

УДК 355.40; 623.4.05

[https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3\(31\).80-94](https://doi.org/1034169/2414-0651.2021.3(31).80-94)

Д. Є. ХАУСТОВ, кандидат технічних наук
<https://orcid.org/0000-0001-5542-2831>

Ю. А. НАСТИШИН, доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник
<https://orcid.org/0000-0001-7521-3906>

Я. Є. ХАУСТОВ, ад'юнкт штатний
<https://orcid.org/0000-0003-4553-0702>

А. М. АНДРІЄНКО, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
<https://orsid.org/0000-0002-7018-3784>
(Національна академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, м. Львів)

ЙМОВІРНІСТЬ ВИКОНАННЯ ВІЗУАЛЬНОЇ ЗАДАЧІ ЯК СИГМОЇДНА ФУНКЦІЯ

Розглядаються питання вирішення візуального завдання зі збору інформації багатоканальним прицільно-спостережним комплексом зразка бронетанкового озброєння в інтересах усвідомлення ціле-фонові обстановка, супроводження та знищення озброєння та військової техніки противника на максимальних дальностях (в межах дії основного штатного озброєння зразків бронетанкового озброєння). В якості критерію ефективності виконання завдання з виявлення/розпізнавання/ідентифікації цілі виступає ймовірність виконання відповідної візуальної задачі. Проведено аналіз сучасних підходів щодо оцінки ефективності виконання завдання зі збору даних про ціль, основу яких складають моделі Джонсона та ТТР (Targeting Task Performance, ефективність задачі прицілювання). Пороговий характер зорового сприйняття свідчить про те, що ймовірність виконання візуальної задачі також повинна мати пороговий характер. Тому дво-порогова лінійна апроксимація, запропонована в цій роботі, є більш адекватним модельним представленням, ніж власне сигмоїдні функції, які моделюють ймовірності виконання візуальних задач в рамках моделі Джонсона та моделі ТТР.

Ключові слова: збір інформації про ціль, ефективність візуального завдання, усвідомлення ціле-фонові обстановка.

ВСТУП

На сьогоднішній день намітилась стійка тенденція щодо розроблення та вдосконалення багатоканальних прицільно-спостережних комплексів (БКПСК) на зразках бронетанкового озброєння (БТО) для механізованих і танкових частин та підрозділів Сухопутних військ армій провідних країн світу. Використання різних каналів БКПСК, робота яких базується на різних фізичних принципах, дає можливість проводити повну розвідку, супроводження та знищення ворожих цілей на полі бою на максимальних дальностях (в межах дії основного штатного озброєння зразків БТО) з максимальною ймовірністю цілодобово, у важких метеорологічних умовах та під впливом штучних перешкод противника (термічні і димові завади, аерозолі) [1–6].

БКПСК призначені для збору даних про ворожі цілі противника в інтересах усвідомлення (англ.: situation awareness) ціле-фонові обстановка (ЦФО), супроводження та знищення ворожого БТО на полі бою на граничних дальностях (в межах дії основного штатного озброєння зразків БТО) з максимальною ймовірністю цілодобово, у важких метеорологічних умовах та під впливом штучних перешкод противника (термічні і димові завади, аерозолі). Застосування БКПСК створює можливість завчасно усвідомити ЦФО та випередити противника на ураження. При проектуванні та модернізації БКПСК для оцінки їхньої ефективності використовують критерії якості, які можна розділити на такі групи [7, 8, 14]: критерії якості зображень, сформованих у БКПСК; технічні параметри і характеристики системи; показники ефективності досягнення мети, заради якої створено БКПСК; техніко-економічні показники.

Із зазначених критеріїв найбільш вагомими з точки зору збройного протистояння ворогу видаються перший та поєднання другого і третього.

Із вищезазначеного випливає, що основними характеристиками БКПСК, які характеризують їхню ефективність, є максимальні дальності збору даних про ЦФО та параметри (індекси якості та розмір) отриманого зображення в прицілі (моніторі) навідника-оператора в інтересах усвідомлення ним ЦФО. Усвідомлення ситуації є новітньою концепцією, яка останнім часом набуває широкої популярності в інтерпретації М.Р. Ендслі [9] і ґрунтується на ідеї усвідомлення оператором елементів навколишнього середовища, розуміння їх в контексті змісту поточного завдання і прогнозування майбутнього стану ЦФО [10].

Очевидним є протиріччя між максимально можливою приладною дальністю збору інформації про ЦФО вдень і вночі (особливо у складних метеорологічних умовах та в умовах постановки противником штучних завад), параметрів отриманого зображення на виході з БКПСК в прицілі (моніторі), з одного боку, та дальністю ефективно дії основного штатного озброєння своїх зразків БТО (ЗБТО) під впливом дії штатного озброєння БТО противника, з іншого. Іншими словами, існує протиріччя суттєвої різниці між дальністю ефективного вогню штатних засобів БТО та максимальною дальністю збору інформації в інтересах усвідомлення ЦФО, що в свою

чергу визначається параметрами зображення в моніторі БКПСК. А саме, командир танка не зможе віддати наказ, а навідник-оператор не зможе відкрити вогонь, якщо вони не побачили (не виявили) ціль, або побачили, але не розпізнали, а, в деяких випадках, не ідентифікували ціль. Виявлення (розпізнавання, ідентифікація) цілі на певній дальності стане можливим за умови надійної реєстрації приладами БКПСК корисного сигналу певної величини на фоні шумів від зовнішнього середовища та побудови зображення з певними параметрами. Фактично основними критеріями для оцінки БКПСК є: максимальна дальність ефективної дії основного штатного озброєння, яку забезпечує БКПСК; параметри зображення цілі в окулярі (на моніторі) БКПСК; максимальна дальність надійної реєстрації корисних сигналів приладами БКПСК на фоні шумів від зовнішнього середовища.

На етапі проектування БКПСК використовують *різні підходи* до розрахунку максимальних дальностей збору інформації *для різних каналів* БКПСК, навіть однієї фізичної природи, та оцінки параметрів отриманого зображення в окулярі та на моніторі БКПСК.

Враховуючи зазначене можна констатувати, що на сьогодні актуальними є питання визначення ефективності використання як кожного окремого з каналів БКПСК, так і всього комплексу в цілому, у вигляді аналітичних залежностей таких основних критеріїв БКПСК, як: максимальної дальності збору даних (англ.: data acquisition) навідником-оператором (командиром) зразків БТО про ЦФО; показників отриманого зображення цілі у окулярі навідника-оператора та на моніторі командира зразка БТО в інтересах забезпечення усвідомлення ЦФО навідником-оператором та командиром.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Під час проектування БКПСК використовують три підходи розрахунку максимальних дальностей збору інформації про ЦФО. А саме: перший підхід ґрунтується на визначенні граничної дальності видимості на основі аналітичних залежностей, які враховують як фотометричні, так і технічні характеристики каналу приладу [11, 12]; другий підхід ґрунтується на визначенні ймовірностей виявлення (розпізнавання, ідентифікації) за заданою дальності до ворожої цілі (об'єкту); третій – визначення максимальних відстаней зі збору даних про ворожі цілі із заданими ймовірностями виявлення /розпізнавання / ідентифікації [13]. Перший та другий підходи дозволяють безпосередньо аналізувати дальність дії приладу, однак вони не в повній мірі враховують взаємозалежність таких параметрів, як дальність збору інформації про ЦФО, розміри ворожої цілі та параметри (розмір, якість) зображення ворожої цілі в окулярі (на моніторі) зразків БТО, що і зумовлює мету статті, яка полягає в отриманні аналітичних залежностей для визначення максимальної дальності збору даних (англ.: data acquisition) навідником-оператором (командиром) зразка БТО про ЦФО з врахуванням вище зазначених параметрів для визначення ймовірностей виконання візуальної задачі в інтересах усвідомлення ситуації (англ.: situation awareness) навідником-оператором та командиром зразка БТО.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Характеристики трьохканального БКПСК

Для вирішення задачі збору даних (data acquisition) про ворожі об'єкти на полі бою штатними засобами зразків БТО навідником-оператором (командиром) зразка бронетанкового озброєння необхідно: визначити сектор пошуку ворожих об'єктів та спроб спостереження; зібрати інформацію з БКПСК у вигляді візуального зображення об'єкта під впливом фоново-цільової обстановки; визначити координати об'єкта (місцезнаходження); прийняти рішення щодо виявлення, розпізнавання, ідентифікації цілей.

Розглянемо БКПСК (що встановлюється на танк), до складу якого включено три канали: оптичний, тепловізійний та радіолокаційний. Кожен з каналів може розглядатися як пристрій, що має здатність виявляти цілі, які потрапляють в зону його дії, під впливом зовнішнього середовища на певній відстані з певною ймовірністю.

Оптичний канал

Пошук цілі з використанням оптичного каналу дуже залежить від факторів навколишнього середовища. Критеріями, що визначають можливість ефективного ведення розвідки оптичним каналом, є:

розмір, форма цілі та її дії (нерухома або рухома ціль, ведення нею вогню зі штатного озброєння та наявність інших демаскуючих факторів (активне випромінювання габаритних вогнів, фар та ін.);

відбивання сонячних променів від поверхні цілі;

вплив погодних умов;

відрізок часу та спосіб спостереження за цілью;

контраст цілі на фоні спостереження; при цьому ступінь видимості K_ε об'єкта визначається як відношення спостережуваного контрасту K до порогу контрастної чутливості ε людського ока:

$$K_\varepsilon = \frac{K}{\varepsilon}. \quad (1)$$

Як поріг контрастної чутливості зору приймають найменший спостережуваний контраст об'єкта, що дозволяє розрізнити його на навколишньому фоні. При нефіксованому зорі, тобто в режимі пошуку і виявленні цілі око реагує на появу (зникнення) цілі при пороговому рівні $\varepsilon_{\text{нор}} = 0,04$, при фіксованому зорі – $\varepsilon_{\text{нор}} = 0,02$. Якщо прийняти максимально допустимий контраст за одиницю, то можлива ступінь видимості $0 \leq K_\varepsilon \leq 50$.

Фактично пороговий рівень $\varepsilon_{\text{нор}}$ є тією межею, зменшення/збільшення якої дає можливість виявити/не-виявити (втрапити, пропустити) ціль. Тоді поріг виявлення (англ.: detection) цілі можна представити у такому вигляді

$$\varepsilon_D = (1...3)\varepsilon_{\text{нор}}. \quad (2)$$

Поріг розпізнавання (англ.: recognition) типу виявленого об'єкта

$$\varepsilon_R = (1...3)\varepsilon_{\text{нор}}. \quad (3)$$

Враховуючи роботу [13], можна прийняти поріг ідентифікації (англ.: identification) виявленого об'єкта

$$\varepsilon_I = (6...8)\varepsilon_{\text{нор}}. \quad (4)$$

Гранична дальність видимості через оптичний канал зразка бронетанкового озброєння наземної цілі, яка

враховує як фотометричні характеристики цілей, так і технічні характеристики каналу приладу [13]:

$$L = \Gamma l k \sqrt{0,63} \tau_{np} 10^{-\alpha(L-l)}$$

$$k = \begin{cases} \frac{d_{np}}{d_{zt}} n_{пу} \frac{d_{np}}{d_{zt}} < 1; \\ 1 \text{ при } \frac{d_{np}}{d_{zt}} \geq 1, \end{cases} \quad (5)$$

де L – гранична дальність видимості з даним приладом; l – гранична дальність видимості неозброєним оком, км; d_{np} – діаметр вихідної зіниці (окуляра) приладу, мм; d_{zt} – діаметр зіниці ока, мм; d_{zt} – коефіцієнт, що характеризує прозорість атмосфери в момент спостереження; τ_{np} – коефіцієнт пропускної спроможності оптичного приладу.

