

Применение беспроводной сенсорной системы для охраны объектов с использованием датчиков инфракрасного излучения

В.И. Парфенов^{1,2}, В.Д. Ле¹

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Воронежский государственный университет»,

394006, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1,

² Воронежский институт МВД России,

394065, Россия, г. Воронеж, проспект Патриотов, д. 53

Аннотация

В работе был рассмотрен алгоритм, выносящий решение о наличии или отсутствии проникновения на охраняемый объект на основе данных, получаемых датчиками инфракрасного излучения, входящими в беспроводную сенсорную систему. На основе теоретических положений приведены методики расчета ослабления средой инфракрасного излучения, в том числе ослабления за счет молекулярных газов и аэрозольного ослабления. Показаны особенности влияния окружающей среды на функционирование локальных тепловых сенсоров. Также рассмотрены особенности характеристик помехоустойчивости канала радиосвязи с учетом замираний. С целью анализа влияния среды на эффективность всей системы приведены зависимости полной вероятности ошибки от энергетического параметра как с учетом ослабления инфракрасного излучения средой на уровне локальных сенсоров, так и с учетом замираний в канале радиосвязи. Кроме того, приведена зависимость полной вероятности ошибки от дистанции связи под влиянием замираний. Выполнен анализ полученных результатов и оценена степень влияния среды распространения на качество функционирования беспроводной сенсорной системы теплового вида. При этом показано, что сложные метеоусловия могут оказать существенное влияние на эффективность функционирования локальных сенсоров, а следовательно, и всей системы. Однако, несмотря на возможное существенное ухудшение эффективности ослабления инфракрасного излучения, а также замираний в канале радиосвязи, эффективность может быть повышена за счет увеличения количества используемых сенсоров.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные системы, сенсоры, вероятности ошибок, поглощение, замирание сигнала, инфракрасное излучение, аэрозоль, атмосферное пропускание.

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

Citation: Parfenov VI, Le VD. Application of a wireless sensor system for object protection using infrared sensors. Computer Optics 2021; 45(3): 364-371. DOI: 10.18287/2412-6179-788.

Введение

В настоящее время в рамках развития радиотехнических систем различного назначения особое внимание уделяется разработке и применению инновационных технологий, в том числе беспроводных сенсорных систем. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) – это распределённая, самоорганизующаяся сеть множества датчиков (сенсоров), предназначенных для отслеживания физических природных или искусственных явлений или условий окружающей среды, а также исполнительных устройств, объединённых между собой радиоканалом [1]. Благодаря своей высокой гибкости, расширенному охвату наблюдения, надежности, мобильности и энергетической эффективности, БСС находят широкое применение в разных сферах деятельности (промышленность, транспорт, робототехника, жилищно-коммунальное хозяйство, охрана и пр.) [2]. Можно выделить три основные составляющие БСС: локальные сенсоры, канал передачи

данных и центральный узел обработки информации, каждый из которых решает свои задачи. Функционирование любого вида БСС основывается на том, что каждый локальный узел содержит не только измерительный сенсор, но и встроенный передатчик, который передаёт информацию через канал связи об интересующих объектах в центральный узел (ЦУ), в котором реализуется комплексирование принятых данных и выносится окончательное решение. Следовательно, важной научной и практической задачей является синтез и анализ эффективности комплексного алгоритма обработки получаемых данных от множества измерительных сенсоров с учетом влияния двух имеющихся в подобной системе каналов передачи информации, а именно: имеющегося ослабления в канале передачи инфракрасного излучения (при использовании соответствующих датчиков), а также замираний в канале радиосвязи «сенсор–ЦУ».

В целях обеспечения безопасности охраняемого объекта, мониторинга окружающей среды примером

подобной БСС может служить распределённая система охраны, в которой решения о наличии или отсутствии проникновения на охраняемые объекты могут выноситься одновременно несколькими сенсорами на основе имеющегося определённого алгоритма обнаружения. Эти решения преобразуются в электрический сигнал, модулируются и далее по радиоканалу передаются в 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 для повышения эффективности по сравнению с эффективностью отдельного локального сенсора. Виды применяемых сенсоров весьма разнообразны. В частности, к ним относятся вибрационные, тепловые, звуковые и пр. типы сенсоров, функционирование которых основывается на соответствующих физических явлениях: вибрационном, тепловом, звуковом и пр. видах излучений. При использовании таких сенсоров необходимо учитывать влияние окружающей среды. При этом каждый из них имеет свои особенности функционирования. В связи с этим цель данной статьи заключалась в синтезе и анализе эффективности алгоритма обнаружения несанкционированного проникновения на охраняемый объект в беспроводной сенсорной системе теплового вида с учетом влияния окружающей среды как на локальные сенсоры, так и на канал радиосвязи.

1. Основные теоретические положения распространения теплового излучения

При распространении электромагнитного излучения в вакууме его интенсивность не изменяется. В реальных средах (в частности, в атмосфере) происходят различные процессы взаимодействия излучения со средой, приводящие к изменению его интенсивности. Основными механизмами взаимодействия излучения со средой являются: ослабление, рассеяние, поглощение, отражение и преломление (рефракция). Все эти явления в конечном итоге приводят к ослаблению интенсивности излучения. Для количественной характеристики меры ослабления излучения в среде используется объёмный коэффициент ослабления [3]:

$$\mu = \sigma + \kappa, \tag{1}$$

где σ и κ – объёмные коэффициенты рассеяния и поглощения соответственно.

Известно, что на основе восприятия теплового излучения энергия полученного электрического сигнала в измерительном устройстве сенсора пропорциональна порции излучаемой тепловой энергии от источника. С учетом ослабления среды можно записать следующее выражение для интенсивности принимаемого монохроматического излучения в открытом пространстве в соответствии с законом Бугера [3]

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu \cdot d), \tag{2}$$

где I_0 – интенсивность излучения на нулевом расстоянии; μ – объёмный коэффициент ослабления; d – длина трассы распространения.

