

УДК 53.082.53

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБНАРУЖЕНИЯ МИКРООРГАНИЗМОВ
МЕТОДАМИ АКТИВНОЙ ИЛИ ПОЛУАКТИВНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ
ЛОКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КРИТЕРИЯ НЕЙМАНА-ПИРСОНА****Белый Вячеслав Сергеевич,**

кандидат технических наук,

доцент кафедры физики имени В.А. Фабриканта ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», г. Москва,
el.belaya2015@yandex.ru**Бабаев Джамиль Джониевич,**

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры физики имени В.А. Фабриканта ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»,
г. Москва, dzhamil.babaev.70@mail.ru**Аннотация**

В настоящей научной статье предлагается теоретический подход к решению проблемы обнаружения микроскопических объектов, удалённых на расстояние от наблюдателя, с применением методов активной и полуактивной оптической локации на основе критерия Неймана-Пирсона. В работе представлены результаты определения вероятностных характеристик процессов обнаружения микроорганизмов в оптически однородной среде, полученные расчётным методом на конкретном практическом примере, при условии, что апостериорные плотности распределения наблюдаемых значений отражённых сигналов при наличии и отсутствии объекта наблюдения в зоне оптической локации представляют собой распределения Гаусса.

Ключевые слова: оптическая локация, формула Рэлея, оптическая система, микроорганизмы, критерий Неймана-Пирсона, индикатриса рассеяния, порог обнаружения.

**THEORETICAL ASPECTS OF DETECTION OF MICROORGANISMS BY
METHODS OF ACTIVE OR SEMI-ACTIVE OPTICAL LOCATION USING
THE NEUMANN-PEARSON CRITERION****Vyacheslav S. Belyi,**

Candidate of Technical Sciences,

Associate Professor of the Department of Physics named after V.A. Fabrikant of the National
Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow**Jamil D. Babaev,**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor of the Department of Physics named after V.A. Fabrikant, Moscow

ABSTRACT

This scientific article proposes a theoretical approach to solving the problem of detecting microscopic objects distant from the observer using methods of active and semi-active optical location based on the Neumann-Pearson criterion. The paper presents the results of determining the probabilistic characteristics of the processes of detecting microorganisms in an optically homogeneous medium, obtained by the calculation method on a specific practical example, provided that the a posteriori distribution densities of the observed values of reflected signals in the presence and absence of an object of observation in the optical location zone represent Gaussian distributions.

Keywords: optical location, Rayleigh formula, optical system, microorganisms, Neumann-Pearson criterion, scattering indicatrix, detection threshold.

Введение. В настоящей научной статье предлагается теоретический подход к решению проблемы обнаружения микроскопических объектов, удалённых на расстояние от наблюдателя, с применением методов активной и полуактивной оптической локации на основе критерия Неймана-Пирсона. Целью научной статьи является исследование возможности обнаружения в оптическом диапазоне волн объекта наблюдения, имеющего микроскопические размеры, путём проверки статистической гипотезы о соответствии векторной функции наблюдаемого отражённого от объекта оптического сигнала некоторой функции правдоподобия. Данная цель достигается путём решения двух взаимосвязанных между собой научных задач:

1. Разработка алгоритма обнаружения в оптическом диапазоне волн микроскопических объектов, основу которого составляет проверка гипотезы о соответствии вектора наблюдения отражённого оптического сигнала некоторой функции правдоподобия согласно принципу максимума правдоподобия, предусматривающего процесс сравнения значения отношения функции правдоподобия с границей, представляющей собой конечное фиксированное значение функции из множества значений пространства наблюдений и разделяющее последнее на две области.

2. Построение графиков апостериорных плотностей распределения наблюдаемых значений оптических сигналов, отражённых от имеющих микроскопические размеры объектов, при наличии и отсутствии данных объектов наблюдения в зоне оптической локации.

Методическим инструментарием для проведения исследования являются положения и нормы, достаточно чётко и подробно описанные в [1, с. 582-591], [2, с. 25-30], а также [3, с. 443-451]. Данная научная методика успешно реализована в трудах [4, с. 11-16], [5, с. 182-197] и [6, с. 169-181] в ходе исследования различных процессов, в том числе и не имеющих тесной взаимосвязи с процессами обнаружения объектов методами активной и полуактивной оптической локации.

Анализ состояния вопроса. Обнаружение объекта – это процесс установления факта наличия объекта в определённой зоне поиска или обзора. Обнаружение объектов в оптическом диапазоне волн осуществляется с использованием методов и средств визуально-

оптического наблюдения. Данная задача может быть решена в видимом, инфракрасном (ИК) и ультрафиолетовом (УФ) диапазонах волн.