Тепловізійний канал

В тепловому діапазоні корисним сигналом й сигналом шуму є значення температури поверхні цілі й навколишнього середовища відповідно, а умова видимості цілі в даному випадку визначається перевищенням різниці цих температур (температурного контрасту) над порогом чутливості тепловізора.

Максимальна дальність виявлення залежить від таких параметрів тепловізора, як: просторова роздільна здатність; енергетична роздільна здатність; функція передачі сигналу; передавальна функція; еквівалентна шуму різниця температур; робочий спектральний діапазон [12, 15, 16].

Максимальна дальність виявлення (МДВ) R_d реальних об'єктів для тепловізійної системи може бути обрахована для двох випадків [15]: коли рішення про наявність об'єкту в полі зору приймає або електронний пороговий пристрій або людина; при цьому при розрахунку МДВ враховуються інтегруючи властивості зорового сприйняття.

Так, МДВ R_d для електронного пристрою ТПСС має вигляд:

$$R_d^2 \exp(k_A R_d) = \frac{A_p \tau_0}{\pi SNR_d \sqrt{A_D \Delta f}} \times$$

$$\times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [A_t \varepsilon_t M_\lambda(\lambda, T_t) - A_b \varepsilon_b M_\lambda(\lambda, T_b)] D^*(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

де A_t – площа об'єкта; A_b – площа фону; T_t – температура об'єкта; T_b – температура фону; A_D – миттєве поле зору; A_p – площа вхідної зіниці об'єктиву; D^* – приведена здатність виявлення; λ – довжина хвилі; Δf – смуга пропускання відеопідсилювача; ε_t – коефіцієнт випромінювання об'єкта; ε_b – коефіцієнт випромінювання фону; SNR_d – відношення сигнал/шум; k_A – коефіцієнт екстинкції при даних умовах атмосфери; M_λ – модуляційна передавальна функція спектральної густини; $\pi \approx 3,14\dots$ – математична константа.

Формула не враховує перетворення сигналу і шуму в електронному тракті, дисплеї, а також закони зорового сприйняття зображення навідником-оператором.

Для розрахунку МДВ цілей навідником-оператором через тепловий канал з врахуванням інтегруючих власти-

востей зорового сприйняття застосовують загальне рівняння:

$$R_d^3 \exp(k_A R) = \frac{\bar{L}_{S,n}}{SNR_d} \left(\frac{2t_0 f_f t_E}{\alpha_D \beta_D A_D} \right)^{0,5} \frac{A_p \tau_0 V_t}{\pi} \times$$

$$\times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [A_t \varepsilon_t M_\lambda(\lambda, T_t) - A_b \varepsilon_b M_\lambda(\lambda, T_b)] D^*(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

де $\bar{L}_{S,n}$ – значення нормованого розподілу яскравості зображення тест об'єкта на екрані дисплея; t_0 – час формування одного елемента розкладу зображення; f_f – частота кадрів; t_E – постійна часу ока; α_D , β_D – кутові розміри чутливого елемента приймача випромінювання; V_t – критичний (найменший) розмір цілі.

Як зазначалося вище, в тепловому діапазоні корисний сигнал визначається значенням температури поверхні цілі, сигнал шуму визначається значенням температури навколишнього середовища, а умова видимості цілі в цьому випадку визначається перевищенням різниці цих температур (температурного контрасту) над порогом чутливості тепловізора.

Для виявлення і розпізнавання об'єктів в роботі [15] введено мінімальну роздільну різницю температур (MPPT, англ.: MRTD від Minimum Resolvable Temperature Difference) та мінімальну чутливу різницю температур (МЧРТ, англ.: MDTD від Minimum Detectable Temperature Difference) відповідно. Обидві функції залежать від просторової частоти об'єкта та еквівалентної шуму різниці температур та вираховуються за формулами:

MPPT:

$$MRTD(v_x) = 0,66 \cdot SNR_r \cdot NETD \frac{\Gamma_s v_x}{M_s v_x} \sqrt{\frac{\alpha_D \beta_D}{\Delta f t_0 f_f t_E}}, \quad (8)$$

МЧРТ:

$$MDTD(\xi_{tp}) = \frac{NETD \cdot SNR_d}{\bar{L}_{S,n}} \left(\frac{\alpha_D \beta_D}{2 \xi_{tp}^2 \Delta f t_0 f_f t_E} \right)^{0,5}, \quad (9)$$

де v_x – просторова частота; $NETD$ – (від англ.: Noise Equivalent Temperature Difference) різниця температур, що є еквівалентною шуму; ξ_{tp} – кутовий розмір штриха тестової міри; SNR_r (від англ.: SNR – Signal to Noise Ratio) – число, яке гарантує із заданою ймовірністю розпізнавання тест-міри на зашумленому фоні; SNR_d – число, яке гарантує із заданою ймовірністю детектування тест-міри на зашумленому фоні; Γ_s – кутове збільшення оптико-електронної системи; M_s – модуляційна передавальна функція вхідного блоку оптико-електронної системи; $\bar{L}_{S,n}$ – значення нормованого розподілу яскравості зображення тест-об'єкта на екрані дисплея.

Радіолокаційний канал

Пошук зразків ворожого бронетанкового озброєння за допомогою активних радіолокаційних станцій (РЛС) досить продуктивний і широко використовується. Це пов'язано з тим, що радіолокаційний канал має відносно великий імпульсний об'єм пошуку і значну дальність виявлення [17]. Однак активне радіолокаційне випромінювання легко визначається контрзасобами противника та може застосовуватися лише тоді, коли

відсутні вимоги щодо скритності та високої мобільності підрозділів.

З енергетичної точки зору максимальна дальність дії РЛС визначається в кінцевому рахунку її здатністю прийняти та зареєструвати корисний сигнал.

Максимальна дальність радіолокаційного виявлення залежить від таких основних параметрів [18 – 20]: потужності передавача та якості передаючої антени, що визначають інтенсивність електромагнітного поля, яке опромінює цілі;

відбиваючої здатності об'єкта, що визначає, яка частина падаючої на нього енергії повернеться до станції;

граничної чутливості приймального пристрою, що характеризує рівень відбитого сигналу, який приймач ще може зареєструвати;

оптичних властивостей зовнішнього середовища, у якому розповсюджуються хвилі; довжини хвилі радіосигналу; тривалості опромінення цілі.

В роботі [21] максимальна дальність радіолокаційного виявлення R_{\max} визначається як:

$$R_{\max}^4 = \frac{P_t G_t S_r \sigma}{(4\pi)^2 P_{\min}}, \quad (10)$$

де G_t – коефіцієнт підсилення антени; P_t – потужність РЛС; σ – ефективна площа розсіювання цілі; P_{\min} – потужність мінімального реєстрованого корисного сигналу.

У випадку спільної антени для передачі та прийому коефіцієнт підсилення G_t та ефективна площа апертури антени S_r пов'язані співвідношенням $G_t = 4\pi S_r / \lambda^2$, де λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання РЛС.

Для надійного виявлення сигналу він повинен перевищувати рівень шуму (в загальному випадку на 10–20 дБ) в тій частині приймача, де приймається рішення про виявлення. Мінімальний корисний виявлений сигнал P_{\min} можна записати у вигляді:

$$P_{\min} = kT_0 B F_n (SNR), \quad (11)$$

де T_0 – стандартна опорна температура; B – ширина смуги пропускання приймача; k – постійна Больцмана; F_n – шум-фактор приймача, SNR – (від англ.: Signal to Noise Ratio) відношення сигнал/шум.

У випадку, коли РЛС виявляє невеликі цілі, що розташовані на поверхні землі, перешкоджаючи відбивання від місцевих предметів істотно обмежують можливість виявлення. Якщо потужність перешкоджаючих відбивань перевищує потужність шумів приймача, то рівняння дальності зводиться до виразу [22]:

$$R_{\max} = \frac{\sigma}{\left(\frac{S}{C}\right)_{\min} \sigma^0 \theta_b c \left(\frac{\tau}{2}\right) \sec \Phi}, \quad (12)$$

де S/C – відношення ефективної площі розсіювання цілі до ефективної площі розсіювання місцевих предметів; σ^0 – нормований коефіцієнт перешкоджаючих відбивань; θ_b – кутова ширина променя в азимутальній площині; \tilde{n} – швидкість розповсюдження радіохвиль; τ – тривалість імпульсу; Φ – кут місця.

Аналіз моделі Джонсона та моделі ТТР

Сучасні підходи до оцінки ефективності виконання завдання зі збору даних про ціль ґрунтуються на мето-

диці, запропонованій Джоном Джонсоном [23]. В якості критерію ефективності виконання завдання з виявлення/розпізнавання/ ідентифікації цілі виступає ймовірність виконання відповідної візуальної задачі:

$$P^{\text{задачи}}(x) = \frac{\left(x/x_{50}^{\text{задачи}}\right)^y}{1 + \left(x/x_{50}^{\text{задачи}}\right)^y}, \quad (13)$$

де індекс величини P вказує на відповідну візуальну задачу виявлення/розпізнавання/ ідентифікації (англ.: detection (D)/recognition (R)/identification (I)) цілі. Вигляд величин x та y залежить від моделі, в якій проводиться розгляд. В оригінальній моделі Джонсона $x = N$ – кількість пар-ліній на візирній лінійці (шкалі) Джонсона, які накладаються на зображення цілі, $x_{50}^{\text{задачи}} = N_{50}^{\text{задачи}}$ – кількість парліній, яка забезпечує 50 % ймовірність виконання відповідної задачі, $y = 2.7 + 0.7(N/N_{50}^{\text{task}})$. За фізичним змістом число N – не що інше, як міра роздільної здатності зображення за шкалою Джонсона. В іншій, більш сучасній моделі [24], назва якої англійською звучить як Targeting Task Performance (ТТР, ефективність задачі прицілювання) $x = V$, $x_{50}^{\text{задачи}} = N_{50}^{\text{задачи}}$, $y = 1.51 + 0.24(V/V_{50})$, де

$$V = \int_{\xi_{\text{cut on}}}^{\xi_{\text{cut off}}} \sqrt{\frac{C_{\text{tgt}}}{CTF_{\text{sys}}(\xi)}} \frac{A_{\text{tgt}}}{R} d\xi. \quad (14)$$

Перевага моделі ТТР у порівнянні з моделлю Джонсона полягає в тому, що інтегральну кількість пар-ліній V можна обчислити із електронного зображення цілі без використання візирної лінійки. Слід зазначити, що використання візирної лінійки вносить суб'єктивний фактор в процес оцінки ефективності виконання візуальної задачі і є перешкодою в комп'ютеризації цього процесу. Величина V , задана рівнянням (14) в моделі ТТР, пов'язана із числом пар ліній N в моделі Джонсона через вираз

$$N = \frac{\sqrt{A_{\text{tgt}}}}{R} \xi_{\text{cut off}}. \quad (15)$$

Величина V_{50} [одиниця вимірювання – пар-ліній] – інтегральна кількість пар-ліній, що забезпечує 50 %-ну ймовірність виконання відповідної візуальної задачі, $\xi_{\text{cut off}}$ [пар ліній] – найвища просторова частота, при якій ще можна розрізнити дану ціль при даному контрасті цілі, $\xi_{\text{cut on}}$ [пар-ліній] – найнижча просторова частота, при якій вже можна розрізнити ціль при даному контрасті цілі, R [км] – дальність до цілі, $\sqrt{A_{\text{tgt}}}$ [м] – характерний розмір цілі, що визначається як квадратний корінь з площі цілі A_{tgt} , C_{tgt} [безрозмірна величина] – ефективний контраст цілі відносно фону, для тепловізійної системи визначається як $C_{\text{tgt}} = \sqrt{\mu_{\text{tgt}}^2 + \sigma_{\text{tgt}}^2} / 2\mu_{\text{brgd}}$, CTF_{sys} – функція порогового контрасту системи, μ_{tgt} – усереднена температура цілі, μ_{brgd} – усереднена температура фону, σ_{tgt} – стандартне відхилення температури цілі.

