

**Принципы построения энергетической теории оценивания параметров радиосигналов**

Г.В. Певцов, А.Я. Яцуценко, Ю.В. Трофименко, Д.В. Карлов, А.Н. Остапова

Излагаются принципы оценивания начальной фазы и частоты в радиолокационных системах при использовании энергетической теории обнаружения-оценивания. Рассматривается обобщение фазового способа оценивания параметров радиосигналов для синтеза измерительной системы при энергиях радиосигналов, соизмеримых с энергией внутренних шумов приемника. Представляется метод определения радиальной составляющей скорости в условиях априорной определенности несущей частоты радиосигналов. Приводится обобщенный динамический алгоритм предварительной классификации объектов по доплеровской частоте.

**Ключевые слова:** энергетический критерий обнаружения радиолокационных сигналов, радиолокационная станция (РЛС), многоканальное по времени энергетическое обнаружение целей, оптимальное энергетическое обнаружение, квазиоптимальное и оптимальное энергетическое оценивание начальной фазы и доплеровской частоты, оценивание начальной фазы и частоты радиолокационных сигналов, динамический алгоритм предварительной классификации объектов по доплеровской частоте.

**Principles of construction of power theory of radio signals parameters evaluation**

G. Pevtsov, A. Yatsutsenko, Yu. Trofymenko, D. Karlov, A. Ostapova

Principles of radar systems initial phase and frequency evaluation using energy theory of detection-evaluation are presented. For synthesis of a measuring system provided that radio signals energies are commensurable with the energy of receiver internal noises a generalization of the phase method for evaluating radio signals parameters is observed. A method of velocity of radial component definition in the conditions of an a priori defined radio signals carrier frequency is given. A generalized dynamic algorithm for preliminary classification of objects using Doppler frequency is suggested.

**Keywords:** energy criterion for radar signals detection, radiolocation station (RLS), multichannel in time target power detection, optimum power exposure, kvazi optimum and optimum power evaluation of initial phase and Doppler frequency, radar signals initial phase and frequency evaluation, dynamic algorithm for preliminary classification of objects using Doppler frequency.

УДК 623.5

П.П. Ткачук, Ю.В. Шабатура, Р.В. Кузьменко

Академія сухопутних військ ім. гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

**АНАЛІЗ ПРИЧИН ВИНИКНЕННЯ І ОЦІНКА ПОХИБОК ВИЗНАЧЕННЯ  
КООРДИНАТ СНАРЯДІВ ТА МІН НА ТРАЄКТОРІЇ ПОЛЬОТУ ПРИ  
ЗАСТОСУВАННІ ЦИФРОВОЇ ФОТОРЕЄСТРАЦІЇ**

У роботі проведено аналіз причин виникнення похибок, що зумовлені внутрішніми і зовнішніми чинниками при визначенні координат снарядів та мін на траєкторії польоту. Розроблено математичні моделі з оцінки похибок визначення координат снарядів та мін на траєкторії польоту при стереофото-реєстрації і їх моделі чутливості до зміни вхідних параметрів. Проведено комп'ютерне моделювання відповідними процедурами пакета Maple 5.00.

**Ключові слова:** фотореєстрація, похибка, координати, траєкторія, снаряд.

**Актуальність теми**

Відомо, що при траєкторних дослідженнях під час випробування нових зразків артилерійських боеприпасів використовуються оптичні засоби фото-, відеореєстрації [1,2]. Застосування оптичних засобів фото-, відеореєстрації відноситься до галузі фотометричних досліджень [3,4]. Засоби фотореєстрації, що використовуються на сьогоднішній день, нерідко морально та фізично застаріли і використовують аналоговий спосіб реєстрації зображення на фото-,

кіноплівку. Сьогодні впровадження цифрових технологій у повсякденну діяльність набуло широкого розмаху; зокрема під час фотометричних досліджень все частіше застосовують неметричні цифрові фотокамери. Такий підхід дозволяє застосовувати комп'ютерну обробку інформації, що суттєво збільшує оперативність і розширює можливості фотометричного методу, а також дає змогу розглядати можливість створення мобільних пересувних пунктів оптичних траєкторних досліджень.