Однако при расчетах изменения энергии излучения в атмосфере обычно еще используют понятие коэффициента пропускания τ , который равен экспоненциальной компоненте $\exp(-\mu \cdot d)$. Следовательно, можно переписать формулу (2) в следующем виде:

$$I = I_0 \cdot \tau. \tag{3}$$

Рассмотрим имеющиеся особенности распространения инфракрасного (ИК) излучения в свободном пространстве. При условии распространения ИК-излучения у поверхности Земли нужно учитывать следующие компоненты ослабления излучения:

- важные парниковые компоненты поглощения в атмосфере: газовые молекулы; CO; CH₄; N₂O; O₃; CO₂ и водяного пара H₂O;
- аэрозоль: дождевые капли, туман, дымка и т.д.

Практический интерес представляет применение сенсоров теплового вида в рамках задач наблюдения объектов на сравнительно небольших расстояниях и при обычных нормальных условиях на поверхности Земли. С учетом пренебрежительно малого ослабления, обусловленного молекулами CO, CH₄, N₂O и O₃, общий коэффициент ослабления можно определить из следующего выражения [3, 4]:

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_n + \kappa_a, \tag{4}$$

где σ_c и σ_n – коэффициенты поглощения молекулами CO₂ и H₂O соответственно; κ_a – коэффициент аэрозольного рассеяния.

Литература, посвященная различным моделям поглощения излучения водяным паром и углекислым газом, весьма обширна. Практический интерес представляют рассчитанные на компьютере таблицы коэффициента поглощения этими газами. Среди них широко применяются таблицы Пассмана и Лармора в практических задачах расчета атмосферного пропускания излучения [3, 5, 6]. В данных таблицах приведены спектральные коэффициенты пропускания излучения для водяного пара на уровне моря, рассчитанные для количества (толщины) осаждаемой воды, обозначаемого ω [мм], меняющейся от 0,1 до 1000 мм, и области частот 0,3...13,9 мкм с шагом $\Delta\lambda = 1$ мкм, и аналогичная таблица для углекислого газа, в которой спектральные коэффициенты пропускания приведены для трассы длиной от 0,1 до 1000 км. При этом количество осаждаемой воды является одной из характеристик условий поглощения водяным паром на трассе, которая может быть рассчитана по формуле

$$\omega = \omega_0 \cdot \rho \cdot d, \tag{5}$$

где d – длина трассы [км], ω_0 – толщина осаждаемой воды на длине 1 км при влажности воздуха 100%, ρ – относительная влажность [%]. Значения толщины осаждаемой воды ω_0 при различных температурах бе-

путся из [5]. Например, при температуре $t = 25^{\circ}\text{C}$ толщина осажденной воды $\omega_0 = 25,03$ мм/км, а при $t = 30^{\circ}\text{C} - \omega_0 = 30,09$ мм/км.

Важно отметить, что значения коэффициента пропускания излучения углекислым газом в таблице Пассмана и Лармора были рассчитаны для концентрации углекислого газа, равной 0,032 % атмосферы. Поэтому с учетом увеличения концентрации углекислого газа вводят следующую поправку:

$$d_{\text{экв}} = \frac{\eta}{0,032} \cdot d, \tag{6}$$

где η [%] – процентная объёмная концентрация углекислого газа в атмосфере, $d_{\text{экв}}$ – эквивалентная длина трассы, соответствующая текущей длине трассы d .

На основе приведённых рассуждений путем интерполяции в табл. 1 и 2 соответственно приведены следующие значения для коэффициентов пропускания излучения водяным паром и углекислым газом для разных частот и условий среды (температура воздуха равна $t = 20^{\circ}\text{C}$, атмосферное давление – 1 атм).

Табл. 1. Коэффициенты пропускания ИК-излучения водяным паром

Длина волны λ , мкм	Длина трассы d , м	Влажность ρ , %	Толщина водяного пара ω , мм	Коэффициент пропускания водяного пара τ_{H}
8	100	80	1,386	0,933
	200		2,771	0,868
	500		6,928	0,736
10	200	30	1,039	0,988
		50	1,732	0,979
		80	2,771	0,963
13,8	200	80	2,771	0,938

Табл. 2. Коэффициенты пропускания ИК-излучения углекислым газом

Длина волны λ , мкм	Длина трассы d , м	Концентрация углекислого газа η , %	Коэффициент пропускания углекислого газа τ_{H}
8 (отсутствие поглощения)	–	0,04	1
10	<1000	0,04	1
13,8	200	0,04	0,826

Как отмечалось ранее, степень аэрозольного ослабления весьма значительна в ИК-диапазоне. Аэрозоли представляют собой очень мелкие частицы, взвешенные в атмосфере (пылинки, дымки, туманы, капли дождя, и пр.). В практике для определения коэффициентов аэрозольного рассеяния часто используют соотношение, связывающее коэффициент рассеяния с длиной волны $\kappa_a = \lambda^{-\alpha}$.