Із виразу (13) легко бачити, що при $x = x_{50}^{\text{задачи}}$ маємо $P^{\text{задачи}} \Big|_{x=x_{50}^{\text{задачи}}} = 0.5$. В англійській літературі термін “пар-ліній” відповідає терміну “number of cycles”. В сучасній літературі використаний Джонсоном термін “number

of cycles” все частіше замінюється терміном “line pair” [25]. Значення параметра $N_{50}^{задачи}$ є протабульованими для багатьох цілей, у тому числі для зразків бронетанкового озброєння. Зрозуміло, що для задач виявлення/розпізнавання/ідентифікації цілі виконується нерівність

$$N_{50}^D < N_{50}^R < N_{50}^I \quad (16)$$

Із рис. 1 видно, що при 50 %-й ймовірності ідентифікації (I – identification) цілі, тобто, коли $N = N_{50}^I$, ймовірності розпізнавання (R – recognition) та виявлення (D – detection) тієї ж цілі прямують до 1. Аналіз літературних даних показує, що роздільні здатності виявлення N_{50}^D , розпізнавання N_{50}^R та ідентифікації N_{50}^I відносяться як $N_{50}^D : N_{50}^R : N_{50}^I = 1 : 4 : 8$ [25]. Цю властивість проілюстровано на рис. 1, де ймовірність виявлення цілі $P^D(N)$ пораховано для $N_{50}^D = 1$, ймовірність розпізнавання $P^R(N)$ – для $N_{50}^R = 4$ та ймовірність ідентифікації цілі $P^I(N)$ – для $N_{50}^I = 8$ як функцій числа пар-ліній N .

Важливо зазначити, що співвідношення $N_{50}^D : N_{50}^R : N_{50}^I = 1 : 4 : 8$ чисельно співпадає із співвідношенням $\varepsilon_D : \varepsilon_R : \varepsilon_I$ порогових значень видимості, заданих рівняннями (2) – (4), що вказує на те, що кількість ліній $N_{50}^{задачи}$, а звідси і ймовірність виконання візуальної задачі з виявлення/розпізнавання/ідентифікації цілі пов’язані із контрастом K (точніше видимістю K_c) цілі.

Ймовірність виконання завдання зі збору інформації P^A (A – від англ.: acquisition), що включає в себе виявлення, розпізнавання та ідентифікацію, визначається як добуток ймовірностей цих окремих задач [25], тобто:

$$P^A = P^D \cdot P^R \cdot P^I \quad (17)$$

Із рис. 1, видно, що кількість пар-ліній $N = 8$, яка відповідає 50 % ймовірності ідентифікації цілі, забезпечує ймовірність, близьку до 1, для задачі розпізнавання та ще вищу ймовірність виявлення цілі. Як наслідок, для значень кількості пар ліній $N > N_{50}^I$ значення ймовірності збору інформації P^A практично співпадають із значеннями ймовірності ідентифікації P^I . Тому величини P^D та P^R варті уваги лише допоки ймовірність ідентифікації є нижчою, ніж 50 % ($P^I < 0.5$).

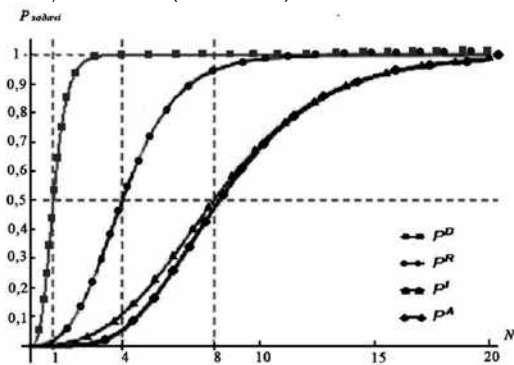


Рис. 1. Ймовірності виявлення $P^D(N)$ – синя тонка лінія, розпізнавання $P^R(N)$ – коричнева тонка лінія та ідентифікації $P^I(N)$ – зелена тонка лінія, пораховані за виразом при $N_{50}^D = 1$, $N_{50}^R = 4$, $N_{50}^I = 8$ та ймовірність виконання завдання збору інформації, порахована за виразом (17)

Введений Джонсом емпіричний параметр $N_{50}^{задачи}$ за своїм фізичним змістом – це розмір зображення цілі, який забезпечує 50 % ймовірність виконання відповідної візуальної задачі. Але очевидним є те, що сам собою певний розмір зображення не може гарантувати певної ймовірності вирішення відповідної візуальної задачі при низьких значеннях контрасту (видимості цілі). І навпаки, самого лише високого контрасту цілі недостатньо для успішного вирішення візуальної задачі: розмір цілі повинен бути достатнім, щоб її можна було виявити/розпізнати/ідентифікувати. Таким чином, при використанні підходу Джонсона неминуче стикаємося з протиріччям. А саме: з одного боку в підході Джонсона приймається, що розмір зображення цілі, що визначається числом $N_{50}^{задачи}$, відповідає 50 % ймовірності виконання відповідної візуальної задачі, в той час, як з іншого боку, зрозуміло, що при низьких значеннях видимості навіть досить значний розмір зображення не забезпечує навіть 50 % ймовірності виконання відповідної візуальної задачі, а при достатньо низьких значеннях видимості цілі ймовірність виконання відповідної візуальної задачі є практично нульовою. В підході Джонсона це протиріччя згладжується у неявному вигляді, вважаючи, що число $N_{50}^{задачи}$, яке визначається з експерименту, залежить від умов видимості цілі. Для різних умов видимості отримують різні значення числа $N_{50}^{задачи}$ для тієї самої цілі. Більше того, число за тих же умов видимості виявляється різним для цілей приблизно того ж розміру. В першу чергу це стосується розпізнавання та ідентифікації цілі. Таким чином, приходимо до висновку, що насправді ймовірність виконання візуальної задачі визначається не розміром зображення цілі, що задається числом $N_{50}^{задачи}$ чи контрастом (видимістю цілі), а їхньою комбінацією. В моделі ТТР ймовірність виконання візуальної задачі визначається за формулою (13), але параметри N та $N_{50}^{задачи}$ замінено відповідно на параметри V та $V_{50}^{задачи}$ так, що величина V визначається за формулою (14). За своїм фізичним змістом V – це інтегральна величина, яка пропорційна добутку квадратного кореня з видимості та розміру зображення (кількості пар ліній). В роботі [26] експериментально показано, що залежність $V(N)$ має лінійний характер, але теоретичного пояснення цього факту не було запропоновано. Нижче ми розв’язуємо цю задачу.

Для того, щоб теоретично оцінити характер залежності $V(N)$, поділимо та помножимо праву частину рівняння (1) на величину інтервалу інтегрування $(\xi_{cut\ off} - \xi_{cut\ on})$. За теоремою про середнє значення визначеного інтеграла існує таке значення ξ_c з інтервалу $[\xi_{cut\ on}, \xi_{cut\ off}]$, що

$$\frac{1}{(\xi_{cut\ off} - \xi_{cut\ on})} \int_{\xi_{cut\ on}}^{\xi_{cut\ off}} \sqrt{\frac{C_{tgt}}{CTF_{sys}(\xi)}} d\xi = \chi \quad (18)$$

Тобто величина $\chi = \sqrt{\frac{C_{tgt}}{CTF_{sys}(\xi_c)}}$ – не що інше, як середнє значення інтеграла

$$TTP = \int_{\xi_{cut\ on}}^{\xi_{cut\ off}} \sqrt{\frac{C_{tgt}}{CTF_{sys}(\xi)}} d\xi \quad (19)$$

який стоїть у правій частині рівняння (14) і який в роботі [13] позначається як величина TTP . Тоді, врахувавши рівняння (15), формулу (14) можна переписати у вигляді:

$$V = \chi N - V^{(0)}, \quad (20)$$

де $V^{(0)} = \chi(\sqrt{A_{tgt}/R})\xi_{cut on}$. Таким чином, із рівняння (20) видно, що величину V , введenu в моделі ТТР, справді можна лінійно пов'язати із кількістю пар ліній N в моделі Джонсона, що узгоджується із експериментальною залежністю $V(N)$, отриманою в роботі [26]. Важливо зазначити, що коефіцієнт χ тим більший, чим більша видимість цілі. Тобто ймовірність виконання візуальної задачі тим вища, чим більший розмір зображення цілі N і чим вища видимість цілі.

Експериментальні дані, отримані в роботі [26], вказують на те, що V_{50} можна вважати пов'язаним із N_{50} приблизним співвідношенням $V_{50}^{задачі} \approx 2.7 N_{50}^{задачі}$, для всіх трьох задач виявлення, розпізнавання та ідентифікації. Величини V_{50} та N_{50} були встановлені для того ж самого набору зображень із залежностей $P^{задачі}(V)$ та $P^{задачі}(N)$.

Цікаво, що апроксимацією експериментальних даних [26], показаних кружальцями на рис. 2, залежністю $V(N)$, заданою рівнянням (20), показаною суцільною лінією на рис. 2, отримуємо, що коефіцієнт $\chi = 5.4$, в той час як в роботі [26] величини V_{50} та N_{50} пов'язані через коефіцієнт, рівний 2.7. Однак, протиріччя у цих двох результатах немає.

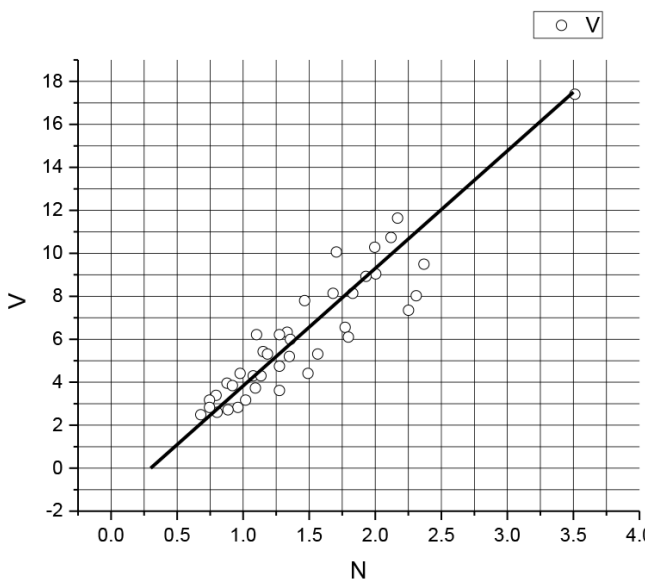


Рис. 2. Ілюстрація апроксимації експериментальних даних [26] (кружальця) рівнянням (20) – суцільна пряма лінія

По-перше, із рівняння (20) видно, що коефіцієнт χ визначається як похідна $\chi = dV/dN$, а не як відношення V/N . По-друге, із експериментальних даних $V(N)$ [26] отримуємо, що величина $V^{(0)}$ в рівнянні (20) не є нульовою.

Із цих даних ми отримали $V^{(0)} \approx 1.5$ як довжину відрізка, який відсікає екстраполяційна пряма (20) на верти-

кальній осі V та $N^{(0)} \approx 0.2$ як абсцису точки перетину цієї ж прямої з горизонтальною віссю N . Для того, щоб зрозуміти, як пов'язані між собою V/N та V_{50}/N_{50} , слід прирівняти вирази для $P^{задачі}(V)$ та $P^{задачі}(N)$:

$$P^{задачі}(V) = \frac{\left(\frac{V}{V_{50}^{задачі}}\right)^{b_V + c_V \left(\frac{V}{V_{50}^{задачі}}\right)}}{1 + \left(\frac{V}{V_{50}^{задачі}}\right)^{b_V + c_V \left(\frac{V}{V_{50}^{задачі}}\right)}}, \quad (21)$$

при цьому $b_V = 1.51$, $c_V = 0.24$.

$$P^{задачі}(N) = \frac{\left(\frac{N}{N_{50}^{задачі}}\right)^{b_N + c_N \left(\frac{N}{N_{50}^{задачі}}\right)}}{1 + \left(\frac{N}{N_{50}^{задачі}}\right)^{b_N + c_N \left(\frac{N}{N_{50}^{задачі}}\right)}}, \quad (22)$$

при цьому $b_N = 2.7$, $c_N = 0.7$.

