

is over 0.05 mm ($P = 67.56\%$) and over 0.1 mm ($P = 95.75\%$), which is sufficient for further application of the obtained scans in the task of GTE blade repair.

Keywords: computer vision, metal deposition, metal parts repair, GTE blade repair, machine vision system, scanning thin blades.

Поступила в редакцию/received: 25.10.2023; после рецензирования/revised: 31.10.2023;
принята/accepted: 10.11.2023

УДК 004.3

ХАРАКТЕРИСТИКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ ОБНАРУЖИТЕЛЕЙ МАЛОЗАМЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА СЛАБОКОНТРАСТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ФОРМИРУЕМЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫМ ПРИБОРОМ В СЛОЖНЫХ ФОНОВЫХ УСЛОВИЯХ

В.К. КЕМАЙКИН¹, канд. техн. наук, А.Ю. КОЗЛОВ², канд. техн. наук,
А.А. ХРАМИЧЕВ³, канд. техн. наук

¹Тверской государственный технический университет
170026, Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, e-mail: vk-kem@mail.ru

²АО Научно-производственное предприятие «Эргоцентр»
170021, Тверь, ул. Хрустальная, д. 2, корп. 4

³АО «Специальное проектно-конструкторское бюро средств управления»
170100, Тверь, Вагжановский пер., д. 9

© Кемайкин В.К., Козлов А.Ю., Храмичев А.А., 2024

В статье предложено использование автоматического адаптивного обнаружителя, реализующего локально наиболее мощный несмещенный (ЛНМН) критерий, и проведено его сравнение с обнаружителем по критерию Неймана – Пирсона для экстремально сложных условий наблюдения для оптико-электронных приборов. Построены рабочие характеристики адаптивного обнаружения слабоконтрастных изображений динамических объектов в сложных фоновых условиях. Получены расчетные оценки, подтверждающие превосходство ЛНМН-правила над классическим правилом Неймана – Пирсона.

Ключевые слова: оптико-электронный прибор, динамический объект, изображение, фоноцелевой кадр, критерии и характеристики обнаружения.

DOI: 10.46573/2658-5030-2024-1-78-84

ВВЕДЕНИЕ

Под характеристикой обнаружителя понимается принятая в статистической теории обнаружения сигналов [1] зависимость вероятности правильного обнаружения цели – динамического объекта (ДО) – от отношения «сигнал/шум» (ОСШ) при заданной вероятности ложной тревоги, которая определяет мощность обнаружителя.

Ниже рассмотрены два обнаружителя: предложенный, реализующий локально наиболее мощный несмещенный (ЛНМН) критерий, и обнаружитель, реализующий классический критерий Неймана – Пирсона для экстремально сложных условий наблюдения (это низкий (включая отрицательный) контраст объекта и наличие

целеподобных фоновых образований). Первый из названных является адаптивным [2, 3], их реализация – автоматическая.

Обнаружители функционируют в сложных условиях, т.е. в условиях, близких к двум альтернативным ситуациям: в зоне контроля оптико-электронного прибора (ОЭП) находится ДО на сложном неоднородном нестационарном облачном фоне, обуславливающим слабый (положительный или отрицательный) контраст ДО – «слабый сигнал»; в зоне контроля ОЭП имеется только сложный неоднородный нестационарный фон – «шум». Последний может обуславливать обнаружение ОЭП целеподобных изображений. Относительно ситуаций имеет место полная априорная пространственно-временная неопределенность.

Обнаружение ДО по слабоконтрастному изображению целесообразно осуществлять с использованием обнаружителя, реализующего локально наиболее мощный универсальный несмещенный критерий [2]. Введение такого критерия основано на близости параметров альтернативных ситуаций. Однако для других (менее сложных помеховых) условий не исключается возможность применения и классического критерия Неймана – Пирсона.

Цель работы – оценить характеристики обнаружителей малозаметных ДО на слабоконтрастных изображениях ОЭП и определить области их эффективного применения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В статистическом смысле ситуации простые: каждая из них определяется однозначно одним доминирующим параметром [2].