Частицы, размеры которых малы по сравнению с длиной волны, присутствуют в большом объёме на

поверхности Земли. Для таких частиц рассеяние называется рэлеевским и $\alpha = 4$. Такое рассеяние характерно для частиц типа электронов, молекул газов и пр. Их степень рассеяния очень мала и ею часто пренебрегают. Для тумана размеры частицы становятся существенно больше и α стремится к нулю. В этом случае говорят о рассеянии Ми [7], для которого коэффициент рассеяния не зависит от длины волны. Коэффициенты рассеяния для тумана могут быть вычислены на основе экспериментального определения метеорологической дальности видимости S_d [км]. В видимой области коэффициент рассеяния κ_a равен

$$\kappa_a = 3,92/S_d. \tag{7}$$

Для коэффициента рассеяния соотношение, связывающее его с длиной волны в этом случае, можно записать в следующем виде:

$$\kappa_a = \kappa_{a0} \cdot (\lambda_0/\lambda)^\alpha, \tag{8}$$

где κ_{a0} – опорный коэффициент рассеяния, соответствующий длине волны λ_0 .

Для дымки, размеры которой меньше частиц тумана, коэффициент рассеяния определяется аналогично на основе формул (7) и (8) со значением $\alpha = 1,3$.

Существенное влияние аэрозольных частиц на прохождение ИК-излучения связывают с наличием капель дождя в воздухе, которые велики по сравнению с длиной волны, и поэтому $\alpha = 0$. В этом случае коэффициент рассеяния не зависит от длины волны и рассеяние называется неселективным. Коэффициент рассеяния для капель дождя можно рассчитать по формуле Миддлтона [3]:

$$\kappa_a = 1,25 \cdot 10^{-6} \cdot (J/r^3), \tag{9}$$

где J – сила дождя в единице см/с, r [см] – радиус капель дождя.

В результате коэффициент пропускания за счет аэрозольного рассеяния запишется в виде

$$\tau_a = e^{-\kappa_a \cdot d}. \tag{10}$$

Для анализа степени влияния среды распространения на функционирование локальных сенсоров теплового вида в табл. 3 и 4 приведены коэффициенты пропускания за счет аэрозольного рассеяния. При вычислении коэффициентов пропускания излучения, определяемого рассеянием, предполагается, что метеорологическая дальность измерена при длине волны $\lambda_0 = 0,6$ мкм.

2. Особенности влияния среды распространения в канале радиосвязи

Как показано выше, при синтезе алгоритма обработки информации в БСС необходимо также учитывать свойства радиоканала между локальными сенсорами и ЦУ. Действительно, существенное влияние на распространение радиоволн могут оказывать такие

явления, как поглощение, дифракция, отражение, рассеяние и пр., которые в конечном итоге приводят к ослаблению напряженности поля. Кроме того, подобные явления также могут привести к случайному из-

менению амплитуды сигнала на входе приемника, к так называемым замираниям. В связи с этим важным представляется анализ влияния характеристик канала радиосвязи на принимаемый сигнал.

Табл. 3. Коэффициенты пропускания ИК-излучения за счет тумана и дымки

Длина волны λ , мкм	Длина трассы d , м	Метеоусловия	Дальность видимости S_d , км	Коэффициент пропускания τ_a
8	100	слабая дымка	10	0,999
	200			0,997
	500			0,993
10	200	слабая дымка	10	0,998
		слабый туман	1	0,457
		умеренный туман	0,5	0,208
13,8	200	слабая дымка	10	0,999

Табл. 4. Коэффициенты пропускания ИК-излучения за счет дождя

Длина трассы d , м	Метеоусловия	Радиус капли дождя r , см	Сила дождя J , см/час	Коэффициент пропускания τ_a
100	средний дождь	0,065	1,25	0,984
200				0,969
500				0,924
200	слабый дождь	0,05	0,25	0,986
	сильный дождь	0,07	2,5	0,951

Согласно модели Ли, наиболее адекватная для диапазона частот 10–2000 МГц средняя мощность сигнала на входе приемника может быть определена из выражения [8]

$$P_{np} = P_0 \cdot \left(\frac{l}{l_0}\right)^{-\gamma} \cdot \left(\frac{f}{f_c}\right)^{-n} \cdot F, \tag{11}$$

где P_0 – эталонная мощность, измеренная на расстоянии $l_0 = 1$ км, для сигнала с несущей частотой f_c ; γ и n – показатели, обозначающие степень зависимости мощности принимаемого сигнала от дистанции связи l и частоты сигнала f соответственно;

$$F = \prod_{i=1}^5 F_i -$$

поправочный коэффициент, вычисляемый на основе компонентных множителей. Данные множители можно вычислить по известным следующим выражениям:

$$F_1 = \frac{h_{п,эф}^2}{30,48}, \quad F_2 = \frac{h_{np}^k}{3}, \quad F_3 = \frac{P_c}{10}, \tag{12}$$

$$F_4 = \frac{G_c}{4}, \quad F_5 = \frac{G_{np}}{4},$$

где $h_{п,эф}$ [м] – эффективная высота антенны передатчика локального сенсора; k – показатель степени: при высоте антенны приемника менее 3 м принимается $k = 1$, при высоте более 10 м – $k = 2$; P_c [Вт] – передаваемая мощность сигнала; G_c, G_{np} – коэффициенты усиления антенны передатчика и приемника соответственно относительно полуволнового вибратора.

Значения показателя степени n для частот от 30 МГц до 2 ГГц и расстояний между сенсорами и ЦУ от 2 до 30 км лежат в диапазоне от 2 до 3. Величина n также зависит от топографических особенностей местности. Для пригородных и сельских районов рекомендуется выбирать $n = 2$ при частотах ниже 450 МГц и $n = 3$ при частотах выше 450 МГц. Показатель γ показывает степень зависимости мощности принимаемого сигнала от расстояния связи. Значение γ также зависит от топографических особенностей местности. Для свободного пространства $\gamma = 2$, при городской застройке γ становится больше (например, для Токио $\gamma = 3,05$ и Филадельфии $\gamma = 3,68$).