## Аналіз досліджень і публікацій

У попередніх працях [5,6] розроблено низку математичних моделей, що дають можливість отримати координати і відтворити траєкторію польоту снаряда або міни (далі балістичне тіло) на видимій ділянці за визначеними координатами цього ж тіла в площині знімка. Ці математичні моделі розроблені як для фотореєстрації одним фотореєструючим пристроєм за додаткових припущень, так і для фотореєстрації двома фотореєструючими пристроями (стереофотореєстрація). Відмінністю запропонованих підходів фотореєстрації балістичного тіла від прийнятих в [1,3] є те, що:

1) при фотореєстрації одним пристроєм – реєстрація відбувається з довільного місця розташування пристрою фотореєстрації із подальшим розрахунком для системи координат, віднесеної до зрізу каналу ствола артилерійської системи; зазначимо, що класичний метод передбачає фотореєстрацію у площині польоту балістичного тіла із перпендикулярного напрямку;

2) при стереофотореєстрації – реєстрація відбувається за довільного розташування пристроїв фотореєстрації із можливістю оптимізації розташування в залежності від параметрів апаратури. Класичний метод розглядає фотореєстрацію за умови розташування фотореєструючих пристроїв по обидва боки від артилерійської системи на одній прямій.

## Постановка проблеми

Попри значну кількість публікацій з цієї тематикою проблема оцінки похибок не була вирішена значною мірою. Похибки визначення координат балістичного тіла на траєкторії польоту при використанні цифрової фотореєстрації є важливим аспектом практичного застосування методики.

## Постановка завдання

Завданням цієї роботи є аналіз причин виникнення та оцінка похибок визначення координат балістичного тіла на траєкторії польоту при застосуванні цифрової фотореєстрації.

## Викладення основного матеріалу

**Основна частина.** Як відомо з теорії фотограмметрії [3], для визначення координат об'єкта фотореєстрації необхідно знати положення, знімків, яке вони займали в момент фотореєстрації. Параметри, що визначають дане положення прийнято називати елементами орієнтування. Їх розрізняють на дві групи: елементи внутрішнього і зовнішнього орієнтування знімка. Зазначимо, що при стереофотореєстрації зазвичай використовують однотипні камери, а тому елементи внутрішнього орієнтування у цьому випадку прийнято вважати однаковими.

За місцем виникнення похибки пропонується класифікувати:

- внутрішні похибки – це похибки, які впливають на точність визначення координат в площині знімка; причина їх виникнення зумовлена технічними характеристиками фотореєструючої апаратури;

- зовнішні похибки – похибки, які впливають на точність визначення координат розташування фотореєструючої системи на місцевості;

ця категорія похибок обумовлена обмеженнями технічних можливостей засобів прив'язки на місцевості.

Згідно з [7] основним чинником, який впливає на похибку вимірювання координат шуканої точки, є похибки визначення елементів внутрішнього орієнтування.

У роботі [8] наведено аналіз впливу похибок елементів внутрішнього орієнтування при стереофотограмметричному фотографуванні для камери Cannon EOS 350, а також наведено аналітичні вирази для знаходження складових похибок внутрішнього орієнтування, зокрема:

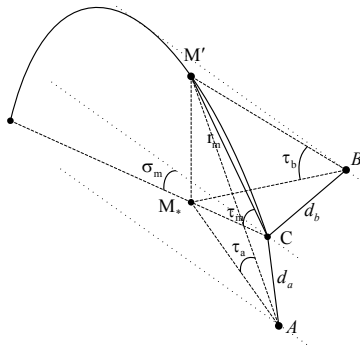
- похибка положення головної точки знімка;
- похибка визначення фокусної віддалі та її складові:
  - похибка, що зумовлена невідповідністю дійсного значення фокусної віддалі та значення вказаного у паспорті камери;
  - похибка через незбіг площини ПЗЗ-матриці з фокальною площиною;
  - похибка зумовлена відхиленням осей вправо або вліво;
  - похибки перекосу ПЗЗ-матриці, до яких входять: похибка спотворення абсцис, аплікат і паралаксів шуканої точки;
  - похибка перекосу ПЗЗ-матриці;
  - похибка незбігу ПЗЗ-матриці з обох кінців фокальної площини;
  - похибка нахилу ПЗЗ-матриці.

Задача визначення елементів внутрішнього орієнтування вирішується шляхом калібрування. Методам калібрування неметричних фотокамер присвячено праці [9,10], а також існує багато прикладних програм, які дозволяють визначати елементи внутрішнього орієнтування з різним ступенем точності [11-13].