Под доминирующими параметрами для рассматриваемых ситуаций понимаются θ_1 и θ_0 – первые моменты функций правдоподобия – условных плотностей распределения вероятностей фрактальной размерности d и максимального собственного значения λ_{\max} корреляционной матрицы яркостей пикселей изображения соответственно для условий одной и другой альтернативных ситуаций. Отметим, что названные статистики d и λ_{\max} являются инвариантами (и даже максимальными инвариантами [4]) по отношению к знаку контраста и особенностям движения ДО [2].

Параметры непрерывны и независимы в функциональном и статистическом смысле. Их анализ можно проводить отдельно, а в алгоритме обнаружения ДО учитывать в виде соответствующих сочетаний их значений как минимальных достаточных статистик [2].

Вторые моменты однозначность условных плотностей не нарушают. Они определяют «разброс» значений фрактальной размерности и максимального собственного значения на конечных положительных интервалах.

Было установлено [2], что по параметру фрактальной размерности ситуация «ДО на сложном фоне в зоне контроля ОЭП» – правосторонняя относительно ситуации «сложный фон в зоне контроля ОЭП», а по параметру максимального собственного значения – левосторонняя.

Указанное обстоятельство и близость ситуаций как простых статистических гипотез является основой применения для обнаружения ДО в сложных условиях функционирования ОЭП критерия из класса ЛНМН [4, 5], т.е., в сущности (в силу простых ситуаций), из семейства с монотонным отношением функций правдоподобия. При этом возникает необходимость оценки основной характеристики – мощности критерия $(1 - \beta_d)$, или вероятности правильного принятия решения об обнаружении ДО на слабоконтрастном изображении при близости альтернативной ситуации, создающей

возможность принятия ложного решения, т.е. обнаружения ложного ДО. Аппроксимируем функции правдоподобия нормальными плотностями распределения, определенными на интервалах значений названных статистик принятия решений: фрактальной размерности и максимального собственного значения, после чего отметим, что целесообразность такой аппроксимации в рассматриваемом случае исходит из получения гарантированной оценки мощности, так как нормальный закон обладает максимальной энтропией по сравнению с другими непрерывными законами, имеющими те же моменты, что и принятый для аппроксимации нормальный.

Теперь установим формальную запись правила принятия решения по ЛНМН-критерию, воспользовавшись отношением правдоподобия для близких простых гипотез.

Имеем, например, при принятии решения по статистике фрактальной размерности d :

$$\begin{aligned} \ln f(d | \theta_1, \text{ДО} \wedge \text{Фон}) - \ln f(d | \theta_0, \text{Фон}) &\geq \ln \Pi(\alpha); \\ \frac{\partial \ln f(d | \theta_0, \text{Фон})}{\partial \theta_0} (\theta_1 - \theta_0) &\geq \ln \Pi(\alpha); \\ \frac{\partial}{\partial \theta_0} \left[\ln \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} - \frac{1}{2} \frac{(d - \theta_0)^2}{\sigma^2} \right] (\theta_1 - \theta_0) &\geq \ln \Pi(\alpha); \\ \frac{(d - \theta_0)}{\sigma^2} (\theta_1 - \theta_0) &\geq \ln \Pi(\alpha) \end{aligned}$$

и в результате получаем искомое выражение правила принятия решения

$$d \geq \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \ln \Pi(\alpha) + \theta_0$$

по одиночной выборке – статистике фрактальной размерности, где $\theta_1 - \theta_0$ – величина малая в силу близости ситуаций; θ_1, θ_0 – параметры ситуаций.

Мощность такого правила при малой величине $\delta = \theta_1 - \theta_0$ оценивается [6] по выражению

$$1 - \beta_d = e^{-\left(\frac{\theta_1 - \theta_0}{\sigma}\right)^2 n},$$

где n – объем выборки фрактальной размерности (определяется по количеству фоноцелевых кадров ОЭП).

Параметр δ считается малым, если принимает значения из интервала $0 < \delta \leq 2/\sqrt{n}$ [7], т.е. $0 < \delta \leq 2$ при $n = 1$.