Как уже отмечалось ранее, замирание сигнала вызывается явлениями поглощения, дифракции, отражения, рассеяния и пр. При этом в зависимости от среды распространения применяются различные модели затухания и замирания. Задача приема сигнала в

этих условиях обычно трансформируется в типичную задачу обнаружения сигнала со случайными амплитудой и начальной фазой. Чаще других на практике для плотной городской застройки плотность вероятности распределения огибающей сигнала определяется по формуле Рэлея

$$p(U) = \frac{U}{\sigma_U^2} \cdot \exp\left[-\frac{U^2}{2\sigma_U^2}\right], \quad (13)$$

где σ_U^2 – дисперсия, характеризующая интенсивность флуктуаций.

Следует отметить, что модель Рэлея не является единственной. Так, в результате эффекта радиозатенения от зданий, гор, холмов и прочих объектов, которые вызывают процесс медленных замираний, часто применяется логнормальная модель замирания. При условии наличия мощной компоненты сигнала либо присутствия линии прямой видимости плотность распределения огибающей сигнала подчиняется закону Райса [8] и т.д.

Что касается начальной фазы, то вследствие замираний принято, что фаза принимаемого сигнала равномерно распределена на интервале $[-\pi; \pi]$. Таким образом, модель распространения совместно с моделью замирания позволяет выполнить синтез алгоритма обработки радиосигнала на выходе канала связи «сенсор – ЦУ».

Алгоритм обнаружения сигналов с учетом замираний основан на формировании функционала отношения правдоподобия [9]. Для случая рэлеевской модели замираний можно определить характеристики эффективности обнаружения сигнала, в частности, вероятность правильного обнаружения можно рассчитывать по следующей формуле [9]:

$$P_D = P_F^{1/(1+q^2/2)}, \quad (14)$$

где P_F – вероятность ложной тревоги, $q = \sqrt{2E/N_0}$ – отношение сигнал/шум, E – энергия сигнала с единичной амплитудой, N_0 – двусторонняя спектральная плотность мощности шума.

3. Эффективность алгоритма обнаружения беспроводной сенсорной системой с учетом влияния среды

В [10–12] показано, каким образом в БСС на основе алгоритма комплексирования информации в ЦУ может выноситься окончательное решение о наличии или отсутствии цели. В соответствии с результатами, полученными в [10, 11], можно записать выражение для отношения правдоподобия в следующем виде:

$$M = \sum_{i=1}^K C_i(U_i)U_i, \quad (15)$$

$$C_i(U_i) = \begin{cases} C1_i = \ln(\varphi_i^{(1)}/\varphi_i^{(0)}), & \text{если } U_i = 1, \\ C2_i = \ln((1-\varphi_i^{(0)})/(1-\varphi_i^{(1)})), & \text{если } U_i = -1, \end{cases}$$

где U_i – решение, выносимое центральным узлом в результате обработки сигнала, пришедшего от i -го сенсора ($U_i=1$, если в ЦУ принято, что цель обнаружена в i -м сенсоре, и $U_i=-1$ – в противном случае), $\varphi_i^{(0)} = \alpha_i(1-B_i) + (1-\alpha_i)A_i$ и $\varphi_i^{(1)} = (1-\beta_i)(1-B_i) + \beta_i A_i$.

Здесь α_i и β_i – характеристики эффективности обнаружения локальным сенсором, т.е. вероятности ложной тревоги и пропуска цели соответственно; A_i и B_i – вероятности ошибок первого и второго рода в канале радиосвязи. В случае энергетического обнаружения в i -м локальном сенсоре (при расстоянии d_i от i -го сенсора до цели) эти вероятности можно найти в соответствии со следующими выражениями:

$$\alpha_i = 1 - \Phi(H), \quad \beta_i = 1 - \Phi(H - Z(d_i)), \quad (16)$$

где

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

интеграл вероятности,

$$Z(d_i) = \sqrt{\frac{2E(d_i)}{N_0}} -$$

отношение сигнал/шум, H – порог обнаружения. С учетом формулы (3) можно записать выражение для отношения сигнал/шум для i -го локального сенсора в сокращенном виде как

$$Z(d_i) = \sqrt{q_0^2 \cdot \tau(d_i)}, \quad (17)$$

где q_0 – отношение сигнал/шум (ОСШ) при нулевом расстоянии.

Как уже отмечалось ранее, если используется рэлеевская модель замирания сигнала, то вероятности ошибок первого и второго рода для канала связи A_i и B_i могут быть определены аналогично формуле (14), т.е.

$$B_i = 1 - A_i^{1/(1+q_i^2/2)}, \quad (18)$$

где q_i' – отношение сигнал/шум, которое с учетом соотношения (11) можно определить как $q_i' = q_0' \sqrt{l_i^{-\gamma}}$, при этом q_0' – ОСШ в канале радиосвязи от i -го сенсора до ЦУ при опорном расстоянии $l_0 = 1$ км для определённой частоты передаваемого сигнала f_c и известных характеристиках передатчика и приемника. Кроме того, для определённости предполагается, что показатель $\gamma = 2,5$.

Вероятности ошибок в отсутствие полезных сигналов α_i и A_i часто предполагаются заданными. Кроме того, для анализа влияния окружающей среды на эффективность системы предполагалось, что локальные сенсоры располагаются на одинаковых расстояниях до цели и дистанция связи от каждого сенсора до ЦУ также одинакова. Для характеристики эффективности принятия решения всей системой выберем критерий минимума полной вероятности ошибки $P_{\Sigma \min} = \min(A_{\Sigma} + B_{\Sigma})/2$, достигаемого при определённом

ном 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 [10; 11] как

$$A_\Sigma = 1 - \Psi_K^{(0)}(h^*), \quad B_\Sigma = \Psi_K^{(1)}(h^*), \quad (19)$$

$$\Psi_K^{(i)}(h^*) = \varphi_k^{(i)} \cdot \Psi_{k-1}^{(i)}(h^* - C1_k) + (1 - \varphi_k^{(i)}) \cdot \Psi_{k-1}^{(i)}(h^* + C2_k), \quad (20)$$

причем $i=0$ или 1 ; $k=1, \dots, K$; $\Psi_0^{(i)}(h^*) = \sigma(h^*)$, где $\sigma(\cdot)$ – функция единичного скачка.