Прирівнюючи вирази (21) та (22), отримуємо

$$\left(\frac{V}{V_{50}^{задачі}}\right)^{b_V + c_V \left(\frac{V}{V_{50}^{задачі}}\right)} = \left(\frac{N}{N_{50}^{задачі}}\right)^{b_N + c_N \left(\frac{N}{N_{50}^{задачі}}\right)} \quad (23)$$

Метод розв'язку рівняння (23), який дав би можливість виразити в аналітичній формі відношення (V/N) через відношення $V_{50}^{задачі}/P_{50}^{задачі}(V)$, є невідомим. Тому скористаємося для цього наближенням, яке ґрунтується на спільній властивості ймовірностей $P^{задачі}(V)$ та $P^{задачі}(N)$ як сигмоїдних функцій.

Ймовірність виконання візуальної задачі як сигмоїдна функція

Із рис. 1 видно, що залежності ймовірностей $P^{задачі}(N)$ та $P^{задачі}(V)$ виконання візуальних задач від N та V символічно задані рівнянням (13), а у явній формі відповідно рівняннями (22) та (21), мають S-подібну форму, характерну для сигмоїдних функцій [27].

Найбільш відомими та використовуваними в літературі сигмоїдними функціями є логістична функція $f(x) = 1/(1 + e^{-x}) = e^x/(e^x + 1)$, арктангенс $f(x) = \arctg[x]$, гіперболічний тангенс $f(x) = \operatorname{th}[x] = (e^x - e^{-x})/(e^x + e^{-x})$, функція помилки $f(x) = \operatorname{erf}(x) = (2/\sqrt{\pi}) \int_0^x e^{-t^2} dt$, раціональна сигмоїда $f(x) = x/(1+x)$ та ін. Функцію ймовірності виконання візуальних задач, задану рівнянням (13), можна класифікувати як раціонально-показникову сигмоїду виду

$$f(x) = \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{b+c \frac{x}{a}}}{1 + \left(\frac{x}{a}\right)^{b+c \frac{x}{a}}}, \quad (24)$$

де параметри a , b , c – деякі константи. Зокрема, в емпіричній Джонсовій функції ймовірності виконання візуальної задачі замість $f(x)$ маємо $P(N)$, замість a маємо $a_N = N_{50}^{задачі}$, замість b маємо $b_N = 2.7$ і замість c маємо $c_N = 0.7$. В моделі ТТР відповідно замість $f(x)$ підставляємо $P(V)$, замість a підставляємо $a_V = V_{50}^{задачі}$, замість b підставляємо $b_V = 1.51$ і замість c підставляємо $c_V = 0.24$. Характерною особливістю всіх сигмоїдних функцій є наявність двох асимптот. Якщо область значень сиг-

моїди обмежена 0 та 1, то асимптотами є $f = 0$ знизу та $f = 1$ (чи еквівалентно $f = 100\%$) зверху. Ще однією особливістю сигмоїдних функцій є наявність точки перегину $f(x_{50}) = 1/2$ (чи еквівалентно $f(x_{50}) = 50\%$, чим і пояснюється позначення x_{50}), в якій форма кривої $f(x)$ змінюється від вгнутої при $x < x_{50}$ до випуклої при $x > x_{50}$. В точці перегину $x = x_{50}$ друга похідна функції $d^2 f(x)/dx^2|_{x=x_{50}} = 0$ та змінює позитивний знак при $x < x_{50}$ на негативний при $x > x_{50}$. S-подібна форма сигмоїдної функції $f(x)$ передбачає, що в інтервалах $[0, x_0]$ та $[x_{100}, \infty]$ значення функції змінюються дуже слабо, в той час як в інтервалі $[x_0, x_{100}]$ між цими “пороговими” значеннями функція змінюється стрімко (рис. 3). В інтервалі $[0, x_0]$ значення сигмоїдної функції близькі до 0, а в інтервалі $[x_{100}, \infty]$ вони близькі до 1. Порогові значення не є чітко визначеними, але їхні значення можуть бути встановлені, наприклад, методом двох дотичних. В літературі є численні приклади використання такого підходу до визначення порогу фізичного ефекту, як це робиться, наприклад, при визначенні порогової напруги переходу Фредерікса в нематичних рідких кристалах [28], при визначенні порогу лазерної генерації [29], порогової концентрації у фізичній хімії [30], порогової відгуку у нейронних мережах [31], порогового контрасту із залежності гостроти зору (англ. visual acuity) від освітленості, що описується функцією порогового контрасту STFsys [24], яка фігурує у формулі (14). Спільним для всіх цих прикладів із різних галузей досліджень є те, що функціональна залежність, яка вивчається в кожному з цих випадків, є сигмоїдною функцією, яка має двопороговий характер. В літературі використовують заміну сходинчастої функції сигмоїдною функцією або її лінійною апроксимацією. Лінійна апроксимація сигмоїдної функції використовується, наприклад, при моделюванні штучних нейронних мереж. Лінійна апроксимація сигмоїдної функції вважається високо ефективним засобом підвищення швидкості комп’ютерних обчислень практично без відчутних втрат у точності. Модельну функцію, яка лінійно апроксимує сигмоїдну функцію в околі нижнього порогу, називають функцією активації ReLU (від англ. Rectified Linear Unit) [32]. Порогове значення функції активації також визначається методом двох дотичних.

Порогові значення x_0 та x_{100} сигмоїдної функції $f(x)$, заданої виразом (12), визначатимемо як абсциси точок перетину прямої, що апроксимує поведінку функції $f(x)$ в околі точки перегину $f(x_{50})$ з асимптотами $f = 0$ та $f = 1$ (чи еквівалентно $f = 100\%$), як це проілюстровано на рис. 3.

Застосовуючи вище викладене до функцій ймовірностей виконання візуальних задач, заданих рівнянням (13), зазначимо, що із вигляду кривих $P^D(N)$, $P^R(N)$, $P^I(N)$, $P^A(N)$, приведених на рис. 1 та на рис. 4 у логарифмічному масштабі осі абсцис, видно, що ймовірності виконання візуальних задач справді мають двопороговий характер.

Тобто для всіх цих кривих можна встановити нижній $N_0^{задачи}$ та верхній $N_{100}^{задачи}$ пороги числа пар ліній. Нижче порогу $N_0^{задачи}$ та вище порогу $N_{100}^{задачи}$ ймовірність виконання візуальної задачі залежить від числа пар ліній N

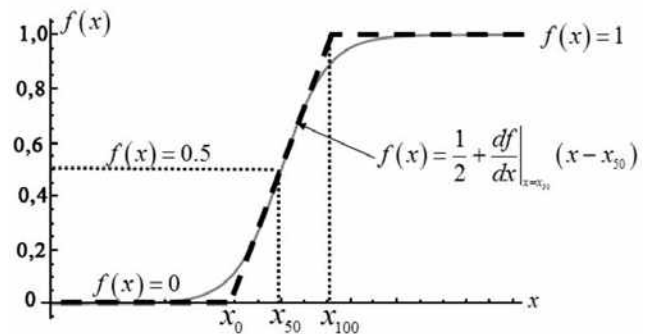


Рис. 3. Схематична ілюстрація лінійної двопорогової апроксимації сигмоїдної функції $f(x)$

дуже слабо, а в інтервалі $[N_0^{задачи}, N_{100}^{задачи}]$ змінюються майже за лінійним законом.

Наприклад, для значень $N < 0.2$ ймовірності виявлення, розпізнавання та ідентифікації можна вважати нульовими. Ймовірність розпізнавання можна вважати нульовою для значень $N < 1$, ймовірність ідентифікації слабо відрізняється від нуля при $N < 2$, а ймовірність виконання завдання зі збору інформації залишається практично нульовою при $N < 3$. Подібно для значень, що відповідають ймовірностям, близьким до 1, маємо, що ймовірність є майже 100 %-ю для задачі виявлення, якщо $N > 2$, для задачі розпізнавання – якщо $N > 10$, для задачі ідентифікації – якщо $N > 15$. При $N > 15$ ймовірність виконання завдання зі збору інформації про ціль стає майже 100 %-ю.

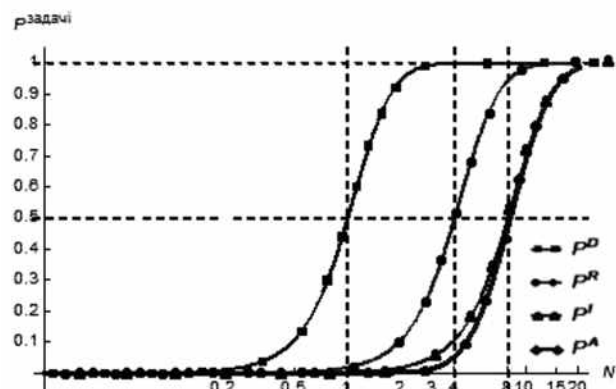


Рис. 4. Представлення даних, поданих на рис. 1, в логарифмічному масштабі осі абсцис

Вживаючи вираз “майже 100 %-на” ймовірність, приймаємо до уваги те, що фактично різниця між значеннями ймовірності виявлення, наприклад $P^D(N)|_{N=2} = 0.945$ та $P^D(N)|_{N=3} = 0.995$ є несуттєвою з точки зору практичного використання цих значень в процесі збору інформації про ціль, і тим більше між значеннями $P^D(N)|_{N=3} = 0.995$ та $P^D(N)|_{N=4} = 0.999$. Подібне має місце на увазі і для виразу “майже нульова” ймовірність. Враховуючи те, що ймовірності виконання візуальних задач як функції числа пар ліній N помітно змінюються лише у певних інтервалах значень N , у відповідності до властивостей сигмоїдних функцій, визначимо нижній $N_0^{задачи}$ та

верхній $N_{100}^{задачи}$ пороги. Серединою інтервалу $[N_0^{задачи}, N_{100}^{задачи}]$, в якому значення ймовірності суттєво залежать від N , є значення $N = N_{50}^{задачи}$, яка є точкою перегину сигмоїдної функції $P^{задачи}(N)$. Розклавши залежність, задану рівнянням (22), в ряд Тейлора в околі точки $N = N_{50}^{задачи}$, отримаємо рівняння, яке є лінійною апроксимацією рівняння (22) в інтервалі $[N_0^{задачи}, N_{100}^{задачи}]$:

$$P^{задачи}(N) \approx \frac{1}{2} + \frac{b_N + c_N}{4N_{50}^{задачи}}(N - N_{50}^{задачи}). \quad (25)$$

Подібно для залежності $P^{задачи}(V)$ отримуємо:

$$P^{задачи}(V) \approx \frac{1}{2} + \frac{b_V + c_V}{4V_{50}^{задачи}}(V - V_{50}^{задачи}). \quad (26)$$

Прирівнявши вираз (25) до нуля та до одиниці, отримаємо відповідно нижній поріг $N_0^{задачи}$ та верхній поріг $N_{100}^{задачи}$ чутливості ймовірності виконання візуальної задачі:

$$N_0^{задачи} = \left(1 - \frac{2}{b_N + c_N}\right) N_{50}^{задачи}. \quad (27)$$

$$N_{100}^{задачи} = \left(1 + \frac{2}{b_N + c_N}\right) N_{50}^{задачи}. \quad (28)$$