Вышеуказанное выражение не зависит от устанавливаемой допустимой вероятности α ложного обнаружения ДО в сложных неоднородных нестационарных фоновых условиях.

Аналогичным образом, с учетом левосторонности ситуации «ДО на сложном фоне в зоне контроля ОЭП» относительно ситуации «сложный фон в зоне контроля ОЭП», выводится правило принятия решения по статистике максимального собственного значения λ .

Следует отметить, что при принятии решения в условиях близких ситуаций по классическому критерию Неймана – Пирсона соответствующая мощность будет оцениваться по выражению

$$1 - \beta_d = e^{-0.5 \left(\frac{\theta_1 - \theta_0}{\sigma} \right)^2 n},$$

также не зависящему от допустимого значения вероятности обнаружения ложного ДО.

Из сравнения мощностей двух правил (при априорной неопределенности они составляют полное множество) очевиден вывод: в условиях близких ситуаций мощность правила принятия решения по ЛНМН-критерию на порядок доминирует над мощностью классического правила Неймана – Пирсона и доминирование будет иметь место при $0 < \delta \leq (2 - 3)$.

При $\delta \geq 3$, чему соответствует ОСШ не менее 3, начинает «хорошо» работать правило обнаружения ДО, реализующее классический критерий Неймана – Пирсона. Выражение для порогового уровня принятия решения об обнаружении ДО по такому правилу устанавливается (при $n = 1$ – одиночном измерении статистики – по одному фоноцелевому кадру ОЭП), например, для статистики фрактальной размерности d непосредственно из отношения правдоподобия классического критерия Неймана – Пирсона для двух альтернативных ситуаций, т.е. из неравенства вида

$$\frac{f(d | \theta_1, \text{ДО} \wedge \text{Фон})}{f(d | \theta_0, \text{Фон})} \geq \ln \Pi_{\text{н-п}}(\alpha).$$

Пусть в этом неравенстве, как и в случае обнаружения ДО в условиях близких ситуаций, функции правдоподобия $f(d | \theta_1, \text{ДО} \wedge \text{Фон})$, $f(d | \theta_0, \text{Фон})$ нормальны; параметры ситуаций θ_1 и θ_0 , очевидно, будут отличаться от соответствующих параметров близких ситуаций, что непринципиально, так как сравнение результатов реализации двух правил будет осуществляться на основе разностей $\theta_1 - \theta_0$ между параметрами близких и небликих ситуаций.

Действительно, выполнив элементарные преобразования над отношением вида

$$\frac{f(d | \theta_1, \text{ДО} \wedge \text{Фон})}{f(d | \theta_0, \text{Фон})} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(d - \theta_1)^2}{2\sigma^2}\right\}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(d - \theta_0)^2}{2\sigma^2}\right\}} \geq \ln \Pi_{\text{н-п}}(\alpha),$$

получим выражение для классического правила принятия решения об обнаружении ДО по критерию Неймана – Пирсона

$$d \geq \frac{\sigma^2}{\theta_1 - \theta_0} \ln \Pi(\alpha) + \frac{\theta_1 + \theta_0}{2},$$

в котором $\theta_1 - \theta_0$ всегда превышает разность $\delta = \theta_1 - \theta_0$ в ЛНМН-правиле принятия решения об обнаружении ДО. Аналогичное соотношение относится и к слагаемому $\frac{\theta_1 + \theta_0}{2}$ по отношению к θ_0 в ЛНМН-правиле.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Из сравнения правил следует очевидный вывод: пороговый уровень принятия решения по ЛНМН-критерию всегда не превышает пороговый уровень принятия решения по классическому критерию Неймана – Пирсона. Это, в свою очередь, означает, что мощность ЛНМН-критерия будет не меньше мощности критерия Неймана – Пирсона в любых сложных фоноцелевых и других ситуациях, в которых $\delta \geq 3$, т.е. в ситуациях с высоким контрастом ДО на реальном фоне.