В соответствии с вышеизложенным, предположим, что вероятности ложной тревоги для всех сенсоров одинаковы: $\alpha_i = 0,1$. Кроме того, предположим, что вероятности ошибок первого и второго рода для всех радиоканалов одинаковы и равны $A_i = 0,01$, $B_i = 0,01$. При расчетах использовались данные, приведенные в табл. 1–4. Полученные результаты расчетов представлены на рис. 1–4 в виде зависимостей полной вероятности ошибки от энергетического параметра ОСШ q_0 в различных условиях.

На рис. 1 представлены результаты вычисления зависимости полной вероятности ошибки от энергетического параметра (ОСШ q_0) при количестве сенсоров $K=5$ и $K=7$ для случая длины излучения $\lambda = 10$ мкм и расстояния от сенсоров до цели $d = 200$ м при различных метеоусловиях: сильный дождь, слабый туман и умеренный туман.

Из рис. 1 следует, что среда распространения существенно влияет на эффективность принятия решения всей системой. Наибольшую степень влияния на эффективность системы оказывает среда с умеренным туманом (изображена кривыми с квадратиками). Действительно, при наличии умеренного тумана на уровне локального сенсора ИК-излучение наиболее сильно поглощается средой (см. табл. 3), что приводит к ухудшению эффективности принятия решения как одиночным сенсором, так и всей системой. В случае слабого тумана (изображена кривыми с треугольниками) и сильного дождя (изображена кривыми с окружностями) с ростом энергетического параметра q_0 (ОСШ) полная вероятность ошибки быстро уменьшается и достигает предельного значения (увеличение параметра q_0 , большего 5–7, практически не способствует повышению эффективности обнаружения). Однако в среде с туманом (даже со слабым туманом) эффективность принятия системой хуже, чем при наличии дождя в среде. Кроме того, с ростом количества сенсоров полная вероятность ошибки уменьшается. Так, например, в слабом тумане или при сильном дожде незначительное увеличение числа используемых сенсоров (с пяти до семи) приводит к уменьшению полной вероятности ошибки почти на порядок.

На рис. 2 приведена зависимость полной вероятности ошибки от ОСШ q_0 для случая длины излучения $\lambda = 8$ мкм и разных расстояний от сенсоров

до цели при влажности воздуха 80% и наличии слабой дымки.

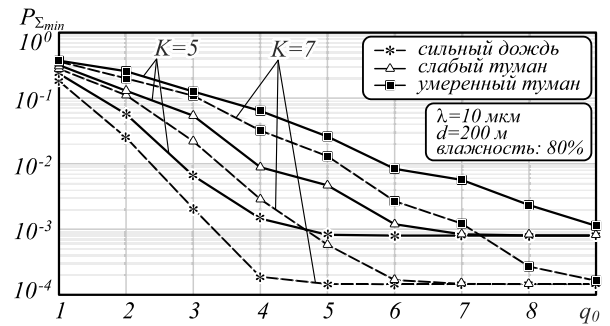


Рис. 1. Зависимость полной вероятности ошибки от энергетического параметра ОСШ q_0 для различных метеоусловий

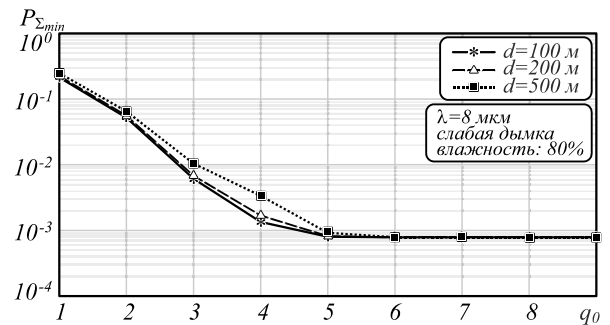


Рис. 2. Зависимость полной вероятности ошибки от энергетического параметра ОСШ q_0 для разных расстояний от сенсоров до цели

Из анализа рис. 2 следует, что при увеличении расстояния от сенсоров до цели эффективность системы ухудшается, однако незначительно, что характерно для данной частоты ИК-излучения и при небольших расстояниях (сотни метров). Следовательно, с целью обеспечения заданной эффективности обнаружения, места расположения сенсоров необходимо размещать на не очень больших расстояниях до цели.

На рис. 3 приведена зависимость полной вероятности ошибки от энергетического параметра ОСШ q_0 для разных длин волны излучения в предположении, что количество сенсоров $K=5$, расстояние до цели $d=200$ м и метеоусловия соответствуют условиям, приведенным на рис. 2.

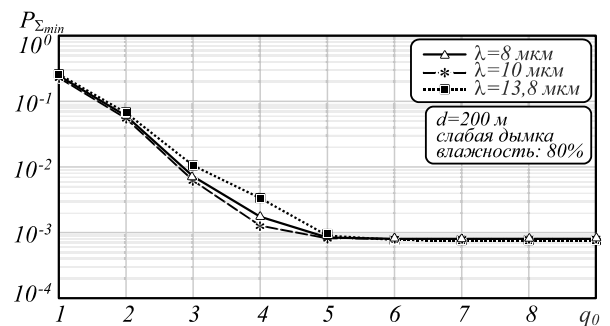


Рис. 3. Зависимость полной вероятности ошибки от энергетического параметра ОСШ q_0 для разных длин волн излучения

Из рис. 3 следует, что для рассматриваемого диапазона длин волн излучения эффективность системы практически не меняется. Единственное, что следует отметить: при длине волны ИК-излучения $\lambda = 13,8$ мкм (кривые с квадратиками) эффективность системы (при не очень больших значениях ОСШ) становится несколько хуже, чем при остальных длинах волн, так как при данной длине волны поглощение ИК-излучения, обусловленное углекислым газом, происходит в большей степени (см. также табл. 1).