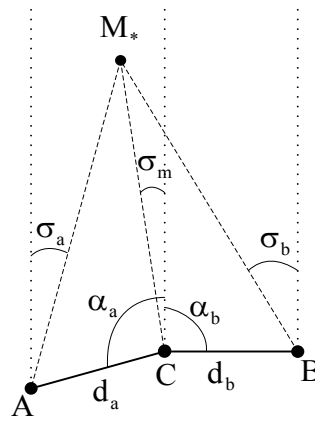
До похибок зовнішнього орієнтування відносяться:

- похибка визначення координат розташування фотореєструючої апаратури;
- похибка визначення дирекційного кута і кута нахилу оптичної осі;
- похибка кута розвороту.

У роботі розглядається випадок стерео фотореєстрації балістичного тіла. На рисунку 1а зображено просторову, а на рисунку 1б – планіметричну схему фотореєстрації.



а) просторова схема стереофотореєстрації



б) планіметрична схема стереофотореєстрації

Рис. 1. Схема розташування елементів стерео фотореєстрації

де точки А, В – місця встановлення фотореєструючих пристроїв;

кути  $\sigma_a, \sigma_b$  – горизонтальні кути фотореєстрації балістичного тіла;

кути  $\tau_a, \tau_b$  – вертикальні кути фотореєстрації балістичного тіла;

$d_a, d_b$  – відстані від артилерійської системи до фотореєструючих пристроїв;

$\alpha_a, \alpha_b$  – кути встановлення фотореєструючих пристроїв відносно артилерійської системи;

точка С – початок локальної системи координат МХУЗ;

точка М' – положення балістичного тіла на траєкторії; точка М\* – проекція положення балістичного тіла на площину МХУ;

кути  $\sigma_m, \tau_m$  – вертикальний і горизонтальний кути (сферичні координати) балістичного тіла.

Згідно з [6] при стереофотореєстрації сферичні координати БТ розраховують за формулами:

$$\sigma_m = \arctg \left[ \frac{(d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\sigma_b) - d_b \sin(\alpha_b - \sigma_b) \sin(\sigma_a))}{(d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a) \cos(\sigma_b) - d_b \sin(\alpha_b - \sigma_b) \cos(\sigma_a))} \right], \quad (1)$$

$$\tau_m = \arctg \frac{\sin(\alpha_a - \sigma_m) \operatorname{tg}(\tau_a)}{\sin(\alpha_a - \sigma_a)}, \quad (2)$$

$$r_m = \frac{d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a)}{\sin(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m)}. \quad (3)$$

Дослідження показали, що похибка визначення кута  $\sigma_m$  має найбільше значення, оскільки дає змогу визначення відхилення траєкторії польоту балістичного тіла відносно заданого напрямку на ціль, а також безпосередньо впливає на визначення інших координат, а саме (2) і (3). Тому далі зосередимо увагу на дослідженні точності визначення цього кута.

Це співвідношення дає змогу перетворити вхідні дані кутів спостереження БТ із точок спостереження

у сферичну координату кута БТ. На точність такого перетворення впливають як обчислювальна похибка, так і похибки вхідних даних.

Обчислювальна похибка визначається конкретним виглядом функціональних залежностей у виразі для перетворення та розрядністю використаного програмного забезпечення. У вирази (1), (2) і (3) входять стандартні функції  $\sin, \cos, \arctg$  та арифметичні операції, які сучасні програмні пакети обчислюють із точністю до похибки в останній значущій цифрі. У розрахунках використовують переважно від шести до десяти значущих розрядів, а тому прийматимемо обчислювальну похибку нехтувально малою.

Ступінь залежності похибки кута  $\sigma_m$  від похибок вхідних даних визначається чутливістю кута  $\sigma_m$  до зміни вхідних параметрів.

У вирази (1), (2) і (3) входять дві групи параметрів:

- 1)  $d_a, d_b, \alpha_a, \alpha_b$  – елементи зовнішнього орієнтування, які визначають перед проведенням спостереження. Точність їх визначення залежить від технічних можливостей, характеристик далекомірного та кутомірного пристроїв; у ході проведення фотореєстрації ці величини незмінні;
- 2)  $\sigma_a, \sigma_b$  – величини, на які безпосередньо впливають елементи внутрішнього орієнтування. Ці величини визначають окремо для кожного зафіксованого положення балістичного тіла, їх значення може змінюватись у широкому діапазоні в залежності від кута огляду фотокамери.