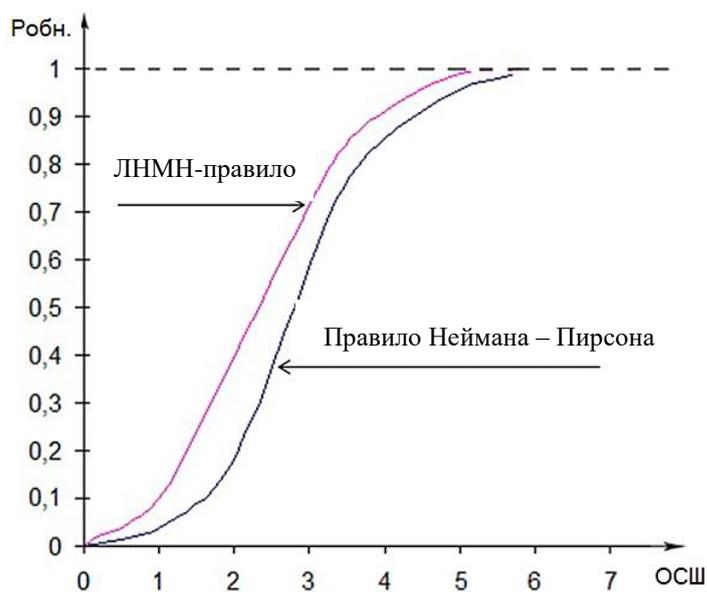
Тем не менее значения мощности критериев при принятии решения по одиночному измерению статистики фрактальной размерности (и статистики максимального собственного значения) не удовлетворяют требуемым. Их соответствующие значения – 0,1 при обнаружении ДО по ЛНМН-правилу для близких ситуаций и 0,05 по классическому правилу Неймана – Пирсона при $\delta = 0,05$. Значение $\delta = 0,05$ вычислено по реальным слабоконтрастным изображениям, полученным в ситуации «ДО на сложном фоне».

Повышение мощности критериев при $0 < \delta \leq 3$ возможно только при накоплении измерений названных статистик, т.е. при принятии решения об обнаружении ДО по $n > 1$ измерениям статистик на основе логики « k из l » ($l > k$). Реализация этой логики должна осуществляться по принципу «хотя бы один раз» на «скользящем» интервале времени накопления l измерений по последовательным фоноцелевым кадрам ОЭП и установлением $\max [k]$, т.е. наибольшего целого, по эмпирической формуле функциональной связи $k \cong 1,5\sqrt{l}$ либо по неравенству $\alpha \leq \sum_{m=k}^l C_l^m p_\phi^m (1-p_\phi)^{l-m}$, выво-

димому из биномиального распределения вероятностей накапливаемых l статистик принятия решения [8]. Подтверждением этого утверждения является результат оценки мощности критерия Неймана – Пирсона, полученный моделированием с помощью [9] соответствующего правила обнаружения ДО в реальных фоноцелевых условиях при ОСШ, равном 3. Значение мощности по единичному измерению статистики обнаружения ДО составляет 0,6 при вероятности 0,25 обнаружения ложных ДО, т.е. ДО, порождаемых фоном в зоне обзора ОЭП. Накопленная мощность без учета флуктуаций яркостей изображений по данному правилу при этом составляет 0,72...0,75, а накопленная мощность ЛНМН-правила в этих же условиях составляет 0,8...0,83 при том же уровне вероятности обнаружения ложного ДО.

Установленное превышение подтверждает теоретический результат доминирования ЛНМН-правила над классическим правилом Неймана – Пирсона, порог принятия решения в котором выше порога принятия решения по ЛНМН-правилу. Вероятность ложного обнаружения ДО из-за воздействия оптического излучения фона на ОЭП при реализации любого из правил с накоплением измеряемых статистик составляет $\approx 0,12$.

При повышении ОСШ мощности обоих правил стремятся к единице, в сущности говоря, с одной и той же скоростью. Так, при отношении «сигнал/шум», равном 5, мощности правил превышают 0,9; а при отношении 6...7 близки к единице. По полученным результатам на рисунке представлена искомая вероятность правильного обнаружения ($P_{обн}$), определяющая мощность для каждого правила в зависимости от ОСШ. Это так называемые рабочие характеристики правил.



