., Zhukabayeva T., Othman M., Adamova A., Zhakiyev N. Wireless Sensor Network as a Mesh: Vision and Challenges. IEEE Access. 2021, vol. 10, pp. 46–67.
doi: 10.1109/ACCESS.2021.3137341

2. Manuel E. M., Pankajakshan V., Mohan M. T. Efficient Strategies for Signal Aggregation in Low-Power Wireless Sensor Networks With Discrete Trans-

mission Ranges. IEEE Sensors Letters. 2023, vol. 7, iss. 3, art. no. 7500304.

doi: 10.1109/LSSENS.2023.3250432

3. Hyun-Ho Choi, Sengly Muy, Jung-Ryun Lee. Geometric Analysis-Based Cluster Head Selection for Sectorized Wireless Powered Sensor Networks. IEEE Wireless Communications Letters. 2021, vol. 10, iss. 3, pp. 649–653.
doi: 10.1109/LWC.2020.3044902

4. Marinescu D. C. Complex Systems and Clouds. A self-Organization and Self-Management Perspective. Amsterdam, Elsevier, 2017, 238 p.
5. Ye W., Heidemann J., Estrin D. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. Proc. of 21st Annual Joint Conf. of the IEEE Computer and Communications Societies, New York, USA, 23–27 June 2002. IEEE, 2002, vol. 3, pp. 1567–1576. doi: 10.1109/INFCOM.2002.1019408
6. ZigBee Specification. ZigBee Alliance Std., 2007. Available at: <https://csa-iot.org/wp-content/uploads/2023/04/05-3474-23-csg-zigbee-specification-compressed.pdf> (accessed 20.03.2025).
7. Qiu Z., Ma Y., Fan F., Huang J., Wu M. Adaptive Scale Patch-Based Contrast Measure for Dim and Small Infrared Target Detection. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2022, vol. 19, pp. 1–5. doi: 10.1109/LGRS.2020.3036842
8. Rao M., Kamila N. K. Target Tracking in Wireless Sensor Networks: The Current State of Art. Sensor Technology: Concepts, Methodologies, Tools and Applications. 2020, vol. 2, pp. 857–880. doi: 10.4018/978-1-7998-2454-1.ch041
9. Amutha J., Sharma S., Nagar J. WSN Strategies Based on Sensors, Deployment, Sensing Models, Coverage and Energy Efficiency: Review, Approaches and Open Issues. Wireless Personal Communications. 2020, vol. 111, pp. 1089–1115. doi: 10.1007/s11277-019-06903-z
10. Surenter I., Sridhar K. P., Roberts M. K. Maximizing Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks for Data Transmission: A Deep Learning-Based Grouping Model approach. Alexandria Engineering J. 2023, vol. 83, pp. 53–65. doi: 10.1016/j.aej.2023.10.016
11. Nedham W. B., Al-Qurabat A. K. M. A Comprehensive Review of Clustering Approaches for Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks. Int. J. of Computer Applications in Technology. 2023, vol. 72, no. 2, pp. 139–160. doi: 10.1504/IJCAT.2023.10058667
12. Parfenov V. I., Le V. D. Application of a Wireless Sensor System for Object Protection Using Infra-red Sensors. Computer Optics. 2021, vol. 45, no. 3, pp. 364–371. (In Russ.) doi: 10.18287/2412-6179-CO-788
13. Goel A., Patel A., Nagananda K. G., Varshney P. K. Robustness of the Counting Rule for Distributed Detection in Wireless Sensor Network. IEEE Signal Processing Letters. 2018, vol. 25, iss. 8, pp. 1191–1195. doi: 10.1109/LSP.2018.2850529
14. Parfenov V. I., Le V. D. *Besprovodnye sensornye seti. Principy kompleksirovaniya informacii ot sensorov pri obnaruzhenii ob'ekta izlucheniya* [Wireless Sensor Networks. Principles of Collecting Information from Sensors When Detecting a Radiation Object]. Moscow, Vologda, *Infra-Inzheneriya*, 2025, 104 p. (In Russ.)
15. PSNT 422–2020 (ISO/MEK 30128:2014) *Predvaritel'nyj nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii. Informacionnye tehnologii. Seti sensornye. Setevoy interfejs prikladnogo programmirovaniya datchika. (utv. I vveden v dejstvie Prikazom Rosstandarta ot 23.07.2020 no. 31-pnst).* [Preliminary National Standard of the Russian Federation. Information Technologies. Sensor Networks. Sensor Application Programming Network Interface]. (In Russ.)
16. Parfenov V. I., Bui T. T. *Optimal'nyi algoritm kompleksnogo obnaruzheniya tselei v besprovodnykh setyakh s "lineinoi" topologiei* [Optimal Algorithm for Comprehensive Target Detection in Wireless Sensor Networks with "Linear" Topology]. *Radiolokacija, navigacija, svjaz': sb. tr. XXX Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. Voronezh, Izd-vo VGU*, 2024, vol. 1, pp. 276–285. (In Russ.)
17. Tihonov V. I. *Optimal'nyj priem signalov* [Optimal Signal Reception]. Moscow, *Radio i svjaz'*, 1983, 320 p. (In Russ.)
18. Skljär B. *Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital Communications. Theoretical Foundations and Practical Applications]. Moscow, *Vil'jams*, 2004, 1104 p. (In Russ.)
19. Parfenov V. I., Le V. D. Optimal Fusion Rule for Distributed Detection with Channel Errors Taking into Account Sensors' Unreliability Probability When Protecting Coastlines. Int. J. of Sensor Networks. 2022, vol. 38, iss. 2, pp. 71–84. doi: 10.1504/IJSNET.2022.121157

Information about the authors

Vladimir I. Parfenov, Dr Sci. (Eng.) (2002), Professor (2009), Professor of the Department of Radiophysics of Voronezh State University, Professor of the Department of Technical Expertise and Computer Security of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, senior researcher at the Sozvezdie Concern. he author of more than 200 scientific publications. Area of expertise: development and research of the effectiveness of signal processing algorithms (stochastic, chaotic, optical, etc.) against a background of interference, taking into account the features of their practical application.

Address: Voronezh State University, 1, Universitetskaya Sq., Voronezh 1394018, Russia

E-mail: vip@phys.vsu.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9815-5657>

Bui Trong Tien, Engineer specializing in "Special radio engineering systems" (2023, Military Training and Research Center of the Air Force of the Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy), Postgraduate student of Faculty of Physics of Voronezh State University. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: signal processing against a background of interference in order to develop algorithms for target detection; reconnaissance.

Address: Voronezh State University, 1, Universitetskaya Sq., Voronezh 1394018, Russia

E-mail: trongtienpt98@gmail.com