Чутливість кута  $\sigma_m$  до зміни елементів зовнішнього орієнтування описують такі вирази:

–  $\frac{\partial \sigma_m}{\partial d_a}$  – чутливість відносно впливної величини

$d_a$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial d_a} = \frac{-d_b \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_b) \sin(\sigma_a - \sigma_b)}{\chi}, \quad (4)$$

де  $\chi = d_a^2 \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + d_b^2 \sin^2(\alpha_b - \sigma_b) - 2d_a d_b \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_b) \cos(\sigma_a - \sigma_b)$ ;

–  $\frac{\partial \sigma_m}{\partial d_b}$  – чутливість відносно впливної величини

$d_b$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial d_b} = \frac{d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_b) \sin(\sigma_a - \sigma_b)}{\zeta}, \quad (5)$$

де  $\zeta = d_a^2 \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + d_b^2 \sin^2(\alpha_b - \sigma_b) - 2d_a d_b \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_b) \cos(\sigma_a - \sigma_b)$ ;

–  $\frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_a}$  – чутливість відносно впливної величини

$\alpha_a$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_a} = \frac{\xi}{\xi_1}, \quad (6)$$

де  $\xi = d_a d_b \sin(\alpha_b - \sigma_b) \cos(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\sigma_b - \sigma_a)$ ,

$\xi_1 = d_a^2 \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + d_b^2 \sin^2(\alpha_b - \sigma_b) - 2d_a d_b \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_b) \cos(\sigma_a - \sigma_b)$ ;

–  $\frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_b}$  – чутливість відносно впливної величини

$\alpha_b$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_b} = \frac{\omega}{\omega_1}, \quad (7)$$

де  $\omega = -d_a d_b \cos(\alpha_b - \sigma_b) \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\sigma_b - \sigma_a)$ ,

$\omega_1 = d_a^2 \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + d_b^2 \sin^2(\alpha_b - \sigma_b) - 2d_a d_b \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_b) \cos(\sigma_a - \sigma_b)$ .

Чутливість кута  $\sigma_m$  до зміни кутів спостереження БТ описують такі вирази:

–  $\frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_a}$  – чутливість відносно впливної величини

$\sigma_a$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_a} = \frac{\mu}{\mu_1}, \quad (8)$$

де  $\mu = d_a d_b \sin(\alpha_a - \sigma_b) \sin(\alpha_b - \sigma_b) - d_b^2 \sin^2(\alpha_b - \sigma_b)$ ,

$\mu_1 = d_a^2 \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + d_b^2 \sin^2(\alpha_b - \sigma_b) - 2d_a d_b \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_b) \cos(\sigma_a - \sigma_b)$ ;

–  $\frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_b}$  – чутливість відносно впливної величини

$\sigma_b$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_b} = \frac{\kappa}{\kappa_1}, \quad (9)$$

де  $\kappa = d_a d_b \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_a) -$

$-d_a^2 \sin^2(\alpha_a - \sigma_a)$ ,

$\kappa_1 = d_a^2 \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + d_b^2 \sin^2(\alpha_b - \sigma_b) - 2d_a d_b \sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_b - \sigma_b) \cos(\sigma_a - \sigma_b)$ .

Похибки, обумовлені вищенаведеними групами параметрів, є незалежні між собою, тому сумарну

похибку визначення горизонтального кута сферичних координат балістичного тіла обчислюємо за формулою

$$\delta_{\sigma_m} = \sqrt{\delta_z^2 + \delta_v^2}, \quad (10)$$

де  $\delta_z, \delta_v$  – відповідно похибки зовнішнього та внутрішнього орієнтування.

Вираз для оцінки похибки зовнішнього орієнтування запишемо у загальній формі

$$\delta_{\sigma_z}^2 = \left[ \left( \frac{\partial \sigma_m}{\partial d_a} \right)^2 + \left( \frac{\partial \sigma_m}{\partial d_b} \right)^2 \right] \delta_d^2 + \left[ \left( \frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_a} \right)^2 + \left( \frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_b} \right)^2 \right] \delta_a^2, \quad (11)$$

де  $\delta_d$  – похибка визначення відстані, а  $\delta_a$  – похибка визначення кута у системі "гармата – фотокамера".