Видимое излучение, как носитель информации в оптической локации, характеризуется рядом свойств:

- обнаружение объекта возможно при наличии мощного внешнего источника света;
- сильная зависимость условий обнаружения от состояния атмосферы и погодных условий;
- малая проникающая способность световых лучей.

ИК излучение, в отличие от видимого излучения, обладают большей проникающей способностью и позволяет обнаруживать объекты в условиях малой освещенности.

УФ излучение обладает всеми свойствами электромагнитных волн и является невидимым без использования специальных устройств. Кроме того, данный вид излучения обладает высокой химической активностью.

Эффективность обнаружения объектов наблюдения в оптической локации зависит от следующих факторов [7, с. 11-20]:

- яркости и контрастности объекта;
- линейных и угловых размеров, а также скорости движения объекта;
- угловых размеров зоны обзора.

Яркостью объекта определяется уровень мощности полезного сигнала, который должен превышать уровень мощности помех на входе приёмника (ПРМ). Это является необходимым условием обнаружения объекта наблюдения в оптической локации. Следует отметить, что современные ПРМ оптического излучения (далее – оптические ПРМ) имеют уровень чувствительности, соответствующий мощности нескольких единиц фотонов. Вследствие одинаковости физической природы носителя информации в оптическом диапазоне волн, обобщенная структурная схема оптического ПРМ имеет вид, представленный на рисунке 1.



Рисунок 1. – Обобщенная структурная схема ПРМ сигналов оптического диапазона волн

Как видно из рисунка 1, оптический ПРМ состоит из оптической системы, светоэлектрического преобразователя, усилителя и окончательного устройства, как правило, в виде индикатора. Оптическая система (объектив) проецирует световой поток от объекта наблюдения на вход светоэлектрического преобразователя. Светоэлектрический

преобразователь осуществляет преобразование изображения в электрический сигнал, параметры которого зависят от яркости и цвета каждого пикселя изображения.

Возможности оптического ПРМ определяются следующими его характеристиками:

- диапазоном частот и спектром световых лучей, воспринимаемых светоэлектрическим преобразователем;
- чувствительностью и разрешающей способностью;
- размерами зоны обзора.

Обнаружение объектов наблюдения в оптической локации технически реализуемо в видимом, в ИК и УФ диапазонах волн.

Чувствительность оптического ПРМ оценивается минимальным уровнем мощности светового луча, при котором обеспечивается нормальная работа оконечного устройства. В оптическом диапазоне волн мощность помехи определяется яркостью фона на поверхности светоэлектрического преобразователя. Качество изображения зависит от яркости и контрастности принимаемого светового луча. Помехи могут создаваться лучами света, попадающими на вход оптического ПРМ от других источников света.

Разрешающая способность характеризуется минимальными линейными или угловыми расстояниями между двумя соседними объектами, от которых возможно раздельное наблюдение отражённых лучей. Вероятность обнаружения объекта возрастает с повышением разрешающей способности оптического ПРМ. Часть поля зрения оптического ПРМ, в которой удовлетворяются требования к качеству изображения является зоной его обзора. Размер зоны обзора определяется углами, под которыми оптический ПРМ «нормально видит» окружающее его предметное пространство. Таким образом, параметры оптического ПРМ во многом определяются параметрами оптической системы, однако на них также могут оказывать влияние способы обработки оптических сигналов.

Объектами оптической локации, о которых идёт речь в настоящей научной статье, являются микроорганизмы. К микроорганизмам относятся [9, с. 20-21]:

- одноклеточные эукариоты;
- крупные, обычные и мелкие прокариотные организмы;
- крупные и мелкие вирусы.

Если принять за критерий границу видимости невооружённым глазом, приблизительно равную 70-80 [мкм], то очень многие вышеперечисленные объекты оптической локации лежат за пределами границы видимости вследствие своих малых линейных размеров. Значения линейных размеров микроорганизмов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Размеры микроорганизмов

№ п/п	Объект	Линейный размер, мкм
1	Одноклеточные эукариоты	6-100
2	Крупные прокариоты	5-250
3	Обычные прокариоты	0,7-2
4	Мелкие прокариоты	0,1-0,6
5	Крупные вирусы	0,02-0,3
6	Мелкие вирусы	0,018-0,025

Если наблюдение некоторых одноклеточных эукариотов и крупных прокариотов возможно посредством светового микроскопа, то более мелкие микроорганизмы, в том

числе и вирусы, можно наблюдать только в электронный микроскоп. В данной научной статье рассматривается возможность наблюдения микроорганизмов методами активной и полуактивной оптической локации. Для наблюдения микроорганизмов малых размеров методами оптической локации необходимо иметь оптический ПРМ с высокими линейной и угловой разрешающей способностью. Достижение высокого разрешения оптического ПРМ возможно следующими приёмами:

- уменьшением длины световой волны λ ;
- увеличением апертуры φ оптической системы (объектива).