Характеристики обнаружения правил ЛНМН и Неймана – Пирсона

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа полученных результатов, в том числе представленных на рисунке, следует, что предпочтительно применение предложенного обнаружителя ДО, основанного на реализации ЛНМН – правила принятия решения, не только в сложных условиях функционирования ОЭС (при обнаружении ДО с положительным и отрицательным контрастом на малоконтрастных изображениях при $ОСШ \in (0, 3)$), но и в условиях с повышенным ОСШ. Обнаружитель, основанный на применении классического правила Неймана – Пирсона, не обеспечивает обнаружение ДО с отрицательным контрастом на малоконтрастных изображениях, а приемлемую для практики вероятность обнаружения ДО с положительным контрастом имеет при ОСШ не менее 4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Теория обнаружения сигналов / П.С. Акимов [и др.]. М.: Радио и связь. 1984. 440 с.
2. Катулев А.Н., Храмичев А.А., Гузенко О.Б. Критерий и алгоритм обнаружения динамического объекта на сложном фоне по точечному слабоконтрастному изображению оптико-электронного прибора // *Автометрия*. 2015. Т. 51. № 2. С. 38–48.
3. Катулев А.Н., Храмичев А.А., Ягольников С.В. Цифровая обработка 2D слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях. Обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов. М.: Радиотехника. 2018. 407 с.
4. Кокс Д., Хинкли Д. Теоретическая статистика. М.: Мир. 1978. 560 с.
5. Шметтерер Л. Введение в математическую статистику. М.: Наука. 1976. 520 с.
6. Башаринов А.Е., Флейшман Б.С. Методы статистического последовательного анализа и их приложения. М.: Советское радио. 1962. 352 с.
7. Кокс Д., Хинкли Д. Задачи по теоретической статистике с решениями. М.: Мир. 1981. 225 с.
8. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь. 1989. 656 с.

9. Козлов А.Ю., Храмичев А.А. Программный комплекс обработки двумерных изображений для оптико-электронных систем обнаружения, сопровождения и распознавания динамических объектов // *Software Journal: Theory and Applications*. 2020. № 1. С. 1–10.

Для цитирования: Кемайкин В.К., Козлов А.Ю., Храмичев А.А. Характеристики автоматических обнаружителей малозаметных динамических объектов на слабо-контрастных изображениях, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия «Технические науки». 2024. № 1 (21). С. 78–84.

CHARACTERISTICS OF AUTOMATIC DETECTORS UNOBTRUSIVE DYNAMIC OBJECTS ON LOW-CONTRAST IMAGES GENERATED BY OPTOELECTRONIC DEVICE IN COMPLEX BACKGROUND CONDITIONS

V.K. KEMAYKIN¹, Cand. Sc., A.Yu. KOZLOV², Cand. Sc.,
A.A. KHRAMICHEV³, Cand. Sc.

¹Tver State Technical University
22, Af. Nikitin emb., Tver, 170026, e-mail: vk-kem@mail.ru

²JSC Research and Production Enterprise «Ergocenter»
2, bldg. 4. Khrustalnaya str., Tver, 170021

³JSC «Special Design Bureau of Controls»
9, Vagzhanovsky Lane, Tver, 170100

The article proposes an automatic adaptive detector that implements the locally most powerful unbiased (LNMN) criterion and its comparison with the detector according to the Neumann-Pearson criterion for extremely difficult observation conditions for optoelectronic devices. The performance characteristics of adaptive detection of low-contrast images of dynamic objects in complex background conditions are constructed. Calculated estimates confirming the superiority of the LNMN rule over the classical Neumann-Pearson rule are obtained.

Keywords: optoelectronic device, dynamic object, image, phono-target frame, detection criteria and characteristics.

Поступила в редакцию/received: 10.11.2023; после рецензирования/ revised: 17.11.2023;
принята/accepted: 24.11.2023