Таким чином, рівняння (22) можна замінити його лінійною апроксимацією

$$P^{задачи}(N) \approx \begin{cases} 0, & \text{при } N < N_0^{задачи}; \\ \frac{1}{2} + \frac{b_N + c_N}{4} \left(\frac{N}{N_{50}^{задачи}} - 1\right), & \text{при } N_0^{задачи} < N < N_{100}^{задачи}; \\ 1, & \text{при } N > N_{100}^{задачи}. \end{cases} \quad (29)$$

Для значень $b = 2.7$ та $c = 0.7$ відповідно до оригінальної формули Джонсона рівняння (27) – (29) переписуться у вигляді

$$N_0^{задачи} = 0.4N_{50}^{задачи}; N_{100}^{задачи} = 1.6N_{50}^{задачи},$$

$$P^{задачи}(N) \approx \begin{cases} 0, & \text{при } N < N_0^{задачи}; \\ \frac{1}{2} + 0.85 \left(\frac{N}{N_{50}^{задачи}} - 1\right), & \text{при } N_0^{задачи} < N < N_{100}^{задачи}; \\ 1, & \text{при } N > N_{100}^{задачи}. \end{cases} \quad (30)$$

Для ТТР моделі відповідно отримуємо:

$$P^{задачи}(V) \approx \begin{cases} 0, & \text{при } V < V_0^{задачи}; \\ \frac{1}{2} + \frac{b_V + c_V}{4} \left(\frac{V}{V_{50}^{задачи}} - 1\right), & \text{при } V_0^{задачи} < V < V_{100}^{задачи}; \\ 1, & \text{при } V > V_{100}^{задачи}. \end{cases} \quad (31)$$

де

$$V_0^{задачи} = \left(1 - \frac{2}{b_V + c_V}\right) V_{50}^{задачи};$$

$$V_{100}^{задачи} = \left(1 + \frac{2}{b_V + c_V}\right) V_{50}^{задачи}. \quad (32)$$

В рамках ТТР моделі $b_V = 1.51$, $c_V = 0.24$, тому відповідно матимемо:

$$V_0^{задачи} = 0.14V_{50}^{задачи}; V_{100}^{задачи} = 2.14V_{50}^{задачи},$$

$$P^{задачи}(V) \approx \begin{cases} 0, & \text{при } V < V_0^{задачи}; \\ \frac{1}{2} + 0.44 \left(\frac{V}{V_{50}^{задачи}} - 1\right), & \text{при } V_0^{задачи} < V < V_{100}^{задачи}; \\ 1, & \text{при } V > V_{100}^{задачи}. \end{cases} \quad (33)$$

Залежності $P^D(N)$, $P^R(N)$, $P^I(N)$ та їхні лінійні апроксимації в логарифмічному масштабі горизонтальної осі наведені на рис. 5.

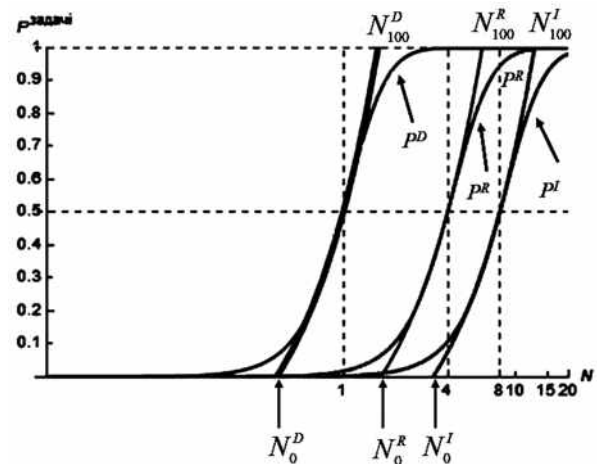


Рис. 5. Залежності $P^D(N)$, $P^R(N)$, $P^I(N)$ та їхні лінійні апроксимації в логарифмічному масштабі горизонтальної осі

Для того щоб оцінити величину відхилення ΔP між формулою (22) та її лінійною апроксимацією (30), ми обчислили абсолютне відхилення між ними (рис. 6), із якого видно, що абсолютне відхилення ΔP не перевищує 0.1 для малих значень ймовірностей та -0.2 для значень ймовірностей, близьких до 1.

Приймаючи до уваги те, що абсолютна точність експериментального вимірювання ймовірності виконання візуальної задачі не є кращою, ніж 20 %, запропонована апроксимація є цілком прийнятною.

Крім того важливо зазначити, що на експериментальних вимірних залежностях, як правило, реєструються значення, що лягають на лінійну ділянку кривої і не більше, ніж по одній точці зверху та знизу залежності, які лягають на ділянки, де ця залежність мала б бути суттєво нелінійною [33], що також свідчить на користь

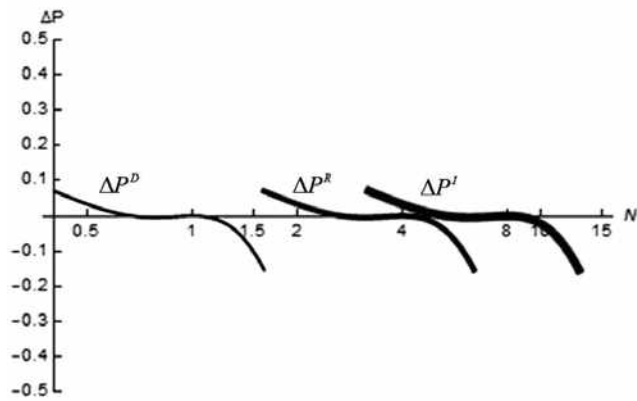


Рис. 6. Абсолютне відхилення лінійної апроксимації (30) від її точного представлення (22) для задач виявлення ΔP^D , розпізнавання ΔP^R та ідентифікації ΔP^I як функції числа пар ліній N

апроксимації сигмоїдної поведінки, заданої рівнянням (13), лінійною двопороговою залежністю (30).

Запропонований Джонсоном вираз для ймовірності вирішення візуальної задачі як функції кількості пар ліній, заданий рівнянням (13), чи у явній формі рівнянням (22), є емпіричною залежністю. Хоча ця залежність добре зарекомендувала себе для опису експериментальних даних, ніякого фізичного змісту, який стояв би за саме таким виглядом $P^{задачі}(N)$, немає. Те, що вираз (13) непогано описує експериментальні дані, пов'язано з тим, що функція (13) належить до класу сигмоїдних функцій. З таким же успіхом емпірично для цього можна було б застосувати будь-яку із сигмоїдних функцій. На рис. 7 приведено графік ймовірності детектування цілі, порашований за формулою (13) при $x_{50} = 1$ та логістичної функції, із якого видно, що

$$f(x) = \frac{0.85 \exp[3.5(x-1)]}{1 + 0.85 \exp[3.5(x-1)]},$$

ці дві функції добре накладаються одна на одну. Подібне можна показати для інших сигмоїдних функцій.

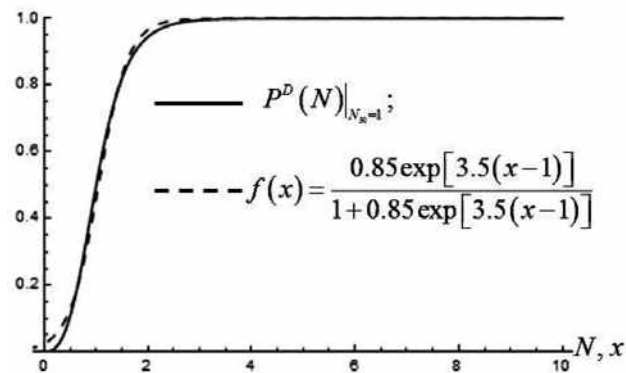


Рис. 7. Графіки сигмоїдних функцій: $P^D(N)$, заданої рівнянням (10) при $N_{50} = 1$ та логістичної функції $f(x)$, заданої рівнянням, вказаним на рисунку

Деякі із сигмоїдних функцій використовуються в теорії ймовірності. Наприклад функція помилки

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (34)$$

описує ймовірність того, що певна подія не відбудеться. Доповнююча до неї функція

$$\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt \quad (35)$$

використовується для опису ймовірності виявлення цілі як функції часу спостереження [34]. Ймовірність виявлення цілі на відстані R , що знаходиться в інтервалі $a < R < b$,

$$P(a < R < b) = \frac{2}{\sqrt{\pi}\sigma} \int_a^b e^{-\frac{(R-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (36)$$

також теоретично виводиться через функцію помилки (тут σ – середньо-квадратичне відхилення [м], m – математичне очікування [м]).

Підсумовуючи цей параграф зазначимо, що використовуючи викладені вище властивості ймовірностей виконання візуальних задач як сигмоїдних функцій, маємо всі необхідні інгредієнти для того, щоб теоретично оцінити параметр χ у виразі (20) та порівняти його із значенням $\chi = 5.4$, отриманим нами вище із експериментальних даних [26], представлених на рис. 2.

Теоретична оцінка параметра χ

Прирівнявши вирази (25) та (26), отримуємо

$$V = \frac{b_N + c_N}{b_V + c_V} \frac{V_{50}^{задачі}}{N_{50}^{задачі}} N - \left(\frac{b_N + c_N}{b_V + c_V} - 1 \right) V_{50}^{задачі} \quad (37)$$

Порівнявши вирази (25) та (8), знаходимо

$$\chi = \frac{b_N + c_N}{b_V + c_V} \frac{V_{50}^{задачі}}{N_{50}^{задачі}} \quad (38)$$

Підставивши значення $b_N = 2.7$, $c_N = 0.7$, $b_V = 1.51$, $c_V = 0.24$, у вираз, отримуємо:

$$\chi \approx 2 \frac{V_{50}^{задачі}}{N_{50}^{задачі}} \quad (39)$$

Підставивши експериментально отримане значення $V_{50}^{задачі} / N_{50}^{задачі}$ [26] у вираз (39), отримуємо значення $\chi = 5.4$, що співпадає із значенням χ , яке ми отримали апроксимацією виразом (20) експериментальних даних, представлених на рис. 2.

Слід зауважити, що порівняння виразів (37) та (20) передбачає можливість визначення параметра $V^{(0)}$, який відповідає умові $N = 0$, тобто значення $V^{(0)}$ рівне довжині відрізка, який відтинає апроксимаційна пряма (20) на вертикальній осі V та параметра $N^{(0)}$, який відповідає умові $V = 0$, тобто значення $N^{(0)}$ рівне довжині відрізка, який відтинає апроксимаційна пряма (20) на горизонтальній осі. Але, враховуючи те, що для того, щоб розв'язати рівняння (23), ми користуємося властивістю сигмоїдної функції відповідно до якої залежності $P^{задачі}(N)$ та $P^{задачі}(V)$ апроксимуються лінійними функціями лише в інтервалах відповідно $[N_0, N_{100}]$ та $[V_0, V_{100}]$ (див. рівняння (29) та (31)), то використовувати ці лінійні апроксимації за межами цих інтервалів при $N \rightarrow 0$ (для того, щоб визначити $V^{(0)}$) та при $V \rightarrow 0$ (для того, щоб визначити $N^{(0)}$) було б некоректним. Крім того не варто визначати значення $N^{(0)}$ та $V^{(0)}$ ще й тому, що

експериментальні дані залежності $V(N)$ для $N \rightarrow 0$ та $V \rightarrow 0$ відсутні. Важливо зазначити, що ці дані відсутні тому, що поміряти їх в принципі неможливо через те, що внаслідок порогового характеру зорового сприйняття людини функція ймовірності $P(N)$ також повинна б мати пороговий характер, а отже, для значень $N < N_0$ ймовірність виконання візуальної задачі в експерименті повинна бути практично нульовою. Пороговий характер зорового сприйняття людини проявляється в тому, що цілі (при візуальному спостереженні) чи їхні зображення (при спогляданні на моніторі приладу спостереження) можуть бути виявлені оператором лише при умові, що розмір та контраст при достатній тривалості зображення цілі є більшими, ніж відповідні порогові величини, що пов'язані із пороговим характером зорового сприйняття людини. Цим пояснюється те, що в інтервалі від нуля до певного порогового значення експериментальні значення для $P(N)$ відсутні. В цій роботі значення нижнього порогу N_0 при лінійній апроксимації сигмоїдної функції пропонуються прийняти як таке порогове значення.