Апертура представляет собой действующее отверстие оптической системы, определяемое размерами линз или диафрагмами. Апертура определяется апертурным углом φ и показателем преломления среды n между объектом наблюдения и фронтальной линзой объектива. Разрешающая способность оптического ПРМ определяется выражением [8, с. 20]:

$$d_{\text{ПРМ}} = \frac{\lambda}{2 \cdot n \cdot \sin \frac{\varphi}{2}} \quad (1)$$

Одним из возможных результатов взаимодействия оптического излучения с объектом наблюдения в активной или полуактивной оптической локации заключается в проявлении эффекта рассеяния, приводящего к изменению пространственного распределения, частоты и поляризации излучения. При линейно поляризованном зондирующем излучении, когда вектор напряжённости электрической составляющей \vec{E} света принадлежит плоскости рассеяния, распределение интенсивности рассеянного света имеет вид, показанный на рисунке 2.

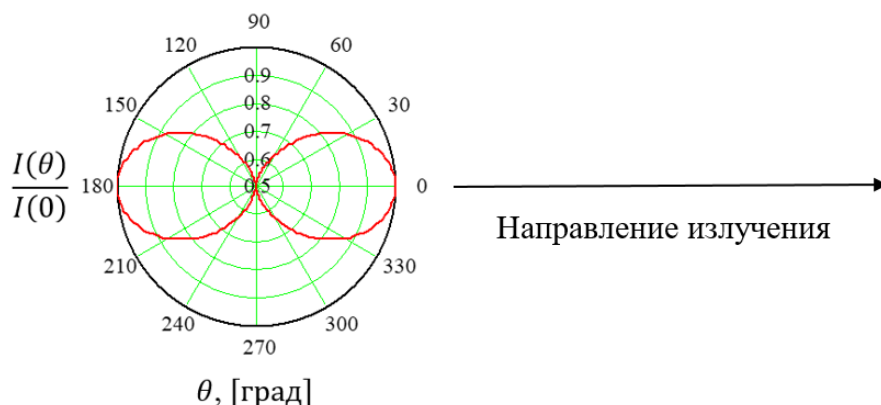


Рисунок 2 – Индикатриса рассеяния линейно-поляризованного света

Если частоты ν падающего и рассеянного оптических излучений одинаковы, такое взаимодействие называется упругим. Одним из видов упругого рассеяния является рассеяние на частицах, размеры которых сравнимы с длиной волны λ и не превышающие величины $0,1 \cdot \lambda$. Интенсивность I отражённого оптического сигнала от объекта наблюдения, имеющего микроскопические размеры, сравнимые с вирусами и бактериями, определяется полной формулой Релея [12, с. 10]

$$I = \frac{9 \cdot \pi^2 \cdot (1 + \cos^2 \theta)}{2 \cdot r^2 \cdot \lambda^4} \cdot \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2 \cdot n_0^2} \right)^2 \cdot V^2 \cdot I_0 \quad (2)$$

В выражении (2):

I_0 – интенсивность падающей световой волны;

r – расстояние между частицей и объективом оптического ПРМ;

n_1 и n_0 – показатели преломления дисперсной фазы и дисперсной среды;

λ – длина волны оптического излучения;
 θ – угол наблюдения рассеянного света;
 V – объём рассеивающей частицы.

График зависимости интенсивности I отражённого от объекта наблюдения оптического сигнала от расстояния r для различных длин волн λ оптического диапазона зондирующего излучения при условии $\theta = 0$ представлен на рисунке 3.