Результати моделювання показано на рис. 2а.

Для оцінки похибки внутрішнього орієнтування скористаємось співвідношенням

$$\delta_{\sigma_v}^2 = \left( \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_a} \right)^2 \delta_{\sigma_a}^2 + \left( \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_b} \right)^2 \delta_{\sigma_b}^2. \quad (12)$$

Результати моделювання показані на рис. 2б.

Аналіз графіка (рис. 2б) показує, що найбільшими будуть значення похибки визначення кута при спостереженні балістичного тіла біля точки відліку (зріз каналу ствола артилерійської установки) – на початковій частині траєкторії, із віддаленням балістичного тіла похибка зменшується.

Для аналізу похибки визначення вертикального кута  $\tau_m$  скористаємось другим виразом (2) та знайденими вище чутливостями кута  $\sigma_m$ .

Чутливості цього кута до величин  $w = d_a, d_b, \alpha_b, \sigma_b$  визначаються за єдиною формулою через відповідні чутливості (2)-(7)

$$\frac{\partial \tau_m}{\partial w} = \frac{\iota}{\iota_1} \frac{\partial \sigma_m}{\partial w}, \quad (13)$$

де  $\iota = \sin(\alpha_a - \sigma_a) \cos(\alpha_a - \sigma_m) \operatorname{tg}(\tau_a)$ ,

$\iota_1 = \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + \sin^2(\alpha_a - \sigma_m) \operatorname{tg}^2(\tau_a)$ ;

–  $\frac{\partial \tau_m}{\partial \alpha_a}$  – чутливість відносно впливної величини

$\alpha_a$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \tau_m}{\partial \alpha_a} = \left( \left( 1 - \frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_a} \right) \cos(\alpha_a - \sigma_m) \sin(\alpha_a - \sigma_a) \operatorname{tg}(\tau_a) - \sin(\alpha_a - \sigma_m) \cos(\alpha_a - \sigma_a) \operatorname{tg}(\tau_a) \right) / \left( \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + \sin^2(\alpha_a - \sigma_m) \operatorname{tg}^2(\tau_a) \right), \quad (14)$$

–  $\frac{\partial \tau_m}{\partial \sigma_a}$  – чутливість відносно впливної величини

$\sigma_a$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \tau_m}{\partial \sigma_a} = \left( \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma_a} (-\cos(\alpha_a - \sigma_m) \sin(\alpha_a - \sigma_a) \operatorname{tg}(\tau_a)) + \sin(\alpha_a - \sigma_m) \cos(\alpha_a - \sigma_a) \operatorname{tg}(\tau_a) \right) / \left( \sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + \sin^2(\alpha_a - \sigma_m) \operatorname{tg}^2(\tau_a) \right), \quad (15)$$

–  $\frac{\partial \tau_m}{\partial \tau_a}$  – чутливість відносно впливної величини  $\tau_a$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial \tau_m}{\partial \tau_a} = \left( \frac{\sin(\alpha_a - \sigma_a) \sin(\alpha_a - \sigma_m)}{\sin^2(\alpha_a - \sigma_a) + \sin^2(\alpha_a - \sigma_m) \operatorname{tg}^2(\tau_a)} \right) \times \left( \frac{1}{\cos^2(\tau_a)} \right). \quad (16)$$

Сумарна похибка відносно елементів  $d_a, d_b, \alpha_a, \alpha_b$

$$\delta_{tz}^2 = \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial d_a} \right)^2 \delta_{d_a}^2 + \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial d_b} \right)^2 \delta_{d_b}^2 + \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial \alpha_a} \right)^2 \delta_{\alpha_a}^2 + \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial \alpha_b} \right)^2 \delta_{\alpha_b}^2, \quad (17)$$

Результати чисельного моделювання цієї похибки представлено на рис. 3а.

Сумарна похибка відносно елементів  $\sigma_a, \sigma_b, \tau_a$

$$\delta_{tv}^2 = \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial \sigma_a} \right)^2 \delta_{\sigma_a}^2 + \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial \sigma_b} \right)^2 \delta_{\sigma_b}^2 + \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial \tau_a} \right)^2 \delta_{\tau_a}^2, \quad (18)$$

Зазначимо, що у порівнянні із похибкою (12) тут також присутній вплив похибки знімання вертикального кута для однієї із точок спостереження.