Враховуючи те, що внаслідок порогового характеру зорового сприйняття людини ймовірність вирішення візуальної задачі також повинна мати пороговий характер, приходимо до висновку, що двопорогові лінійні апроксимації сигмоїдної функції, задані рівняннями (29) і (31), є більш обґрунтованими для опису ймовірностей виконання візуальної задачі, ніж самі сигмоїдні функції, задані рівняннями (21) і (22). Нагадаємо, що формули (21) і (22) є емпіричними залежностями, які задовільно описують експеримент, але їхній плавний характер не узгоджується із пороговим характером зорового сприйняття людини. В свою чергу, зорове сприйняття людини базується на реакції закінчень зорових нервів. Відгук кожного окремого нейрона є по-перше, пороговим, по-друге, не плавним, як це задає сигмоїдна функція, а у формі сходинки від 0 до 1. У зв'язку з тим, що така функція є недиференційованою в точці порогу, де існує розрив, її комп'ютерне моделювання є незручним. Тому при моделюванні нейронних мереж вдаються до апроксимації відгуку кожного окремого нейрона сигмоїдною функцією. Тобто, сигмоїдна функція є апроксимацією сходинкової функції при моделюванні нейронних мереж. Відгук центральної нервової системи на колективний сигнал від сукупності нейронів носить ймовірносний характер, що передбачає плавну зміну ймовірності в межах від 0 до 1 в певному інтервалі інтенсивності колективного сигналу достатньої тривалості. При цьому пороговий характер відгуку окремого нейрона передбачає пороговий характер і для колективного відгуку сукупності нейронів. Тому для моделювання ймовірності вирішення візуальної задачі будь-яка сигмоїдна функція буде хоча і зручним, але гіршим наближенням у порівнянні із сходинковою функцією, наприклад функцією типу функції активації ReLU [32]. Дво-порогові апроксимації (29) для $P_{задачі}(N)$ та (31) для $P_{задачі}(V)$ сигмоїдних функцій відповідно (21) та (22) в такому разі є більш адекватними модельними представленнями, ніж власне сигмоїдні функції (21) та (22).

Рівняння (14) (і відповідно рівняння (20)) було отримане для виявлення цілі за допомогою приладів спосте-

реження, зокрема за допомогою тепловізора. Оскільки підкореневи вираз рівняння (20) є не що інше, як видимість об'єкта за допомогою тепловізора, то при візуальному спостереженні у видимому діапазоні відношення C_{tgt}/CTF_{sys} слід замінити видимістю об'єкта V_ϵ , заданою виразом (1), а тому отримуємо:

$$V = N \sqrt{K_\epsilon}. \quad (40)$$

Визначення ефективності вирішення візуальної задачі БКПСК зразка БТО

Не вдаючись у фізичні принципи дії каналів БКПСК, можна констатувати, що кожен з каналів, як прилад ведення розвідки, призначений для збору даних (англ.: data acquisition) про ворожі цілі на полі бою.

Під пошуком цілей противника розуміється фізичний процес цілеспрямованого обстеження визначеної області (сектора) простору для виявлення об'єктів, що там знаходяться. Під час пошуку накопичується інформація про цілі та навколишні предмети та середовище (фоново-цільова обстановка). На основі зібраної інформації після візуалізації отриманих даних під час пошуку на екрані монітора (в окулярі приладу спостереження) відображається ЦФО, на основі якої навідником-оператором та командиром зразка БТО приймається рішення щодо виявлення/невиявлення цілі.

Фактично, ефективність роботи БКПСК залежить від спроможності збору інформації на дальностях, не менших від дальностей дії основного озброєння БТО під впливом зовнішнього середовища в інтересах найшвидшого прийняття рішення щодо виявлення/розпізнавання/ідентифікації цілі.

На величину максимальної дальності R виявлення/розпізнавання/ідентифікації БКПСК ворожих цілей будуть мати величезний вплив тактико-технічні характеристики БКПСК, характер дій самої ворожої цілі (активна, пасивна) та способи приладного пошуку цілей, а також наступні фактори: стан ЦФО; погодно-кліматичні умови (температура, тиск, вітер, вологість повітря, дальність видимості, опади, хмарність), які зональні за своєю появою і взаємопов'язані та мають величезний вплив на умови поширення фізичних полів (сигналів) на трасі розповсюдження сигналів, а також суттєвий вплив матиме присутність зовнішніх джерел випромінювання.

В моделі ТТР ймовірність $P_{задачі}(V)$ виконання візуальної задачі спадає зі збільшенням дальності до цілі за законом (21) з урахуванням залежності (20). Введення двопорогової лінійної апроксимації дозволяє ввести поняття порогу ненульової ймовірності виконання візуальної задачі. Нижньому пороговому значенню $V_0^{задачі}$, заданому виразом (33), відповідає певне значення відстані до цілі $R_{max}^{задачі}$, вище якого ймовірність виконання візуальної задачі стає нульовою. Нижнє порогове значення виражається через, як:

$$V_0^{задачі} = \chi \frac{\sqrt{A_{tgt}}}{R_{max}^{задачі}} (\xi_{cut\ off} - \xi_{cut\ on}). \quad (41)$$

Підставивши $V_0^{задачі}$ із рівнянням у вираз (41), знайдемо $R_{max}^{задачі}$ у формі:

$$R_{\max}^{\text{задачи}} = \chi \frac{\sqrt{A_{\text{тгр}}}}{0.14V_{50}^{\text{задачи}}} (\xi_{\text{cut off}} - \xi_{\text{cut on}}) \approx \approx 38 \frac{\sqrt{A_{\text{тгр}}}}{V_{50}^{\text{задачи}}} (\xi_{\text{cut off}} - \xi_{\text{cut on}}). \quad (42)$$

ВИСНОВКИ

Критерієм ефективності виконання завдання зі збору даних про ціль виступає ймовірність виконання візуальної задачі з виявлення/розпізнавання/ідентифікації цілі. Сучасні підходи до оцінки ефективності виконання завдання зі збору даних про ціль ґрунтуються на методиці, запропонованій Джонсоном [23]. Поряд із зручністю та непоганою узгодженістю із експериментом суттєвим недоліком цієї моделі є те, що модельний розмір зображення $N_{50}^{\text{задачи}}$, який забезпечує 50 %-ну ймовірність виконання відповідної задачі, виявляється залежним від видимості цілі. Залежність ця емпірична, а тому передбачає різні значення $N_{50}^{\text{задачи}}$ для різних умов спостереження, які повинні бути протабульованими для того, щоб цим методом можна було користуватися на практиці. Цей недолік усунуто в моделі ТТР, в якій параметр $N_{50}^{\text{задачи}}$ та змінну N замінено на параметр $V_{50}^{\text{задачи}}$ та змінну V , яка в аналітичній формі визначається через інтегральну видимість та розмір зображення цілі. Експеримент [26] виявив лінійну залежність між інтегральною кількістю пар ліній V в моделі ТТР та кількістю пар ліній N в моделі Джонсона, але теоретичне пояснення цього факту відсутнє. В цій роботі теоретично показано, що змінні V та N справді пов'язані лінійною залежністю $V = \chi N - V^{(0)}$. Оцінка коефіцієнта χ приводить до необхідності розв'язування рівняння з показниковими функціями, розв'язок якого в явному вигляді невідомий. Для вирішення цієї математичної проблеми ми скористалися властивістю, відповідно до якої в обох моделях (Джонсона та ТТР) ймовірність виконання візуальної задачі є сигмоїдною функцією, що в свою чергу передбачає можливість апроксимації функції ймовірності лінійною залежністю в інтервалі між двома пороговими значеннями $[N_0, N_{100}]$ у моделі Джонсона та в інтервалі $[V_0, V_{100}]$ у моделі ТТР. Для визначення відповідних нижніх (N_0, V_0) і верхніх (N_{100}, V_{100}) порогових значень запропоновано використовувати метод двох дотичних. Середніми значеннями інтервалів $[N_0, N_{100}]$ та $[V_0, V_{100}]$ є відповідно $N_{50}^{\text{задачи}}$ та $V_{50}^{\text{задачи}}$, в околі яких проводимо розклад в ряд Тейлора для визначення відповідних лінійних апроксимаційних функцій ймовірностей. Показано, що для практичних цілей замість точних, але громіздких і складних для аналізу функцій ймовірностей $P^{\text{задачи}}(N)$ та $P^{\text{задачи}}(V)$ зручніше користуватися їхніми лінійними наближеннями. Тобто плавна сигмоїдна функція ймовірності виконання візуальної задачі замінюється на двопорогову сходиначасту функцію, яка в інтервалі $[0, N_0^{\text{задачи}}]$ чи $[0, V_0^{\text{задачи}}]$ до нижнього порогового значення рівна нулю, в інтервалі $[N_{100}^{\text{задачи}}, \infty]$ чи $[V_{100}^{\text{задачи}}, \infty]$ вище верхнього порогового значення рівна одиниці, а в інтервалі $[N_0^{\text{задачи}}, N_{100}^{\text{задачи}}]$ чи $[V_0^{\text{задачи}}, V_{100}^{\text{задачи}}]$ між верхнім та нижнім порогами змінюється за лінійним законом. Показано, що відхилення цих апроксимованих

значень від їхніх точних значень не перевищує похибки вимірювання експериментальних значень для побудови залежностей $P^{\text{задачи}}(N)$ та $P^{\text{задачи}}(V)$. Більш того, внаслідок фізичних обмежень на роздільну здатність приладів спостереження, реальні зображення цілі практично не дають можливості експериментально перевірити хід залежностей $P^{\text{задачи}}(N)$ та $P^{\text{задачи}}(V)$ в інтервалі $[0, N_0^{\text{задачи}}]$ чи $[0, V_0^{\text{задачи}}]$ до нижнього порогу та в інтервалі $[N_{100}^{\text{задачи}}, \infty]$ чи $[V_{100}^{\text{задачи}}, \infty]$ над верхнім пороговим значенням функції $P^{\text{задачи}}(N)$ чи $P^{\text{задачи}}(V)$, відповідно. Цей факт ще раз підтверджує резонність використання лінійних наближень і замість точних формул (21) і (22). Скориставшись цими лінійними апроксимаціями, отримано аналітичний вираз, $\chi = \frac{b_N + c_N}{b_V + c_V} \frac{V_{50}^{\text{задачи}}}{N_{50}^{\text{задачи}}}$ який пов'язує коефіцієнт χ із параметрами $b_N = 2.7, c_N = 0.7, N_{50}^{\text{задачи}}$ у моделі Джонсона та $b_V = 1.51, c_V = 0.24, V_{50}^{\text{задачи}}$ у моделі ТТР. Враховуючи чисельні значення відповідних модельних параметрів, отримуємо $\chi \approx (2V_{50}^{\text{задачи}} / N_{50}^{\text{задачи}})$, що узгоджується із експериментальними даними [26] та пояснює таке числове співвідношення між ними.

Графічне представлення ймовірностей виконання візуальних задач $P^D(N)$ з виявлення, $P^R(N)$ розпізнавання, $P^I(N)$ ідентифікації та ймовірності $P^A(N)$ задачі збору даних про ціль, яка є добутком $P^A(N) = P^D(N) \cdot P^R(N) \cdot P^I(N)$ ймовірностей виконання окремих візуальних задач, показало, що ймовірність $P^A(N)$ успішного збору даних про ціль практично співпадає із ймовірністю $P^I(N)$ ідентифікації цілі для значень $N > N_{50}^I$. Це пояснюється тим, що кількість пар ліній, яка відповідає 50 % ймовірності ідентифікації цілі, забезпечує ймовірність, близьку до 1, для задачі розпізнавання та ще ближчу до 1 ймовірність виявлення цілі. Тому розгляд ймовірностей виявлення P^D та розпізнавання P^R має сенс, лише допоки ймовірність ідентифікації є нижчою, ніж 50 % ($P^I < 0.5$).