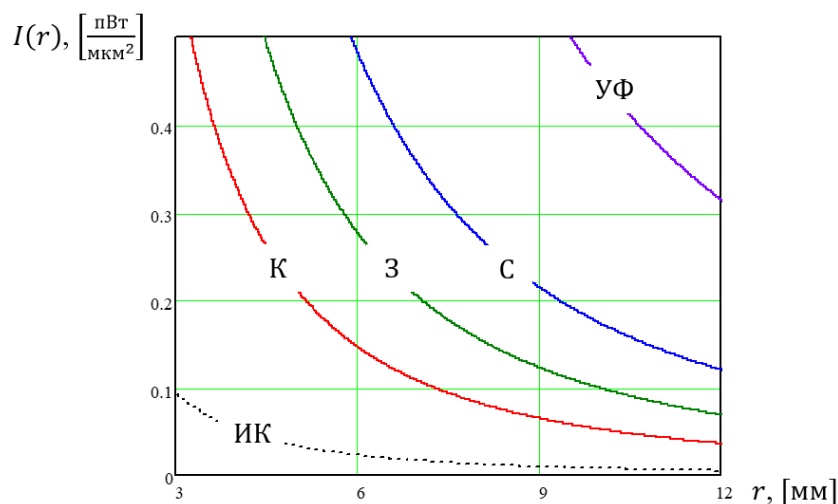


Рисунок 3 – График зависимости $I(r)$ в ИК, видимом и УФ диапазонах

В ходе графического решения задачи (2) предполагается, что уровень интенсивности зондирующего излучения соответствует величине $I_0 = 6 \left[\frac{\text{пВт}}{\text{мкм}^2} \right]$. Из рисунка 3 следует, что при оптической локации микроорганизмов в ИК диапазоне волн имеет место уровень отражённого сигнала значительно низкий по сравнению с другими используемыми для этой цели диапазонами излучений. С уменьшением длины волны λ в область спектра видимого излучения, уровень интенсивности отражённого света повышается. По графику видно, что при использовании излучения красного (К) цвета уровень интенсивности рассеяния увеличивается примерно в 5 раз, а при локации с использованием зелёного (З) и синего (С) цветов – более, чем в 5 раз. Самый высокий уровень интенсивности отражённого от объекта наблюдения оптического сигнала наблюдается в УФ диапазоне волн.

Постановка задачи. Формально задача обнаружения в оптическом диапазоне волн объекта наблюдения, имеющего микроскопические размеры, сводится к проверке статистической гипотезы о соответствии вектора наблюдения Y отражённого от объекта оптического сигнала некоторой функции правдоподобия $L(s)$. Согласно принципу максимума правдоподобия проверка истинности основной гипотезы H_1 осуществляется путём сравнения значения отношения функций правдоподобия $\frac{L(s)}{L(0)}$ с некоторой границей $C(Y) = const$. Граница $C(Y)$ представляет собой конечное фиксированное значение функции из множества значений пространства наблюдений $\Omega(Y)$ и разделяет данное пространство на две области Γ_1 и Γ_0 . По результатам проверки истинности гипотезы может быть принято одно из двух решений:

решение γ_1 – решение об истинности гипотезы H_1 . Решение принимается в случае принадлежности вектора наблюдения Y , характеризующегося функцией $L(s)$, области Γ_1 пространства наблюдений $\Omega(Y)$;

решение γ_0 – решение об истинности гипотезы H_0 . Решение принимается в случае принадлежности вектора наблюдения Y , характеризующегося функцией $L(0)$, области Γ_0 пространства наблюдений $\Omega(Y)$.

Возможным исходом натурального эксперимента по наблюдению в оптическом диапазоне волн микроскопических объектов является факт проявления несовместных событий, которые составляют полную группу (таблица 2).

Таблица 2

Возможные исходы эксперимента по наблюдению объектов

№ п/п	Решение	Верная гипотеза	Событие	Вероятность события
1	γ_1	H_1	Правильное обнаружение	$P(\gamma_1 H_1)$
2	γ_0	H_0	Правильное неопределение	$P(\gamma_0 H_0)$
3	γ_1	H_0	Ложная тревога (ошибка 1-го рода)	$P(\gamma_1 H_0)$
4	γ_0	H_1	Пропуск объекта (ошибка 2-го рода)	$P(\gamma_0 H_1)$

Ошибочные решения 1-го и 2-го рода могут быть приняты наблюдателем в силу случайности значений вектора наблюдений Y . Ошибка 1-го рода с вероятностью $P(\gamma_1|H_0)$ определяет уровень значимости α и возникает когда ряд отдельных компонентов вектора наблюдения Y , характеризующегося функцией условной плотности вероятности $W_n(Y|0)$, оказываются в области Γ_1 пространства наблюдений $\Omega(Y)$. Ошибка 2-го рода с вероятностью $P(\gamma_0|H_1)$ возникает когда отдельные значения вектора Y , характеризующегося функцией $W_n(Y|s)$, попадают в область Γ_0 пространства $\Omega(Y)$. Последствия принятия ошибочных решений количественно характеризуются зависящим от вектора наблюдаемых параметров A функционалом потерь $\Pi(A, \gamma(Y))$, значение которого в силу случайности решений $\gamma(Y)$ является случайным. Задача обнаружения сводится к минимизации математического ожидания [10, с. 17]

$$M\{\Pi\} = \int_{\Omega(Y)} \Pi(A, \gamma(Y)) \cdot W_n(Y|A) d\Omega(Y) \quad (3)$$

функционала потерь Π , помощью которого количественно оценивается риск принятия правильного решения о наличии или отсутствии в зоне оптической локации объекта наблюдения [11, с. 96-97].

