

Анализ влияния окружающей среды на эффективность алгоритма обработки информации в беспроводных сенсорных сетях

В.И. Парфенов , В.Д. Ле 

Воронежский государственный университет
394018, Россия, г. Воронеж,
Университетская пл., 1

Аннотация – В работе были выполнены синтез и анализ алгоритма, выносящего решение о наличии или отсутствии наблюдаемого объекта с использованием пространственно-распределенных датчиков беспроводной сенсорной системы. Показаны особенности влияния окружающей среды на функционирование локальных сенсоров на примерах сенсоров звукового и вибрационного типов. С целью определения степени влияния среды распространения на эффективность функционирования системы получены теоретические формулы для показателя эффективности принятия решения. Приведены зависимости полной вероятности ошибки от энергетического параметра с учетом ослабления в окружающей среде. При этом рассматривались основные виды сред распространения. Выполнен анализ полученных результатов, и оценена степень влияния среды распространения на качество функционирования беспроводной сенсорной системы. При этом было показано, что ее эффективность, несмотря на возможное существенное ее ухудшение вследствие сильного поглощения средой распространения, может быть повышена за счет увеличения количества используемых сенсоров.

Ключевые слова – беспроводные сенсорные сети, сенсоры, вероятность ошибки, коэффициент поглощения, окружающая среда.

Введение

В настоящее время в связи с мировыми тенденциями роста стоимости энергии, повышением эффективности и экологичности производства, обеспечением безопасности человеческой и природной жизни уделяется большое внимание разработке и применению инновационных технологий, в том числе беспроводных сенсорных систем. Беспроводная сенсорная система (БСС) – это распределенная, самоорганизующаяся система множества сенсоров, предназначенных для отслеживания физических явлений или условий окружающей среды, а также исполнительных устройств, объединенных между собой радиоканалом [1]. Благодаря своей высокой гибкости, расширенному охвату наблюдения, надежности, мобильности и экономической эффективности, БСС (WSN) имеют широкое применение и высокий потенциал в области военного наблюдения, безопасности, мониторинга окружающей среды [2; 3].

В частности, примером подобной БСС может служить распределенная система охраны. Решения о наличии или отсутствии проникновения на охраняемые объекты в таких системах могут выноситься одновременно несколькими сенсорами по имеющемуся определенному алгоритму. Эти решения далее по радиоканалу передаются в центральный узел (ЦУ), в котором локальные решения, принятые в виде бинарной информации

типа «да» или «нет», комплексуются, и выносятся окончательное решение о наличии или отсутствии проникновения на объект с целью повышения эффективности. Существенное повышение эффективности по сравнению с эффективностью отдельных сенсоров за счет комплексирования информации в ЦУ показано во многих ранее опубликованных работах [4–8]. Важно отметить, что при функционировании БСС окружающая среда также является одним из элементов, который непосредственно оказывает влияние на эффективность как локальных сенсоров, так и всей системы. В связи с этим цель данной работы заключается в синтезе комплексной системы обнаружения на основе информации от локальных сенсоров, в анализе эффективности принятия решения такой комплексной системой с учетом влияния среды распространения.

1. Влияние окружающей среды на функционирование локального сенсора

В распределенной системе охраны возможно применение датчиков (сенсоров), функционирование которых основывается на разных физических явлениях (звуковом, вибрационном, тепловом излучениях и пр.), причем могут использоваться несколько сенсоров разного типа, обладающих разной эффективностью. Под сенсором будем понимать устройство, преобразующее входное

Таблица 1
Table 1

Тип среды	Частота	$\mu / f^2, \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^2$
Воздух	132–400 (кГц)	$2,94 \cdot 10^{-13} - 3,99 \cdot 10^{-13}$
Кислород	598,9 (кГц)	$1,68 \cdot 10^{-13}$ (давление 0,99 атм.)
Углекислый газ	304,4 (кГц)	$27,1 \cdot 10^{-13}$ (давление 0,98 атм.)
Вода	7–250 (МГц)	$25 \cdot 10^{-17}$ ($t^0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$)