Пороговий характер зорового сприйняття приводить до висновку, що ймовірність виконання візуальної задачі також повинна мати пороговий характер. Тому двопорогова лінійна апроксимація, запропонована в цій роботі, є більш адекватним модельним представленням, ніж власне сигмоїдні функції, які моделюють ймовірності виконання візуальних задач в рамках моделей Джонсона та моделі ТТР.

Для подальшого розвитку цього напрямку є доцільним провести моделювання роботи каналів БКПСК та провести оцінювання ефективності їхньої роботи запропонованим способом.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Метод оцінювання ефективності виконання програм (планів) розвитку Збройних Сил України з урахуванням повноти та своєчасності їх фінансування / Семененко О.М., Водчиць О.Г., Семененко Л.М., Бойко Р.В., Башинський Д.В., Зубрицька Г.Г. 36. наук. пр. Харківського нац. ун-ту Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. 2017. № 2(51). С. 51—58. <https://doi.org/10.30748/zhups.2017.51.10>.
2. Сучасний стан і перспективи розвитку прицільних комплексів зразків бронетанкового озброєння / Хаустов Я.Є., Хаустов Д.Є., Настишин Ю.А.,

- Гордієнко В.І., Рижов Є.В. Військово-техн. зб. Львів: НАСВ.2019. № 20. С. 48—57. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.48-57>.
3. Танк «Армата Т-14». Новое слово в танкостроении. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://uralvagonzavod.ru/product/70/88>.
 4. Васьківський М.І. Покращення інформативності бронетанкового озброєння за рахунок використання власних розвідувально-спостережних засобів. Військово-техн. зб. Львів: НАСВ. 2011. № 2(5). С. 7—11.
 5. Уроки Ірака: тактика, стратегія і техніка в іракських війнах США / Валецький О.В., Гирин А.В., Маркин А.В., Неєлов В.М. Центр стратегічної кон'юнктури. 2015. 212 с.
 6. Барабанов М., Лавров А., Целуйко В. Танки августа. Сб. статей. Центр аналізу стратегій і технологій. 2009. 144 с.
 7. Колобродов В.Г., Микитенко В.І., Мамута М.С. Оцінка ефективності багатоканальних оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням інформації. Наукові та практичні проблеми виробництва приладів та систем. Вісн. НТУУ «КПІ». Сер.: Приладобудування та інформаційно-вимірвальна техніка. 2025. № 6. С. 127—131.
 8. Тарасов М.М., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М.: Логос. 2004. 444 с.
 9. Endsley, M.R. Situation awareness global assessment technique (SAGAT). Proc. of the Nat. Aerospace and Electronics Conf. (NAECON). (New York: IEEE). 1988. Pp. 789—795.
 10. Микитенко В.І. Підвищення ефективності функціонування оптико-електронних систем спостереження з комплексуванням зображень: дис. ... докт. техн. наук: 05.11.07.; захищена 03.03.2020; затв. 29.05.2020. Київ. 2020. 389 с.
 11. Танки (основы теории, конструкции и боевой эффективности). Кн. 2 / под ред. О.А. Лосика. М.: ВА БТВ. 1983. 157 с
 12. Гордієнко В.І. Максимальна дальність виявлення тепловізором об'єкта на нерівномірному фоні. Наукові та практичні проблеми виробництва приладів та систем. Вісн. НТУУ «КПІ». Сер.: Приладобудування. 2015. № 49(1). С. 95—101.
 13. Колобродов В.Г., Шустер Н. Тепловізійні системи (фізичні основи, методи проектування і контролю, застосування). Київ. 1999. 341 с.
 14. Хаустов Д.Є., Хаустов Я.Є., Соколовський В.В. Математична модель виконання вогневих задач екіпажем танка на полі бою. Зб. наук. пр. НА НГУ. 2020. № 2(36). С. 63—69. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2020/2/36/223584>.
 15. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І. Проектування тепловізійних та телевізійних систем спостереження. Київ. 2006. 364 с.
 16. Новиков С.Н., Поликанин А.Н. Методика расчета дальности действия тепловизора на основе объединенных параметров температурной чувствительности и разрешения. Тр. учебных заведений. Т. 5. 2019. № 4. С. 22—27. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-6-14>.
 17. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации. М.: Сов. радио. 1970. С. 235—240.
 18. Листов К.М., Трофимов К.Н. Радио и радиолокационная техника и их применение. М.: Военное издво. 1960. 424 с.
 19. Висоцкий Б.Ф. Максимальная дальность действия радиолокационной станции. М.: Сов. радио. 1947. 65 с.
 20. Бакулев П.А. Радиолокационные системы. М.: Радиотехника. 2004. 320 с.
 21. Справочник по радиолокации в 2-х кн. Кн. 1 / под ред. Скольникова М.И. М.: Техносфера. 2014. 671 с.
 22. Справочник по радиолокации в 4-х т. Т. 1 / под ред. Трофимова К.Н. М.: Сов. радио. 1976. 455 с.
 23. John Johnson. (1958). Analysis of image forming systems. Tehnical report, U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories, Fort Belvoir. Virginia.
 24. Richard H. Vollmerhausen & Eddie Jacobs. The Targeting Task Performance (TTP) Metric. A New Model for Predicting Target Acquisition Performance. Technical Report AMSEL-NV-TR-230, Revision. 20 April 2004. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a422493.pdf>.
 25. Mattias Sonesson. (2018). Approach to Conceptual Sensor Modeling. A Probabilistic Dissertation. Linköpings Universitet, Linköping, Sweden, <http://liu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A20633&dsid=-9203>.
 26. Jonathan G. Hixson, Eddie L. Jacobs & Richard H. Vollmerhausen. Target detection cycle criteria when using the targeting task performance metric. Proc. SPIE 5612, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications, (6 December 2004). <https://doi.org/10.1117/12.577830>.
 27. Nantomah, K. On some properties and inequalities of the sigmoid function. RGMIA Res. Rep. Coll. 21.(2018), Art. 89. 11 p.
 28. Nastishin, Yu.A., Polak, R.D., Shiyonovskii, S.V., Bodnar, V.H. & Lavrentovich, O.D. (1999). Nematic polar anchoring strength measured by electric field techniques. J. Appl. Phys. Vol. 86. No 8. Pp. 4199—4213.
 29. Nastishin, Yu.A. & Dudok, T.H. (2013). Optically pumped mirrorless lasing. A review. P. I. Random lasing. Ukr. J. Phys. Opt. Vol. 14. № 3. Pp. 146—170.
 30. Albert J. Markvoort, Huub M. M. ten Eikelder, Peter A. J. Hilbers & Tom F. A. de Greef. (2016). Fragmentation and Coagulation in Supramolecular (Co)polymerization Kinetics. ACS Cent. Sci. No 2. Pp. 232—241. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.6b00009>.
 31. Anjar Wanto, Agus Perdana Windarto, Dedy Hartama & Iin Parlina. (2017). Use of Binary Sigmoid Function And Linear Identity in Artificial Neural Networks for Forecasting Population Density. Intern. J. of Information System & Technology. Vol. 1. No. 1. Pp. 43—54.
 32. Vinod Nair & Geoffrey Hinton (2010). Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines. Proc. of the 27th Intern. Conf. on Machine Learning, Haifa, Israel.

Available at: <https://www.cs.toronto.edu/~hinton/absps/reluICML.pdf>.

33. Tracy A. Sjaardema, Collin S. Smith & Gabriel C. Birch. History and Evolution of the Johnson Criteria. Sandia Report, SAND2015-6368. Available at: <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2015/156368.pdf>.
34. Афанасьев А.А., Горбунов В.А. Эффективность обнаружения целей радиотехническими средствами наблюдения. М.: Воениздат. 1964. 122 с.

REFERENCES

1. Semenenko, O.M., Vodchits, O.G., Semenenko, L.M., Boyko, R.V., Bashinsky, D.V. & Zubrytska, G.G. (2017). "Metod oziniuvania effektivnosti vikonannia program (planiv) rozvitky Zbroinich Sil Ukraine z vrahuvanniam povnoty ta svoechnosti ikh finansyvannia" [Method of evaluating the effectiveness of programs (plans) for the development of the Armed Forces of Ukraine, taking into account the completeness and timeliness of their funding]. Coll. of scientific works of Kharkiv Nat. Univ. of the Air Force. № 2(51). Pp. 51—58. <https://doi.org/10.30748/zhups.2017.51.10>.
2. Khaustov, Ya.Ye., Khaustov, D.Ye., Nastishin, Yu.A., Gordienko, V.I. & Ryzhov, Ye.V. (2019). "Sychasni stan i perspektivi rozvytku pryzilnich kompleksiv zrazkiv bronetankovogo ozbroenia" [The current state and prospects for the development of sighting complexes of armored weapons]. Military-technical coll. Lviv: NALF. № 20. Pp. 48—57. <https://doi.org/10.33577/2312-4458.20.2019.48-57>.
3. "Tank "Armata T-14". Novoe slovo v tankostroenii" [Tank "Armata T-14". A new word in tank building]. Available at: <http://uralvagonzavod.ru/product/70/88>.
4. Vaskivsky, M.I. (2011). "Pokrachenia informativnosti bronetankovogo ozbroenia za rachynok vikoristania vlasnich rozvidyvalno-sposteregnykh zasobiv" [Improving the informativeness of armored weapons through the use of their own reconnaissance and surveillance equipment]. Military-technical coll. Lviv: NALF. № 2(5). Pp. 7—11.
5. Valetsky, O.V., Girin, A.V., Markin, A.V. & Neelov, V.M. (2015). "Uroki Iraka: taktika, strategiia i tehnika v irakskikh voynakh USA" [Lessons from Iraq: Tactics, Strategy and Technique in the USA Iraqi Wars]. Center for strategic conjuncture. 212 p.
6. Barabanov, M., Lavrov, A. & Tseluiko, V. (2009). "Tanki avgusta. Sbornik statei" [Tanks of August. Coll. of stat to her]. Center for Analysis of Strategies and Technologies. 144 p.
7. Kolobrodov, V.G., Mikitenko, V.I. & Mamyta, M.S. (2015). "Otsinka effektivnosti bagatokanalnich optiko-elektronnykh system sposteregennia z kompleksyvannia informatsii" [Evaluation of the efficiency of multichannel optoelectronic surveillance systems with information integration]. Scientific and practical problems of production of devices and systems. Bull. of NTUU "KPI". Series: Instrument making and information-measuring equipment. № 6. Pp. 127—131.
8. Tarasov, M.M. & Yakushenkov, Yu.G. (2004). "Infrakrasnie sistemu "smotriachego" tipa" [Infrared systems of the "looking" type]. M.: Logos. 444 p.
9. Endsley, M.R. Situation awareness global assessment technique (SAGAT). Proc. of the Nat. Aerospace and Electronics Conf. (NAECON). (New York: IEEE). 1988. Pp. 789—795.
10. Mikitenko, V.I. (2020) "Pidvichenia effektivnosti funkcionuvania potiko-elektronnykh system sposteregennia z kompleksyvanniam zobragen" [Advancing the efficiency of the optoelectronic systems to guard against image complexes]: dis. ... for Doctor of Technical Sciences: 05.11.07; hiiacked 03/03/2020; shutter 05/29/2020. K. 2020. 389 p.
11. "Tanki (osnovu teorii, konstruykzii i boevoi effektivnosti)" [Tanks (fundamentals of theory, design and combat efficiency)]. B. 2 / ed. Losika, O.A. M.: VA BTV. 1983. 157 p.
12. Gordienko, V.I. (2015). "Maksimalnaia dalnist vyjavleniia teplovizorom obiektu na nerivnomirnomy foni" [The maximum range of detection of the object by a thermal imager on a non-uniform background]. Scientific and practical problems of virobning of applied systems. Bull. of NTUU "KPI". Ser.: Instrument making. No. 49(1). Pp. 95—101.
13. Kolobrodov, V.G. & Shuster, N. (1999). "Teploviziini sistemu (fizichni osnovy, metody proektuvannia i kontroliu, zastosuvannia)" [Thermal imaging systems (physical bases, methods of design and control, application)]. K. 341 p.
14. Khaustov, D.Ye., Khaustov, Ya.Ye. & Sokolovsky, V.V. (2020). "Matematichna model vikonannia vognevich zadach ekipagem tanka na poli boia" [Mathematical model of execution of fire tasks by a tank crew on the battlefield]. Coll. of scientific works of the NA of the NGU. No. 2(36). Pp. 63—69. <https://doi.org/10.33405/2409-7470/2020/2/36/223584>.
15. Kolobrodov, V.G. & Likholit, M.I. (2006). "Proektyvannia teploviziiniykh ta televiziiniykh system sposteregennia" [Design of thermal imaging and television surveillance systems]. K. 364 p.
16. Novikov, S.N. & Polikanin, A.N. (2019). "Metodika rascheta dalnosti deistviia teplovizora na osnovi obiednennykh parametrov temperaturnoi chystvitelnosti i razrecheniia" [Methodology for calculating the range of a thermal imager based on the combined parameters of temperature sensitivity and resolution]. Proc. of educational institutions. Vol. 5. No. 4. Pp. 22—27. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2019-5-4-6-14>.
17. Shirman, Ya.D. (1970). "Teoreticheskie osnovy radiolokatsii" [Theoretical foundations of radar]. M.: Sov. Radio. Pp. 235—240.
18. Listov, K.M. & Trofimov, K.N. (1960). "Radio i radiolokatsionnaia tehnika i ikh primenenie" [Radio and radar equipment and their application], Military publishing house, M. 424 p.
19. Visotsky, B.F. (1947). "Maksimalnaia dalnost deistviia radiolokatsionnoi stantsii" [Maximum range of the radar station], Publishing House "Sov. Radio", M. 65 p.
20. Bakulev, P.A. (2004). "Radiolokatsionnye sistemy" [Radar systems], Radiotekhnika, M. 320 p.