Алгоритм обнаружения представляет собой последовательность действий, направленных на решение задачи установления факта наличия объекта наблюдения в зоне активной или полуактивной оптической локации по критерию Неймана-Пирсона.

Исходными данными для решения поставленной задачи являются следующие величины и функции:

n – количество наблюдений за объектом;

$Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ – n -мерный вектор наблюдения;

$\Omega(Y)$ – пространство наблюдаемых значений сигналов, отражённых от объекта наблюдения;

Γ_1, Γ_0 – области пространства наблюдаемых значений отражённых сигналов, соответствующих наличию и отсутствию объекта наблюдения в зоне оптической локации;

P_1, P_0 – априорные вероятности соответственно наличия и отсутствия объекта наблюдения в зоне оптической локации;

$L(s), L(0)$ – функции правдоподобия соответствующие вектору наблюдения Y в зависимости соответственно от наличия или отсутствия объекта наблюдения в зоне оптической локации;

$W(Y|s)$, $W(Y|0)$ – апостериорные плотности распределения наблюдаемых значений отражённых сигналов, соответственно при наличии и отсутствии объекта наблюдения в зоне оптической локации.

Требуется установить факт наличия или отсутствия в зоне оптической локации объекта наблюдения по критерию Неймана-Пирсона, обеспечивающему минимум значения математического ожидания функционала потерь (3).

Решение данной задачи осуществляется при наличии допущения, связанного с тем, что величина функционала потерь (3) для определяется только одинаковыми значениями рисков совершения ошибок 1-го и 2-го рода

$$P(A = 0, \gamma(Y) = \gamma_1) = P(A = s, \gamma(Y) = \gamma_0) = P. \quad (4)$$

Алгоритм обнаружения обеспечивает пошаговое приближение к обозначенной цели и представляет собой следующую последовательность действий.

1. На первом шаге выдвигаются две гипотезы:

H_1 – основная гипотеза, заключающаяся в соответствии вектора наблюдения Y отражённого от объекта оптического сигнала некоторой функции правдоподобия $L(s)$.

H_0 – гипотеза, конкурирующая основной гипотезе H_1 и заключающаяся в соответствии вектора наблюдения Y функции правдоподобия $L(0)$.

2. На втором шаге определяется значение функционала

$$\beta = \int_{-\infty}^{\Gamma_0} W_n(Y|s) d\Omega(Y) \quad (5)$$

при граничном условии

$$\alpha = \int_{\Gamma_1}^{\infty} W_n(Y|0) d\Omega(Y). \quad (6)$$

3. На третьем шаге вводится функция вида

$$F = \beta + \lambda^* \cdot (\alpha - \varepsilon), \quad (7)$$

которую в наиболее явном виде следует записать как

$$F = \int_{-\infty}^{\Gamma_0} W_n(Y|s) d\Omega(Y) + \lambda^* \cdot \left(\int_{\Gamma_1}^{\infty} W_n(Y|0) d\Omega(Y) - \varepsilon \right), \quad (8)$$

или

$$F = \lambda^* \cdot (1 - \varepsilon) - \int_{\Gamma_0} [W_n(Y|s) - \lambda^* \cdot W_n(Y|0)] d\Omega(Y), \quad (9)$$

принимающая минимальное значение при условии

$$W_n(Y|s) - \lambda^* \cdot W_n(Y|0) > 0.$$

Для того, чтобы удовлетворить ограничению (6), значение величины λ^* выбирается таким образом, чтобы выполнялось равенство вида $\alpha = \varepsilon$.

4. На заключительном шаге по критерию (10), который представляет собой правило

$$\frac{w_n(Y|s)}{w_n(Y|0)} > \lambda^*, \quad (10)$$

принимается решение о состоятельности одной из двух гипотез: H_1 или H_0 .

Работа алгоритма подтверждается на практическом примере. Пусть апостериорные плотности распределения наблюдаемых значений отражённых сигналов, соответственно при наличии $W(Y|s)$ и отсутствии $W(Y|0)$ объекта наблюдения в зоне оптической локации представляют собой распределения Гаусса с параметрами, приведенными в таблице 3.