воздействие любой физической природы (температуры, давления, силы света и пр.) в сигнал, удобный для дальнейшего использования. Кроме того, каждый локальный узел содержит не только измерительный сенсор, но и встроенный передатчик, который передает информацию об объекте наблюдения в ЦУ, в котором и реализуется комплексирование принятых данных, и выносятся окончательное решение. Очевидно, в таких распределенных системах большое внимание необходимо уделять функционированию локального сенсора, который непосредственно воспринимает входные воздействия от объекта и выполняет их первичную обработку. При этом на эффективность принятия решения сенсором будут оказывать непосредственное влияние характеристики окружающей среды распространения. Рассмотрим подробнее примеры влияния окружающей среды на эффективность функционирования подобных распределенных систем охраны.

Практически всегда функционирование измерительного сенсора прямого действия основано на восприятии физических явлений, позволяющих в ответ на неэлектрические воздействия получать на выходе электрические сигналы. К таким явлениям относятся, например, фотоэффект, пьезоэлектрический эффект, эффект Зеебека (термоэлектрический эффект) и др. Известно, что энергия преобразованного электрического сигнала пропорциональна порции излученной энергии от цели. Для описания энергетической характеристики цели может быть использована некоторая физическая величина, эквивалентная излученной мощности от цели. При этом можно записать следующее выражение для интенсивности принимаемого сигнала в открытом пространстве в общем виде [9]:

$$I = \frac{P_0}{4\pi r^2} \exp(-2\mu r), \quad (1)$$

где P_0 – излучаемая мощность от источника; μ – коэффициент поглощения, зависящий от

частоты излучения и свойств среды. Последний коэффициент может быть получен по расчетными формулам или из справочных материалов. Например, при распространении звука формула для коэффициента поглощения имеет следующий вид [9]:

$$\mu = \frac{\omega^2}{2\rho v^3} \left(\frac{4}{3}\eta + \zeta + \chi \left[\frac{1}{C_V} - \frac{1}{C_P} \right] \right) + \mu_p, \quad (2)$$

где ω – частота звукового излучения; ρ – плотность среды; v – скорость распространения волны в среде; η – коэффициент внутреннего трения; ζ – коэффициент вязкости; χ – коэффициент теплопроводности среды; C_V, C_P – удельные тепловые емкости при постоянном объеме и давлении; μ_p – коэффициент поглощения, связанный с релаксацией [9].

Значения нормированного коэффициента поглощения звука для нескольких условий приведены в табл. 1.

В случае распространения вибрации в среде коэффициент поглощения можно определить из следующего выражения [10]:

$$\mu = 4,34 \frac{\omega \eta}{v} \left[\frac{1}{4} \left(1 + \frac{\rho_2 v_2}{\rho_1 v_1} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где ω – частота вибрации; η – коэффициент потерь; v – скорость распространения волны; ρ – плотность среды (предполагается, что вибрация проходит от слоя с индексом «1» к среде с индексом «2»). Значения η , v и плотность ρ для основных типов грунта приведены в табл. 2.

Известно, что мощность полученного сигнала в локальном сенсоре P_c пропорциональна интенсивности звука в данной точке приема. Следовательно, можно записать следующее выражение для мощности полученного сенсором от цели сигнала:

$$P_c = k \frac{P_0}{4\pi r^2} \exp(-2\mu r), \quad (4)$$

где k – некоторый коэффициент пропорциональности.