Графічні результати подано на рис. 3б.

Для аналізу похибок відстані  $r_m$  використаємо співвідношення (3). Чутливості функції, що визначає відстань від початку координат до балістичного тіла відносно величин  $w = d_b, \alpha_b, \sigma_b, \tau_a$ , визначаються за формулою

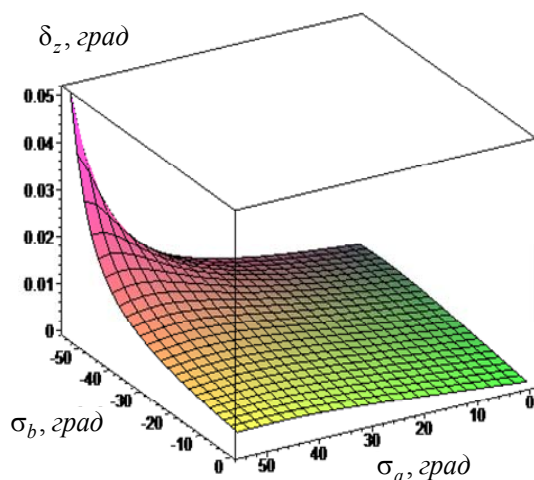
$$\frac{\partial r_m}{\partial w} = \frac{d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a)}{\sin^2(\sigma_m - \sigma_a) \cos^2(\tau_m)} \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial w} \sin(\sigma_m - \sigma_a) \times \sin(\tau_m) - \frac{\partial \sigma_m}{\partial w} \cos(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m) \right) \quad (19)$$

через вищеобчислені чутливості.

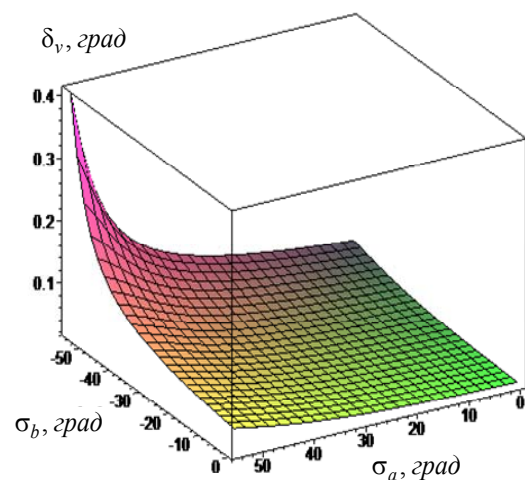
Окремо обчислюємо чутливості відносно параметрів  $d_a, \alpha_a, \sigma_a$ .

–  $\frac{\partial r_m}{\partial d_a}$  – чутливість відносно впливної величини  $d_a$ , яка визначається виразом

$$\frac{\partial r_m}{\partial d_a} = \frac{\sin(\alpha_a - \sigma_a)}{\sin(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m)} + \frac{d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a)}{\sin^2(\sigma_m - \sigma_a) \cos^2(\tau_m)} \times \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial d_a} \sin(\sigma_m - \sigma_a) \sin(\tau_m) - \frac{\partial \sigma_m}{\partial d_a} \cos(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m) \right), \quad (20)$$



а



б

Рис. 2. Похибки визначення горизонтального кута  $\sigma_m$ :