Таблица 3

Параметры распределения
наблюдаемых значений отражённых сигналов

№ п/п	Параметры распределения	Наличие объекта наблюдения	
		Да	Нет
1	Математическое ожидание, m_Y , [пВт]	0,6	0,1

2	Среднеквадратическое отклонение, σ_Y , [пВт]	0,1	0,15
---	---	-----	------

Для выполнения расчётов приняты следующие исходные данные:

Граница области пространства наблюдаемых значений отражённых сигналов, соответствующая наличию объекта наблюдения в зоне оптической локации $\lambda^* = \Gamma_0 = \Gamma_1 = 0,4$ [пВт];

Априорные вероятности соответственно наличия и отсутствия объекта наблюдения в зоне оптической локации $P_1 = P_0 = 0,5$.

Результаты расчётов апостериорных плотностей распределения наблюдаемых значений отражённых сигналов при наличии $W(Y|s)$ и отсутствии $W(Y|0)$ объекта наблюдения в зоне оптической локации представлены на рисунке 4 и в таблице 4.

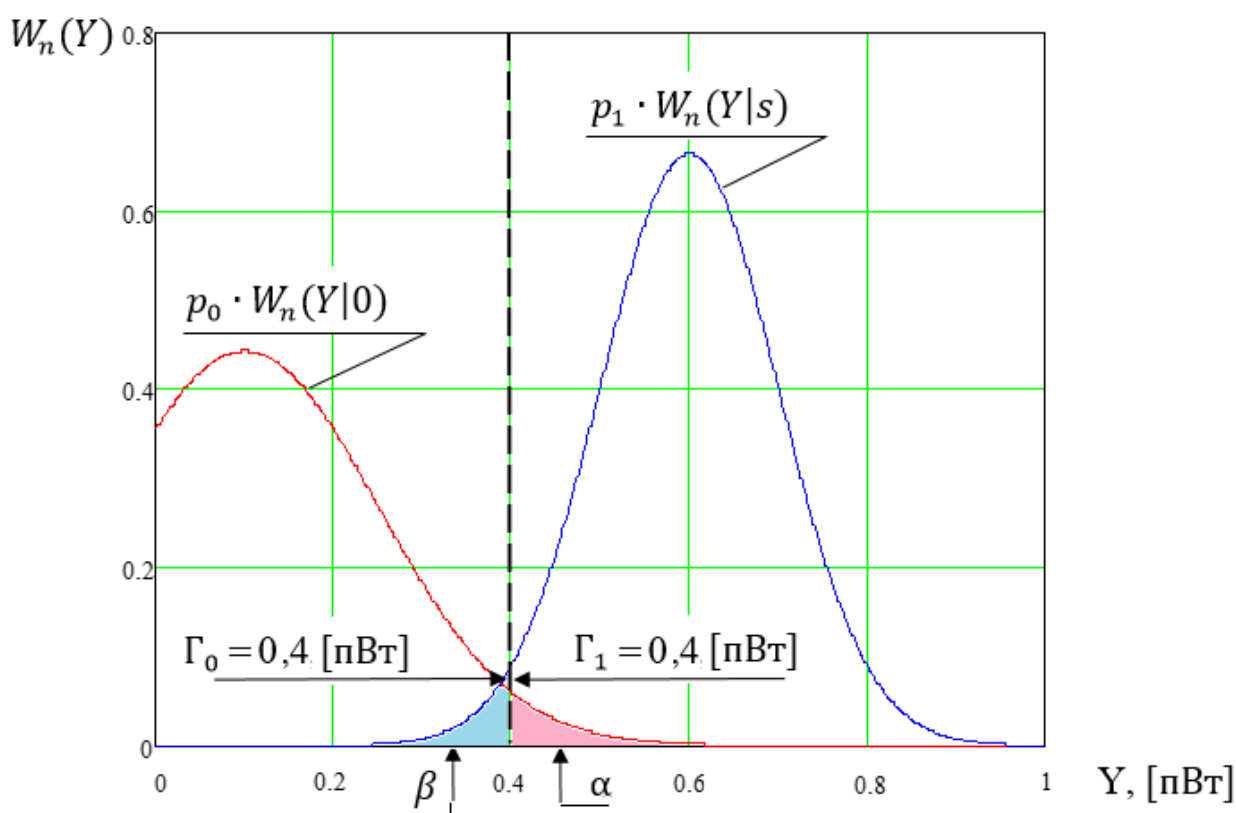


Рисунок 4 – Апостериорные плотности распределения наблюдаемых значений отражённых сигналов при наличии и отсутствии объекта наблюдения в зоне оптической локации

Результаты расчёта условных вероятностей правильного обнаружения $P(\gamma_1|H_1)$ и правильного необнаружения $P(\gamma_0|H_0)$ объекта наблюдения, условных вероятностей ошибок первого α и второго β рода и порогового значения λ^* представлены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты расчёта