21. “Spravochnik po radiolokazii” [Handbook on radar in 2 b. B. 1] / ed. Skolnik, M.I. M.: Technosphere. 2014. 671 p.
22. “Spravochnik po radiolokazii v 4 t. T. 1” [Handbook on radar in 4 vol. Vol. 1] / ed. Trofimova, K.N. M.: Sov. Radio. 1976. 455 p.
23. John Johnson. (1958). Analysis of image forming systems. Tehnical report, U.S. Army Engineer Research and Development Laboratories, Fort Belvoir. Virginia.
24. Richard H. Vollmerhausen & Eddie Jacobs. The Targeting Task Performance (TTP) Metric. A New Model for Predicting Target Acquisition Performance. Technical Report AMSEL-NV-TR-230, Revision. 20 April 2004. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a422493.pdf>.
25. Mattias Sonesson. (2018). Approach to Conceptual Sensor Modeling. A Probabilistic Dissertation. Linköpings Universitet, Linköping, Sweden, <http://liu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A20633&dswid=-9203>.
26. Jonathan G. Hixson, Eddie L. Jacobs & Richard H. Vollmerhausen. Target detection cycle criteria when using the targeting task performance metric. Proc. SPIE 5612, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications, (6 December 2004). <https://doi.org/10.1117/12.577830>.
27. Nantomah, K. On some properties and inequalities of the sigmoid function. RGMIA Res. Rep. Coll. 21(2018), Art. 89. 11 p.
28. Nastishin, Yu.A., Polak, R.D., Shiyarovskii, S.V., Bodnar, V.H. & Lavrentovich, O.D. (1999). Nematic polar anchoring strength measured by electric field techniques. J. Appl. Phys. Vol. 86. No 8. Pp. 4199—4213.
29. Nastishin, Yu.A. & Dudok, T.H. (2013). Optically pumped mirrorless lasing. A review. P. I. Random lasing. Ukr. J. Phys. Opt. Vol. 14. № 3. Pp. 146—170.
30. Albert J. Markvoort, Huub M. M. ten Eikelder, Peter A. J. Hilbers & Tom F. A. de Greef. (2016). Fragmentation and Coagulation in Supramolecular (Co)polymerization Kinetics. ACS Cent. Sci. No 2. Pp. 232—241. <https://doi.org/10.1021/acscentsci.6b00009>.
31. Anjar Wanto, Agus Perdana Windarto, Dedy Hartama & Iin Parlina. (2017). Use of Binary Sigmoid Function And Linear Identity in Artificial Neural Networks for Forecasting Population Density. Intern. J. of Information System & Technology. Vol. 1. No. 1. Pp. 43—54.
32. Vinod Nair & Geoffrey Hinton (2010). Rectified Linear Units Improve Restricted Boltzmann Machines. Proc. of the 27th Intern. Conf. on Machine Learning, Haifa, Israel. Available at: <https://www.cs.toronto.edu/~hinton/absps/reluCML.pdf>.
33. Tracy A. Sjaardema, Collin S. Smith & Gabriel C. Birch. History and Evolution of the Johnson Criteria. Sandia Report, SAND2015-6368. Available at: <https://prodng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2015/156368.pdf>.
34. Afanasyev, A.A. & Gorbunov, V.A. (1964). “Efektivnost obnaruzeniia tselei radiotekhnicheskimi sredstvami nabliudeniia” [Efficiency of target detection by radio-technical means of observation], Military Publishing House, M. 122 p.

Khaustov D.Ye., Nastishin Yu.A., Khaustov Ya.Ye., Andriienko A.M.

PROBABILITY OF VISUAL TASK EXECUTION AS A SIGMOID FUNCTION

The execution of the visual task of data acquisition by a multi-channel target sightseeing system of a sample of armored vehicle in the interests of target awareness situation, target tracking and destruction of enemy armament and military facilities on maximal distances (within the limits of action of basic regular armament of samples of the armored vehicles) is considered. The criterion for the effectiveness of execution of the task of detection / recognition / identification of the target is the probability of execution of the corresponding visual task. The analysis of modern approaches to the assessment of the effectiveness of the task of data acquisition on the target, based on the Johnson and TTP (Targeting Task Performance) models is performed.

The empirical parameter introduced by Johnson by its physical content is the size of the image of the target, which provides a fifty-percent-probability of execution of the corresponding visual task. Obviously, by itself a certain size of the image cannot guarantee a desired probability of solving the corresponding visual problem at low contrast values (visibility of the target). Conversely, even the very high contrast of the target is not sufficient to successfully execute the visual problem: the size of the target must be sufficient to be capable to detect / recognize / identify a target. Thus, when using Johnson's approach, one inevitably faces a contradiction. Namely: on the one hand, Johnson's approach assumes that the size of the image of the target, described by the number N_{50}^{task} , corresponds to the fifty-percent-probability of performing the corresponding visual task, while on the other hand, it is clear that at low visibility even a fairly large size of the image does not provide even a fifty percent probability of performing the corresponding visual task. At sufficiently low values of the visibility of the target, the probability of performing the corresponding visual task falls to zero. In Johnson's approach, this contradiction is overcome implicitly, assuming that the number N_{50}^{task} that shows the number of pairs of lines, corresponding to the fifty-percent-probability of performing the corresponding visual task is determined from the experiment and depends on the conditions of visibility of the target. For different visibility conditions, different values of the number N_{50}^{task} are obtained for the same target.

The experimental data available in the literature suggest a linear relationship between the integral number of line pairs in the TTP model and the number of line pairs in the Johnson model, but there was no theoretical explanation for this fact. This paper theoretically proves that the corresponding variables in both models are indeed linearly related. Estimation of the coefficient of linearity leads to the need to solve the equation with exponential functions, the solution for which is not known. To proceed with the solution of this mathematical

problem, we used the property according to which in both models (Johnson and TTP) the probability of performing the visual task is a sigmoid function, which in turn provides the possibility of approximating the probability function by a linear dependence in the range between two corresponding thresholds in the Johnson model and the TTP model. To determine the corresponding lower and upper threshold values, we use the double-tangent method.

The threshold nature of visual perception leads to the conclusion that the probability of performing a visual task should also be threshold. The threshold nature of human visual perception shows up in the fact that the targets (for visual observation) or their images (when viewed on the monitor of the target sightseeing system) can be detected by the operator only if the size and contrast for a sufficient duration of the target image are higher than the corresponding threshold values associated with the threshold nature of human visual perception.

Taking into account that because of the threshold nature of human visual perception, the probability of execution of the visual task should also be of threshold character, we conclude that the double-threshold linear approximation of the sigmoid function is more appropriate to describe the probabilities of execution of the visual task than the sigmoid functions given by equations, used in the Johnson and TTP models. Notice, that the functions describing the probability of the performance of execution of the visual task are empirical dependencies that satisfactorily describe the experiment, while their smooth character contradicts with the threshold nature of human visual perception. In turn, human visual perception is based on the response of the corresponding neurons. The response of each individual neuron is, firstly, threshold, and secondly not smooth, being in the form of a step from 0 to 1. These features are different from the properties of the sigmoid function. Therefore, for modeling the probability of execution of the visual task, any sigmoid function will be convenient, but worse approximation in comparison with the step function, for example, a function of the type of ReLU activation function. The double-threshold approximation proposed in this paper for the sigmoid function is more adequate model representation than the sigmoid functions themselves.

Keywords: data acquisition for a target, the effectiveness of the visual task, situation awareness for a target.

Відомості про авторів:

Хаустов Дмитро Євгенович

кандидат технічних наук
докторант штатний науково-організаційного відділу
Національної академії сухопутних військ імені гетьмана
Петра Сагайдачного,
м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5542-2831>

Настишин Юрій Адамович

доктор фізико-математичних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник науково-дослідного
відділу (інженерних військ) Наукового центру
Сухопутних військ Національної академії сухопутних

військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,
м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-7521-3906>

Хаустов Ярослав Євгенович

ад'юнк штатний науково організаційного відділу Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,
м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-4553-0702>

Андрієнко Анатолій Михайлович

кандидат технічних наук
старший науковий співробітник
провідний науковий співробітник науково-дослідного
відділу (підготовки військ) Наукового центру Сухопутних військ Національної академії сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного
м. Львів, Україна
[https:// orsid.org/0000-0002-7018-3784](https://orcid.org/0000-0002-7018-3784)

Information about the authors:

Dmytro Khaustov

Candidate of Technical Sciences
Habilitation Doctorant of scientific and organizational
department of Hetman Petro Sahaidachnyi National Army
Academy, Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5542-2831>

Yuriy Nastishin

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Senior
Researcher Fellow
Leading Researcher at Army scientific center of Hetman
Petro Sahaidachnyi National Army Academy,
Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7521-3906>

Yaroslav Khaustov

military PhD student, adjunct of scientific-
organization department of Hetman Petro
Sahaidachnyi National Army Academy,
Lviv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-4553-0702>

Anatolii Andriienko

Candidate of Technical Sciences
Senior Researcher
Leading Researcher of the Research Department (Training
of Troops) Research Center Land Forces at the Hetman Petro
Sahaidachnyi National Army
Academy
Lviv, Ukraine
[https:// orsid.org/0000-0002-7018-3784](https://orcid.org/0000-0002-7018-3784)

Стаття надійшла до редколегії 15.07.2021