Таблица 2
 Table 2

Вид среды	Плотность среды ρ , г/см ³	Скорость распространения продольной волны v , м/с	Коэффициент потерь η
Скальный грунт	2,65	3500	0,01
Песок	1,6	600	0,1
Глина	1,7	1500	0,2

2. Алгоритм обнаружения цели

Рассмотрим наблюдение в i -м локальном сенсоре. Для этого введем в рассмотрение гипотезу H_1 , которая означает, что проникновение на наблюдаемый объект происходит, и гипотезу H_0 , при выполнении которой такого проникновения на объект нет. Далее будем характеризовать эффективность обнаружения сенсором вероятностями ложной тревоги α_i и пропуска цели β_i . В практических условиях применений БСС на локальном сенсоре часто используется критерий обнаружения Неймана – Пирсона, поэтому α_i часто предполагаются заданными. В то же время вероятность пропуска цели β_i зависит от энергии сигнала, полученной от цели. В случае энергетического обнаружения в i -м локальном сенсоре (при расстоянии r_i от i -й цели до сенсора) эти вероятности можно найти в соответствии со следующими выражениями:

$$\alpha_i = 1 - \Phi(H), \quad \beta_i = \Phi(H - Z(r_i)), \quad (5)$$

где

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$$

– интеграл вероятности;

$$Z(r_i) = \sqrt{\frac{2E(r_i)}{N}}$$

– отношение сигнал/шум; H – порог обнаружения; N – двусторонний спектр мощности белого шума.

Используя формулу (4), можно записать выражение для отношения сигнал/шум для i -го локального сенсора в сокращенном виде как

$$Z(r_i) = \sqrt{\frac{q_{0i}^2 \exp(-2\mu_i r_i)}{r_i^2}}, \quad (6)$$

где q_{0i} – отношение сигнал/шум при нулевом расстоянии от цели до сенсора.

Решения, выносимые локальным сенсором о наличии или отсутствии цели, могут быть представлены в виде бинарной информации: $u_i = 1$,

если i -й сенсор обнаруживает проникновение на охраняемый объект; $u_i = -1$ – в противном случае ($i = 1 \dots K$). Аналогично обозначим через U_i решение, выносимое центральным узлом, в результате обработки сигнала, пришедшего от i -го сенсора. Это решение также может принимать одно из двух значений: $U_i = 1$, если в ЦУ на основании принятого сигнала выносится решение, что сенсор обнаружил проникновение на охраняемый объект, и $U_i = -1$ – в противном случае. Кроме того, радиоканал между i -м сенсором и ЦУ будем характеризовать вероятностями ошибок первого и второго рода A_i и B_i .

В [7; 8] показано, как на основе алгоритма комплексирования информации в ЦУ может выноситься окончательное решение о наличии или отсутствии цели. По аналогии с [7; 8] выражение для отношения правдоподобия запишем в следующем виде:

$$M = \sum_{i=1}^K c_i(U_i)U_i = \sum_{i=1}^K X_i(U_i), \quad (7)$$

где

$$X_i(U_i) = \begin{cases} X1_i = \ln\left(\frac{\varphi_i^{(1)}}{\varphi_i^{(0)}}\right), & \text{если } U_i = 1, \\ X2_i = \ln\left(\frac{1 - \varphi_i^{(0)}}{1 - \varphi_i^{(1)}}\right), & \text{если } U_i = -1. \end{cases}$$

и

$$\varphi_i^{(0)} = \alpha_i(1 - B_i) + (1 - \alpha_i)A_i,$$

$$\varphi_i^{(1)} = (1 - \beta_i)(1 - B_i) + \beta_i A_i.$$

Следовательно, окончательное решающее правило обнаружения, используемое в ЦУ, можно записать как

$$M = \sum_{i=1}^K X_i(U_i) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} h, \quad (8)$$

где пороговое значение h определяется, исходя из выбранного критерия оптимальности.