а – сумарна похибка зовнішнього орієнтування

б – сумарна похибка внутрішнього орієнтування

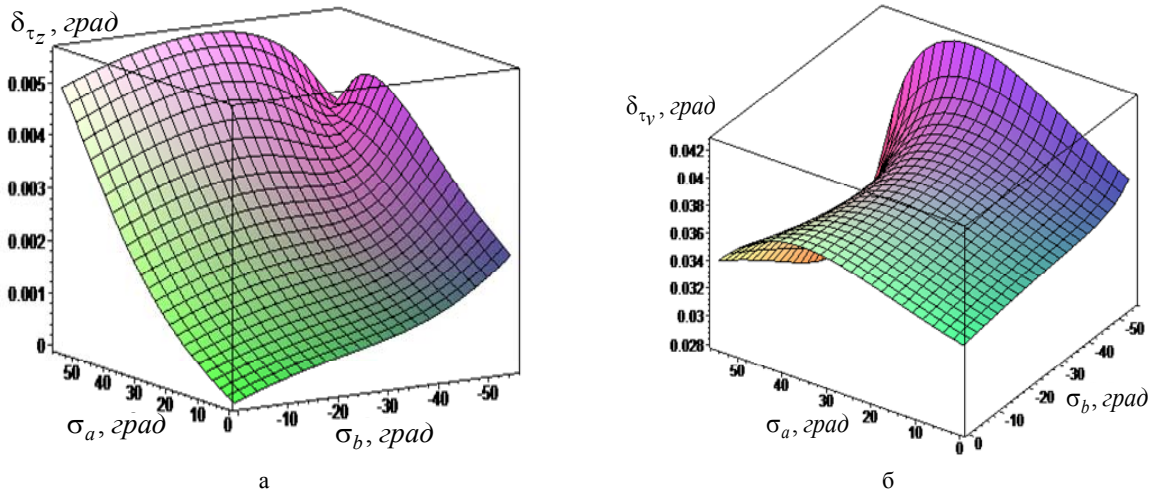


Рис. 3. Похибки визначення вертикального кута  $\tau_m$  :

а – сумарна похибка зовнішнього орієнтування

б – сумарна похибка внутрішнього орієнтування

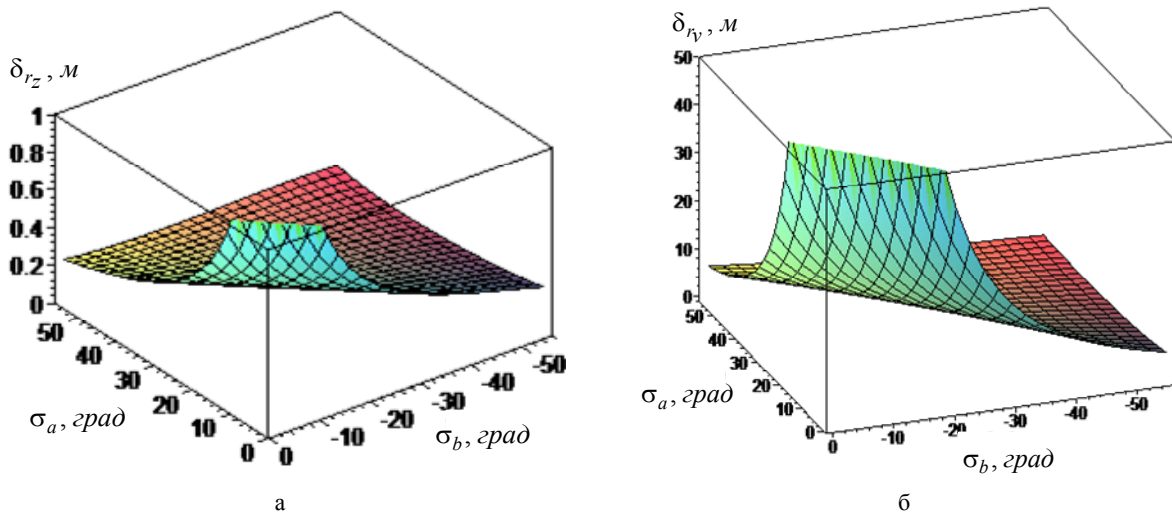


Рис. 4. Похибки визначення відстані  $r_m$  :

а – сумарна похибка зовнішнього орієнтування

б – сумарна похибка внутрішнього орієнтування

$-\frac{\partial r_m}{\partial \alpha_a}$  - чутливість відносно впливної величини

$\alpha_a$ , яка визначається виразом

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_m}{\partial \alpha_a} = & \frac{d_a \cos(\alpha_a - \sigma_a)}{\sin(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m)} + \\ & + \frac{d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a)}{\sin^2(\sigma_m - \sigma_a) \cos^2(\tau_m)} \times \\ & \times \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial \alpha_a} \sin(\sigma_m - \sigma_a) \sin(\tau_m) - \right. \\ & \left. - \frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_a} \cos(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m) \right), \end{aligned} \quad (21)$$

$-\frac{\partial r_m}{\partial \sigma_a}$  - чутливість відносно впливної величини