С целью анализа влияния среды в канале радиосвязи на эффективность всей системы с учетом рэлеевского замирания и для упрощения предполагалось, что на уровне локальных сенсоров цель находится на расстоянии $d = 200$ м, длина волны ИК-излучения $\lambda = 10$ мкм, энергетический параметр $q_0 = 5$, влажность воздуха равна 80 %, наличествует умеренный туман. Результаты расчетов полной вероятности ошибки в этих условиях представлены на рис. 4–5.

На рис. 4 приведена зависимость полной вероятности ошибки от энергетического параметра q'_0 для рэлеевского замирания (изображена сплошными кривыми) и для детерминированного сигнала, т.е. при отсутствии замирания (изображена пунктирными кривыми), а на рис. 5 приведена зависимость полной вероятности ошибки от дистанции связи l для разного количества сенсоров с учетом рэлеевского замирания.

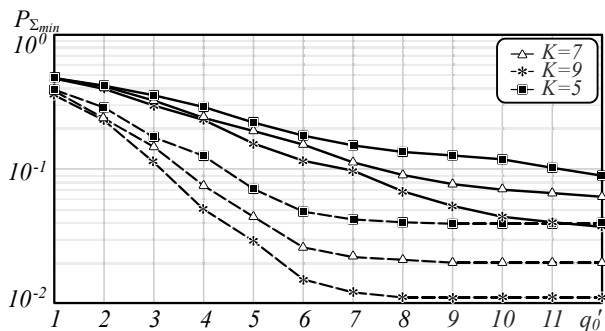


Рис. 4. Зависимость полной вероятности ошибки от энергетического параметра ОСШ q'_0 для разного количества сенсоров с учётом замирания (сплошные кривые) и отсутствия замирания (пунктирные кривые)

Из анализа результатов, приведённых на рис. 4, следует, что замирание в канале связи существенно ухудшает эффективность системы. Даже существенное увеличение ОСШ q'_0 не сильно способствует увеличению эффективности обнаружения. В случае отсутствия замираний (пунктирные линии) с ростом энергетического параметра q'_0 полная вероятность ошибки быстро уменьшается и достигает предельного значения, которое не изменяется даже при увеличении q'_0 . Таким образом, замирания приводят к потерям в ОСШ, что приводит к необходимости соответствующего увеличения мощности передатчика или использования известных методов борьбы с замираниями, в частности, методов разнесённого приема [9].

Из рис. 5 следует, что при увеличении дистанции связи эффективность системы ухудшается. С ростом расстояния между сенсором и ЦУ потери в мощности полезного сигнала растут, что приводит к ухудшению эффективности обнаружения. Поэтому размещение сенсоров на расстоянии до ЦУ, превышающем 1 км, нецелесообразно. Действительно, на дистанциях, не превышающих 1 км, полная вероятность ошибки не превышает 0,1 при всех рассмотренных в статье параметрах, в частности, при количестве сенсоров больше пяти, что является вполне достаточным для многих приложений. Приведенные данные при необходимости можно также использовать для более точного определения размеров сети и границ ее работоспособности при задании ограничений на вероятностные характеристики.

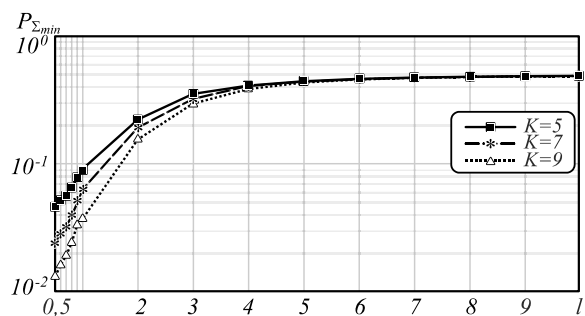


Рис. 5. Зависимость полной вероятности ошибки от дистанции связи l для разного количества сенсоров с учётом рэлеевского замирания

Заключение

В данной работе был рассмотрен алгоритм коммутации информации в беспроводных сенсорных системах с учетом особенности окружающей среды для решения задачи обнаружения цели на основе его инфракрасного излучения. В частности, для приведённых значений частоты ИК-излучения были получены результаты, позволяющие оценить степень влияния среды как на эффективность функционирования отдельных составляющих элементов БСС (локальных сенсоров и канала радиосвязи), так и на эффективность принятия решения всей системой.

Необходимо отметить, что все технические устройства, приборы, функциональный алгоритм которых основывается на тепловом излучении, работают именно в определённой области частот, в так называемых «окнах прозрачности» [17]. В настоящее время существуют различные модели, позволяющие выполнить расчеты пропускания ИК-излучения в атмосфере [13–16]. Однако в данной работе в связи с небольшими расстояниями между сенсорами и наблюдаемым объектом представленные методики расчетов коэффициентов поглощения или пропускания ИК-излучения требуют значительно меньшего объема вычислений, обеспечивая при этом требуемую точность, что является принципиально важным в динамически изменяющихся условиях наблюдений.