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение
1	Условная вероятность правильного обнаружения	$P(\gamma_1 H_1)$	0,49
2	Условная вероятность правильного необнаружения	$P(\gamma_0 H_0)$	0,35
3	Условная вероятность	α	0,011

	ошибки 1-го рода		
4	Условная вероятность ошибки 2-го рода	β	0,011
5	Порог обнаружения	λ^*	1
6	Отношение значений	$\frac{W_n(Y s)}{W_n(Y 0)}$	1,5

Выводы: Таким образом, цель исследования в настоящей научной статье достигнута путём решения двух взаимосвязанных между собой научных задач:

1. Разработка алгоритма обнаружения в оптическом диапазоне волн микроскопических объектов, основу которого составляет проверка гипотезы о соответствии вектора наблюдения Y отражённого оптического сигнала некоторой функции правдоподобия $L(s)$ согласно критерию Неймана-Пирсона, предусматривающего процесс сравнения значения отношения функций правдоподобия $\frac{L(s)}{L(0)}$ с границей λ^* , представляющей собой конечное фиксированное значение функции из множества значений пространства наблюдений и разделяющее последнее на две области.

2. Построение графиков апостериорных плотностей $W_n(Y)$ распределения наблюдаемых значений оптических сигналов, отражённых от имеющих микроскопические размеры объектов, при наличии и отсутствии данных объектов наблюдения в зоне оптической локации. Результаты расчёта условных вероятностей правильного обнаружения $P(\gamma_1|H_1)$ и правильного необнаружения $P(\gamma_0|H_0)$ объекта наблюдения, условных вероятностей ошибок первого α и второго β рода и также порога обнаружения λ^* представлены на рисунке 4 и в таблице 4.

Аналогичные результаты расчёта можно получить в процессе выполнения лабораторных экспериментов, достаточно чёткое и подробное описание которых приведено в [13, с. 5-52] и [14, с. 617-621].

Список литературы:

1. Белый, В.С. Исследование процессов прохождения видимого излучения через оптическую систему на базе тонкой собирающей линзы / В. С. Белый, С. С. Воробьев // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 3. – С. 582-591;
2. Белый, В.С. Уравнения регрессии для случайных величин исходного и конечного влагосодержания пенополимерминеральной изоляции труб магистральных теплопроводов / В.С. Белый, С.В. Брыль // Экология и строительство. – 2019. – № 1. – С. 25-30. – DOI 10.35688/2413-8452-2019-01-004;
3. Белый, В.С. Исследование явления внешнего фотоэффекта при взаимодействии видимого излучения с плоской металлической равномерно заряженной цинковой пластиной / В.С. Белый, Д.Д. Бабаев // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – С. 443-451;
4. Белый, В.С. Результаты корреляционного анализа экспериментальных данных об исходном влагосодержании и водопоглощении пенополимерминеральной изоляции стальной трубы подземного теплопровода / В.С. Белый, С.В. Брыль // Экология и строительство. – 2018. – № 3. – С. 11-16. – DOI 10.24411/2413-8452-2018-10010;
5. Корреляционный анализ процессов водопоглощения пенополиминеральной изоляции труб магистральных теплопроводов / В.С. Белый, В.В. Поборцев, В.О. Серегин, Р.Д. Харитонов // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы

- и перспективы: материалы V Международной научно-практической конференции, Коломна, 30 апреля 2018 года. – Коломна: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», 2018. – С. 182-197;
6. Исследование водопоглощения пенополимерминеральной изоляции труб магистральных теплопроводов / В.С. Белый, В.В. Поборцев, В.О. Серегин, Р.Д. Харитонов // Техника и технологии, политика и экономика: проблемы и перспективы: материалы V Международной научно-практической конференции, Коломна, 30 апреля 2018 года. – Коломна: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский политехнический университет», 2018. – С. 169-181;
 7. Березин, В.В. Обнаружение и оценивание координат изображений точечных объектов в задачах астронавигации и адаптивной оптики / В. В. Березин, А. К. Цыцулин // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2008. – № 1(8). – С. 11-20;
 8. Гаврилова Н. Н. Микроскопические методы определения размеров частиц дисперсных материалов: учеб. пособие / Н.Н. Гаврилова, В.В. Назаров, О.В. Яровая. – М.: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 52 с. ISBN 978-5-7237-1055-9;
 9. Гусев М.В. Микробиология: Учебник для студентов биологических специальностей вузов / М.В. Гусев, Л.А. Минеева. – 4-е изд., стер. – М.: Издательский центр «Академия», 2003. – 464 с.;
 10. Лебедько Е.Г. Математические основы передачи информации. Учебное пособие – С-Пб: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2009. – 118 с.;
 11. Лебедько Е.Г. Системы оптической локации. Учебное пособие. Часть 2. – С-Пб: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012. – 129 с.;
 12. Новикова, В.А. Рассеяние света и его применение в волоконной оптике / В.А. Новикова, С.В. Варжель; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. – С-Пб: Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2019. – 39 с. – EDN AFAXZN;
 13. Фираго В.А. Детектирование слабых световых потоков: Методические указания к лабораторным работам для студентов специальностей 1-31 04 02 «Квантовая радиофизика и лазерные системы» – Мн.: БГУ, 2007. – 56 с.;
 14. Parfenov, V.I. Optical signal detection according to the photoelectron flow with unknown density waveform / V. I. Parfenov, V. S. Kirillov // Computer Optics. – 2012. – Vol. 36. – No 4. – P. 617-621.