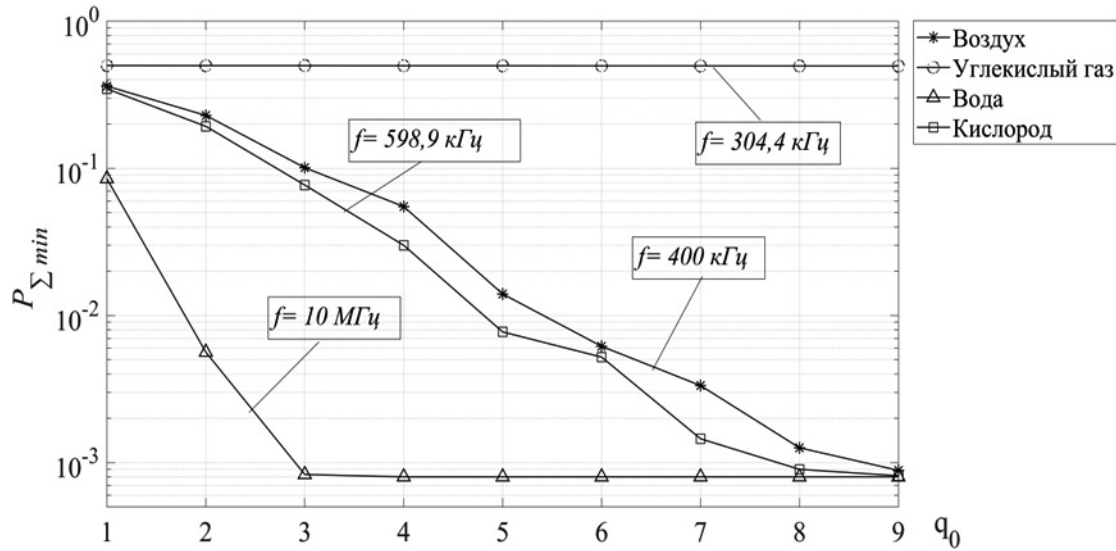


Рис. 1. Зависимость полной вероятности ошибки от энергетического параметра q_0 для БСС звукового вида
 Fig. 1. Dependence of the total error probability on the energy parameter q_0 for a sound-type wireless sensor system

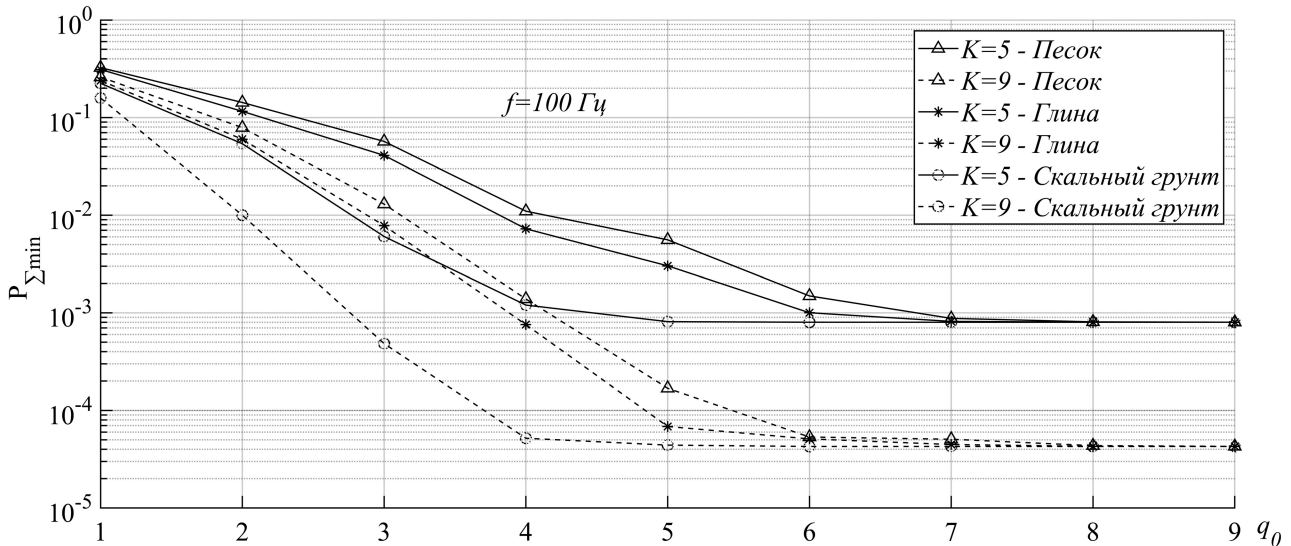


Рис. 2. Зависимость полной вероятности ошибки от энергетического параметра q_0 для БСС вибрационного вида
 Fig. 2. Dependence of the total error probability on the energy parameter q_0 for the vibration type wireless sensor system