Литература

1. **Урманов, Д.М.** Беспроводные сенсорные системы для обеспечения безопасности подвижных и неподвижных объектов / Д.М. Урманов, О.И. Болдова // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2013. – № 3(125). – С. 128-134.
2. **Sohraby, K.** Wireless sensor networks: Technology, protocols, and applications / K. Sohraby, D. Minoli, T. Znati. – Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. – 236 p. – ISBN: 978-0-471-74300-2.
3. **Белоусов, Ю.И.** Инфракрасная фотоника. Часть I. Особенности формирования и распространения ИК излучения : учебное пособие / Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 82 с.
4. **Смирнов, Б.М.** Инфракрасное излучение в энергетике атмосферы / Б.М. Смирнов // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57, № 4. – С. 609-633. – DOI: 10.1134/S0040364419040197.
5. Справочник по основам инфракрасной техники / под ред. Л.З. Криксунова. – М.: Советское радио, 1978. – 400 с.
6. **Алехин, С.Г.** Метод расчета коэффициента прозрачности атмосферы для тепловизионных систем в спектральном диапазоне 8-12 мкм / С.Г. Алехин, И.А. Готюр, В.В. Семенов // Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2019. – № 668. – С. 117-128.
7. **Тимофеев, Ю.М.** Теоретические основы атмосферной оптики / Ю.М. Тимофеев, А.В. Васильев. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
8. **Дикрин, Д.Е.** Сети и системы телекоммуникации : курс лекций / Д.Е. Дикрин. – Казань: Казанский университет, 2013. – 146 с.
9. **Сидельников, Г.М.** Статистическая теория радиотехнических систем : учебное пособие / Г.М. Сидельников, А.А. Макаров. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникации и информатики, 2015. – 194 с.
10. **Парфенов, В.И.** Алгоритмы комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом вероятности выхода сенсоров из строя / В.И. Парфенов, В.Д. Ле // Радиотехника. – 2019. – № 12(19). – С. 53-59. – DOI: 10.18127/j00338486-201912(19)-06.
11. **Парфенов, В.И.** Оптимальный алгоритм комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом влияния помех в канале радиосвязи / В.И. Парфенов, В.Д. Ле // Телекоммуникации. – 2020. – № 2. – С. 12-17.
12. **Sriranga, N.** Energy-efficient decision fusion for distributed detection in wireless sensor networks / N. Sriranga, G. Nagananda, R.S. Blum, A. Saucan, P.K. Varshney // Proceeding IEEE International Conference on Information Fusion (FUSION). – 2018. – P. 1541-1547. – DOI: 10.23919/ICIF.2018.8454976.
13. Спектроскопия атмосферных газов [Электронный ресурс]. – URL: <http://spectra.iao.ru/home.overview> (дата обращения 18.07.2020).
14. **Михайленко, С.Н.** Информационно-вычислительная система «Спектроскопия атмосферных газов». Структура и основные функции / С.Н. Михайленко, Ю.Л. Бабинов, В.Ф. Головкин // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18, № 9. – С. 765-776.
15. **Clough, S.A.** Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes / S.A. Clough, M.W. Shephard, E.J. Mlawer, J.S. Delamere, M.J. Iacono, K. Cady-Pereira, S. Boukabara, P.D. Brown // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. – 2005. – Vol. 91, Issue 2. – P. 233-244. – DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.
16. **Mlawer, E.J.** Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption / E.J. Mlawer, V.H. Payne, J.-L. Moncet, J.S. Delamere, M.J. Alvarado, D.D. Tobin // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2012. – Vol. 370, Issue 1968. – P. 2520-2556. – DOI: 10.1098/rsta.2011.0295.
17. **Владимиров, В.М.** Оптическая система для дистанционного зондирования в УФ-, видимом и ближнем ИК-диапазонах / В.М. Владимиров, В.А. Юксеев, Е.Г. Лапухин // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 2. – С. 195-202. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-611.

Сведения об авторах

Парфенов Владимир Иванович, 1961 года рождения, в 1983 году окончил Воронежский государственный университет по специальности «Радиофизика». Доктор физико-математических наук, профессор кафедры радиофизики ВГУ и профессор кафедры радиотехники и электроники Воронежского института МВД России. Область научных интересов: применение методов статистической радиотехники к синтезу и анализу систем передачи и обработки информации. Количество опубликованных научных работ: более 190. E-mail: vip@phys.vsu.ru. ORCID: 0000-0001-9815-5657

Ле Ван Донг, 1993 года рождения, в 2018 году окончил ВУНЦ «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина». Является аспирантом кафедры радиофизики Воронежского государственного университета. Область научных интересов: применение методов статистической радиотехники к синтезу и анализу систем передачи и обработки информации, радиоразведки. E-mail: levandongx93@gmail.com. ORCID: 0000-0002-2339-0799

ГРНТИ: 28.23.15, 29.35.01.

Поступила в редакцию 25 июля 2020 г. Окончательный вариант – 23 октября 2020 г.

Application of a wireless sensor system for object protection using infrared sensors

V.I. Parfenov^{1,2}, V.D. Le¹

¹ Voronezh State University,

394006, Russia, Voronezh, Universitetskaya pl. 1,

² Voronezh Institute of the Ministry of Home Affairs of Russia,

394065, Russia, Voronezh, prospect Patriotov, 53

Abstract

In this work, an algorithm that makes decisions on whether or not an object under protection has been penetrated based on data from infrared (IR) sensors included in a wireless sensor system is considered. Based on theoretical considerations, methods for calculating the attenuation of infrared radiation by the medium, including attenuation due to molecular gases and aerosol attenuation, are presented. Peculiarities of the external environment impact on the functioning of local heat sensors are shown. Also, peculiarities of the noise immunity characteristics of a radio communication channel are considered with due regard for signal fading. With the purpose of analyzing the environment impact on the efficiency of the entire system, we present dependencies of the total error probability on the energy parameter, taking into account the attenuation of infrared radiation in both the environment at the level of local sensors and the radio communication channel. In addition, a dependence of the total error probability on the communication distance under the influence of fading is presented. The results arrived at are analyzed and the degree of influence of the environment on the quality of functioning of the wireless sensor system of thermal type is evaluated. It is shown that adverse weather conditions can have a significant impact on the efficiency of local sensors, and, hence the entire system. However, despite the possible significant deterioration in efficiency due to the IR signal attenuation in the medium and in the radio channel, the efficiency can be increased by increasing the number of sensors used.