References:

1. Bely, V.S. Investigation of the processes of visible radiation passing through an optical system based on a thin collecting lens / V. S. Bely, S. S. Vorobyov // Issues of sustainable development of society. – 2022. – No. 3. – pp. 582-591;

2. Bely, V.S. Regression equations for random variables of the initial and final moisture content of foam polymer mineral insulation of pipes of main heat pipelines / V.S. Bely, S.V. Bryl // Ecology and construction. – 2019. – No. 1. – pp. 25-30. – DOI 10.35688/2413-8452-2019-01-004;
3. Bely, V.S. Investigation of the phenomenon of an external photoelectric effect in the interaction of visible radiation with a flat metal uniformly charged zinc plate / V.S. Bely, D.D. Babaev // E-Scio. – 2022. – № 3(66). – Pp. 443-451;
4. Bely, V.S. Results of correlation analysis of experimental data on the initial moisture content and water absorption of the foam polymer mineral insulation of a steel pipe of an underground heat pipeline / V.S. Bely, S.V. Bryl // Ecology and Construction. – 2018. – No. 3. – pp. 11-16. – DOI 10.24411/2413-8452-2018-10010;
5. Correlation analysis of water absorption processes of foam-mineral insulation of pipes of main heat pipelines / V.S. Bely, V.V. Pobortsev, V.O. Seregin, R.D. Kharitonov // Technique and technologies, politics and economics: problems and prospects: materials of the V International Scientific and Practical Conference, Kolomna, April 30, 2018. Kolomna: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University", 2018. – pp. 182-197;
6. Investigation of water absorption of foam polymer mineral insulation of pipes of main heat pipelines / V.S. Bely, V.V. Pobortsev, V.O. Seregin, R.D. Kharitonov // Technique and technologies, politics and economics: problems and prospects: materials of the V International Scientific and Practical Conference, Kolomna, April 30, 2018. Kolomna: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow Polytechnic University", 2018. – pp. 169-181;
7. Berezin, V.V. Detection and estimation of coordinates of images of point objects in problems of astronavigation and adaptive optics / V. V. Berezin, A. K. Tsitsulin // Bulletin of the Pacific State University. – 2008. – № 1(8). – Pp. 11-20;
8. Gavrilova N. N. Microscopic methods for determining particle sizes of dispersed materials: textbook. manual / N.N. Gavrilova, V.V. Nazarov, O.V. Yarovaya. – M.: D. I. Mendeleev Russian Technical Technical University, 2012. – 52 p. ISBN 978-5-7237-1055-9;
9. Gusev M.V. Microbiology: Textbook for students of biological specialties of universities / M.V. Gusev, L.A. Mineeva. – 4th ed., ster. – M.: Publishing Center "Academy", 2003. – 464 p.;
10. Lebedko E.G. Mathematical foundations of information transmission. Textbook – S-Pb: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2009. – 118 p.;
11. Lebedko E.G. Optical location systems. Study guide. Part 2. – S-Pb: St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2012. – 129 p.;
12. Novikova, V.A. Light scattering and its application in fiber Optics / V.A. Novikova, S.V. Varzhel; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and optics. – S-Pb: Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2019. – 39 p. – EDN AFAXZN;
13. Firago V.A. Detection of weak light streams: Guidelines for laboratory work for students of specialties 1-31 04 02 "Quantum radiophysics and laser systems" – Mn.: BSU, 2007. – 56 p.;

14. Parfenov, V.I. Optical signal detection according to the photoelectron flow with unknown density waveform / V. I. Parfenov, V. S. Kirillov // Computer Optics. – 2012. – Vol. 36. – No. 4. – P. 617-621.