Кроме того, для анализа влияния среды на эффективность системы для простоты предполагалось, что расстояние от цели до каждого локального сенсора одинаково. Для характеристики эффективности алгоритма (8) выберем критерий минимума полной вероятности ошибки $P_{\Sigma min} = \min(A_{\Sigma} + B_{\Sigma})/2$, достигаемого при определенном значении порога h^* , где A_{Σ} и B_{Σ} - вероятности ошибок первого и второго рода всей системы соответственно, которые можно определить по полученным выражениям из [7; 8]:

$$A_{\Sigma} = 1 - \Psi_K^{(0)}(h^*), \quad B_{\Sigma} = \Psi_K^{(1)}(h^*), \quad (9)$$

причем

$$\Psi_k^{(i)}(h^*) = \varphi_k^{(i)} \Psi_{k-1}^{(i)}(h^* - C1_k) +$$

$$+ (1 - \varphi_k^{(i)}) \Psi_{k-1}^{(i)}(h^* + C2_k),$$

$$i = 0 \text{ или } 1; k = 1, \dots, K, \quad \Psi_0^{(i)}(h^*) = \sigma(h^*),$$

где $\sigma(\cdot)$ - функция единичного скачка.

3. Результаты расчетов

В соответствии с вышеизложенным предположим, что вероятности ошибок первого рода для всех сенсоров одинаковы: $\alpha_i = 0,1$. Для описания эффективности каналов связи также предположим, что вероятности ошибок первого и второго рода для всех радиоканалов одинаковы и равны $A_i = 0,01; B_i = 0,01$.

Полученные результаты расчетов представлены на рис. 1, 2. На рис. 1 приведены зависимости пол-

ной вероятности ошибки от энергетического параметра q_0 для случая применения БСС звукового вида с количеством сенсором $K = 5$ и при расстоянии от цели до локальных сенсоров $r = 0,3$ м.

Из рис. 1 следует, что среда распространения существенно влияет на эффективность принятия решения всей системой. В среде, состоящей полностью из углекислого газа, полная вероятность ошибки всей системы практически не меняется и равна 0,5 (даже при больших значениях ОСШ q_0) (изображена линией с кружочками). В этом случае обоснованное вынесение решений невозможно. Действительно, при этом на уровне локального сенсора звук сильно поглощается средой, что приводит к ухудшению эффективности принятия решения как одиночным сенсором, так и всей системой. Наименьшую степень влияния на эффективность системы оказывает водная среда (вероятность на рис. 1 изображена линией с треугольниками). Однако с ростом энергетического параметра q_0 (ОСШ) полная вероятность ошибки быстро уменьшается и достигает предельного значения, которое не изменяется даже при увеличении q_0 . В воздухе и в кислороде влияние среды на эффективность системы более сильное, и в этих двух средах вероятности ошибок практически мало отличаются друг от друга.

На рис. 2 приведены зависимости полной вероятности ошибки от энергетического параметра q_0 для случая применения БСС вибрационного вида с количеством сенсором $K = 5$ (сплошные линии) и $K = 9$ (пунктирные линии) при расстоянии от наблюдаемой цели до локальных сенсоров $r = 1$ м.