Keywords: wireless sensor networks (WSN), sensor, error probability, absorption, signal fading, infrared radiation, aerosols, atmospheric transmittance.

Citation: Parfenov VI, Le VD. Application of a wireless sensor system for object protection using infrared sensors. *Computer Optics* 2021; 45(3): 364-371. DOI: 10.18287/2412-6179-788.

References

- [1] Urmanov DM, Boldova OI. Wireless sensor systems for security of moving and stationary objects [In Russian]. *Electronics: Science, Technology, Business* 2013; 3(125): 128-134.
 - [2] Sohraby K, Minoli D, Znati T. *Wireless sensor networks: technology, protocols, and application*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons Inc; 2007. ISBN: 978-0-471-74300-2.
 - [3] Belousov YI, Postnikov ES. *Infrared Photonics. Part I. Features of formation and propagation of infrared radiation* [In Russian]. Saint-Petersburg: ITMO University Publisher; 2019.
 - [4] Smirnov BM. Infrared radiation in the energy of the atmosphere. *High temperature* 2019; 57(4): 573-595. DOI: 10.1134/S0018151X19040199.
 - [5] Kriksunov LZ, ed. *Reference book to the basics of infrared technology* [In Russian]. Moscow: "Soviet Radio" Publisher; 1978.
 - [6] Alekhin, SG, Gotyur IA, Semenov VV. Method of the calculating atmospheric transparency coefficient for thermal imaging systems in the spectral range 8-12 μm [In Russian]. *Proceedings of the Military Space Academy Named after AF Mozhaisky* 2019; 668: 117-128.
 - [7] Timofeev YM, Vasiliev AV. *Theoretical fundamentals of atmospheric optics* [In Russian]. Saint-Petersburg: "Nauka" Publisher; 2003.
 - [8] Dikrin DE. *Networks and telecommunications systems: a course of lectures* [In Russian]. Kazan: Kazan University Publisher; 2013.
 - [9] Sidelnikov GM, Makarov AA. *Statistical theory of radio engineering systems* [In Russian]. Novosibirsk: Siberian State University of Telecommunications and Informatics Publisher; 2015.
 - [10] Parfenov VI, Le VD. Algorithms of information aggregation in wireless sensor networks taking into account probability of sensors failure [In Russian]. *Radioengineering* 2019; 12(19): 53-59. DOI: 10.18127/j00338486-201912(19)-06.
 - [11] Parfenov VI, Le VD. The optimal algorithm of aggregation of information in wireless sensor networks taking into account the influence of interference in the radio channel [In Russian]. *Telecommunications* 2020; 2: 12-17.
 - [12] Sriranga N, Nagananda G, Blum RS, Saucan A, Varshney PK. Energy-efficient decision fusion for distributed detection in wireless sensor networks. *Proceeding IEEE International Conference on Information Fusion (FUSION) 2018*: 1541-1547. DOI: 10.23919/ICIF.2018.8454976.
 - [13] *Spectroscopy of atmospheric gases* [In Russian]. Source: (<http://spectra.iao.ru/home.overview>).
 - [14] Mikhailenko SN, Babikov YuL, Golovko VF. Information-calculating system Spectroscopy of Atmospheric Gases. The structure and main functions. *Atmos Oceanic Opt* 2005; 18(09): 685-695.
 - [15] Clough SA, Shephard MW, Mlawer EJ, Delamere JS, Iacono MJ, Cady-Pereira K, Boukabara S, Brown PD. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes. *J Quant Spectrosc Radiat Transf* 2005; 91(2): 233-244. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2004.05.058.
-

[16] Mlawer EJ, Payne VH, Moncet J-L, Delamere JS, Alvarado MJ, Tobin DD. Development and recent evaluation of the MT_CKD model of continuum absorption. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci* 2012; 370(1968): 2520-2556. DOI: 10.1098/rsta.2011.0295.

[17] Vladimirov VM, Yukseev VA, Lapukhin EG. An optical system for remote sensing in the UV, visible, and NIR spectral ranges. *Computer Optics* 2020; 44(2): 195-202. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-611.

Authors' information

Vladimir Ivanovich Parfenov (b. 1961) graduated from Voronezh State University in 1983, majoring in Radiophysics. Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), professor of the Radiophysics department (Voronezh State University). Professor of Radiotechnics and Electronic department (Voronezh Institute of Russian Ministry of the Interior of Russia). Number of published scientific papers: more than 190. Scientific interests: application of methods of statistical radiotechnics to synthesis and analysis of information transmission and processing systems.

E-mail: vip@phys.vsu.ru.

ORCID: 0000-0001-9815-5657

Van Dong Le (b. 1993), graduated from Military Training and Research Center of the Air Force «Air Force Academy professor N.E. Zhukovskiy and Y.A. Gagarin» in 2018. Currently he is a graduate student of the Radiophysics department (Voronezh State University). Scientific interests: application of methods of statistical radiotechnics to synthesis and analysis of information transmission and processing systems; radio-reconnaissance.

E-mail: levandongx93@gmail.com.

ORCID: 0000-0002-2339-0799

Received July 25, 2020. The final version – October 23, 2020.