Из рис. 2 следует, что эффективность принятия решения системой в случае применения сенсоров вибрационного вида наихудшая при распростра-

нении в песке (верхние линии с треугольниками) по сравнению с остальными видами сред. Наименьшая степень влияния на эффективность всей системы наблюдается в скальном грунте. Кроме того, можно отметить, что эффективность принятия решения системой может быть существенно повышена за счет увеличения количества сенсоров (например, при увеличении количества сенсоров с 5 до 9 вероятность ошибки уменьшается более чем на порядок при не очень малых значениях параметра q_0). Как и в случае звука, при одном и том же количестве сенсоров с ростом энергетического параметра q_0 полная вероятность ошибки уменьшается лишь до определенного предела. Это можно объяснить тем, что при больших значениях q_0 вероятности пропуска цели локальными сенсорами стремятся к нулю, в результате полная вероятность ошибки всей системы практически не меняется с ростом энергетического параметра q_0 . В этом случае эффективность системы не может дальше повышаться за счет энергетики.

Заключение

В данной работе были выполнены статистический синтез и анализ алгоритма комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом особенностей среды распространения. Приведенные результаты позволяют оценить эффективность принятия решения системой в разных средах функционирования локальных сенсоров и предварительно выбрать тип сенсора для повышения качества работы системы. Дальнейшим направлением исследований может стать разработка алгоритмов комплексирования информации с учетом замираний в канале связи.

Список литературы

1. Урманов Д.М., Болдова О.И. Беспроводные сенсорные системы для обеспечения безопасности подвижных и неподвижных объектов // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2013. № 3 (125). С. 128–134.
2. Al-Turjman F. *Wireless Sensor Networks: Deployment Strategies for Outdoor Monitoring*. Boca Raton: CRC Press, 2018. 222 p.
3. Hayes T., Ali F.H. *Mobile Wireless Sensor Networks: Applications and Routing Protocols* // *Handbook of Research on Next Generation Mobile Communications Systems*. Pennsylvania: IGI Global, 2016. P. 256–292. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8732-5>.
4. Thomopoulos S.C.A., Viswanathan R., Bougoulas D.C. Optimal decision fusion in multiple sensor systems // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1987. Vol. AES-23. № 5. P. 644–653. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310858>.
5. Chair Z., Varshney P.K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 1986. Vol. AES-22. № 1. P. 98–101. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310699>.
6. Varshney P.K. *Distributed Detection and Data Fusion*. N.-Y.: Springer, 1997. 276 p.
7. Парфенов В.И., Ле В.Д. Алгоритмы комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом вероятности выхода сенсоров из строя // *Радиотехника*. 2019. № 12 (19). С. 53–59. DOI: [https://doi.org/10.18127/j00338486-201912\(19\)-06](https://doi.org/10.18127/j00338486-201912(19)-06).
8. Парфенов В.И., Ле В.Д. Оптимальный алгоритм комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом влияния помех в канале радиосвязи // *Телекоммуникации*. 2020. № 2. С. 12–17. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?number_id=3034.
9. Бергман Л. *Ультразвук и его применение в науке и технике* / пер. с нем. М.: Изд-во иностр. лит., 1957. 726 с.
10. Иванов Н.И. *Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом*. М.: Логос, 2013. 432 с.

References

1. Urmanov D.M., Boldova O.I. Wireless sensor systems to ensure the safety of moving and stationary objects. *Elektronika: nauka, tehnologija, biznes*, 2013, no. 3 (125), pp. 128–134. (In Russ.)
2. Al-Turjman F. *Wireless Sensor Networks: Deployment Strategies for Outdoor Monitoring*. Boca Raton: CRC Press, 2018, 222 p.
3. Hayes T., Ali F.H. Mobile Wireless Sensor Networks: Applications and Routing Protocols. *Handbook of Research on Next Generation Mobile Communications Systems*. Pennsylvania: IGI Global, 2016, pp. 256–292. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-8732-5>.
4. Thomopoulos S.C.A., Viswanathan R., Bougoulas D.C. Optimal decision fusion in multiple sensor systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1987, vol. AES-23, no. 5, pp. 644–653. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1987.310858>.
5. Chair Z., Varshney P.K. Optimal data fusion in multiple sensor detection systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1986, vol. AES-22, no. 1, pp. 98–101. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.1986.310699>.
6. Varshney P.K. *Distributed Detection and Data Fusion*. New York: Springer, 1997, 276 p.
7. Parfenov V.I., Le V.D. Algorithms for integrating information in wireless sensor networks, taking into account the probability of sensor failure. *Radiotekhnika*, 2019, no. 12 (19), pp. 53–59. DOI: [https://doi.org/10.18127/j00338486-201912\(19\)-06](https://doi.org/10.18127/j00338486-201912(19)-06). (In Russ.)
8. Parfenov V.I., Le V.D. The optimal algorithm for integrating information in wireless sensor networks, taking into account the influence of interference in the radio channel. *Telekommunikatsii*, 2020, no. 2, pp. 12–17. URL: http://www.nait.ru/journals/number.php?p_number_id=3034. (In Russ.)
9. Bergman L. *Ultrasound and Its Use in Science and Technology*. Trans. from German. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1957, 726 p. (In Russ.)
10. Ivanov N.I. *Engineering Acoustics. Theory and Practice of Noise Control*. Moscow: Logos, 2013, 432 p. (In Russ.)

Physics of Wave Processes and Radio Systems



2020, vol. 23, no. 2, pp. 49–54

DOI 10.18469/1810-3189.2020.23.2.49-54

Received 6 March 2020

Accepted 9 April 2020

Analysis of the environment influence on the efficiency of the information processing algorithm in wireless sensor networks

Vladimir I. Parfenov , Van Dong Le 

Voronezh State University
1, Universitetskaya Square,
Voronezh, 394018, Russia

Abstract – In this work, the synthesis and analysis of the algorithm that makes a decision on the presence or absence of the observed object using the spatially distributed sensors of wireless sensor networks are executed. The peculiarities of the influence of the external environment on the functioning of local sensors on the example of sound and vibration sensors are shown. With the purpose of determine the degree of influence of the environment on the efficiency of functioning of the system, theoretical formulas for the decision-making efficiency indicators are obtained. The dependences of the total error probability on the energy parameter taking into account the attenuation in the environment are presented. The main types of propagation environment were considered. Analysis of the results is executed and the degree of influence of the environment on the quality of functioning of the wireless sensor system is evaluated. Herewith it was shown that its efficiency, despite its possible significant deterioration due to strong absorption by the propagation environment, can be increased on account of increasing the number of sensors used.

Keywords – wireless sensor networks (WSN), sensors, error probability, absorption coefficient, environment.

Информация об авторах

Парфенов Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики Воронежского государственного университета, профессор кафедры радиотехники и электроники Воронежского института МВД России, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: применение методов статистической радиотехники к синтезу и анализу систем передачи и обработки информации.

E-mail: vip@phys.vsu.ru

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

Ле Ван Донг, аспирант Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: применение методов статистической радиотехники к синтезу и анализу систем передачи и обработки информации, радиоразведки.

E-mail: levandongx93@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2339-0799>

Information about the Authors

Vladimir I. Parfenov, Doctor of Physics and Mathematics, professor of the Department Radiophysics, Voronezh State University, Voronezh, Russia; professor of the Department of Radiotechnics and Electronics, Voronezh Institute of Russian Ministry of Internal Affairs, Voronezh, Russia.

Research interests: application of methods of statistical radio-technics to synthesis and analysis of information transmission and processing systems.

E-mail: vip@phys.vsu.ru

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

Van Dong Le, postgraduate student, Voronezh State University, Voronezh, Russia.

Research interests: application of methods of statistical radio-technics to synthesis and analysis of information transmission and processing systems, radio-reconnaissance.

E-mail: levandongx93@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2339-0799>