$\sigma_a$ , яка визначається виразом

$$\begin{aligned} \frac{\partial r_m}{\partial \sigma_a} = & \frac{-d_a \cos(\alpha_a - \sigma_a)}{\sin(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m)} + \\ & + \frac{d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a) \cos(\sigma_m - \sigma_a)}{\sin^2(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m)} + \\ & + \frac{d_a \sin(\alpha_a - \sigma_a)}{\sin^2(\sigma_m - \sigma_a) \cos^2(\tau_m)} \times \\ & \times \left( \frac{\partial \tau_m}{\partial \alpha_a} \sin(\sigma_m - \sigma_a) \sin(\tau_m) - \right. \\ & \left. - \frac{\partial \sigma_m}{\partial \alpha_a} \cos(\sigma_m - \sigma_a) \cos(\tau_m) \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Сумарна похибка визначення відстані до балістичного тіла, обумовленої похибками у визначенні елементів зовнішнього орієнтування  $d_a, d_b, \alpha_a, \alpha_b$ , може бути оцінена за формулою

$$\delta_{rz}^2 = \left(\frac{\partial r_m}{\partial d_a}\right)^2 \delta_{d_a}^2 + \left(\frac{\partial r_m}{\partial d_b}\right)^2 \delta_{d_b}^2 + \left(\frac{\partial r_m}{\partial \alpha_a}\right)^2 \delta_{\alpha_a}^2 + \left(\frac{\partial r_m}{\partial \alpha_b}\right)^2 \delta_{\alpha_b}^2 \quad (23)$$

та зображена на рис. 4а.

Сумарна похибка відносно елементів

$$\delta_{rv}^2 = \left(\frac{\partial r_m}{\partial \sigma_a}\right)^2 \delta_{\sigma_a}^2 + \left(\frac{\partial r_m}{\partial \sigma_b}\right)^2 \delta_{\sigma_b}^2 + \left(\frac{\partial r_m}{\partial \tau_a}\right)^2 \delta_{\tau_a}^2 \quad (24)$$

зображена на рис. 4б.

Для проведення комп'ютерного моделювання були використані числові значення максимально допустимих похибок, використовуваних технічних пристроїв, зазначених у їх паспортних даних. У якості далекомірної прилади було взято лазерний далекомір Bosch GLM 80, похибка по відстані якого становить  $\delta_d = \pm 0,015 \text{ м}$ . У якості числового значення похибки визначення кутів  $\delta_\alpha$  було взято значення  $15''$ , що відповідає теодоліту 2Т10ВП. Моделювання проводилось за умови симетричного розташування елементів системи, а саме при  $d_a = d_b = 50 \text{ м}$ ,  $-\alpha_a = \alpha_b = 120^\circ$ , в середовищі програмної системи *Maple 5.00*.

## Висновки

Проведено аналіз причин виникнення похибок при визначенні та розрахунку координат балістичного тіла шляхом цифрової фотореєстрації на траєкторії польоту. Виділено складові похибок, обумовлені внутрішніми і зовнішніми чинниками. Зовнішні похибки містять складові, пов'язані із визначенням відстаней та кутів між елементами системи фотореєстрації. Причини внутрішніх похибок обумовлені технічними характеристиками неметричних камер.

Досліджено чутливість розрахованих відповідно до використаної математичної моделі сферичних координат балістичного тіла до різних груп похибок за різних умов спостереження. Встановлено, що при стереофотореєстрації балістичного тіла на початковій ділянці траєкторії найбільшими будуть зовнішні похибки визначення горизонтального кута, обумовлені похибками вимірювання відстані. Зовнішні похибки будуть домінувати також при визначенні вертикального кута за типовим розташуванням елементів системи.

Серед похибок визначення відстані до балістичного тіла найсуттєвішими будуть внутрішні похибки при фотореєстрації віддаленої частини траєкторії.

Встановлено також, що величина внутрішніх складових похибок суттєво залежить від параметрів використаних камер та якості їх калібрування.

## Список літератури

1. Кучеров А.С. Измерительно-вычислительный комплекс для натуральных экспериментов: учебное пособие / А.С. Кучеров, В.Г. Пуятин, В.Г. Середюк. – К.: КВИРТУ ПВО, 1992. – 301 с.
2. Хижняк В.В. Структура, завдання та напрямки розвитку полігонних вимірювально-обчислювальних комплексів / В.В. Хижняк // Наука і оборона. – 1999. – №1. – С. 59–63.
3. Лобанов А. Н. Фотограмметрия: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. / А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1984. – 552 с.
4. Оптика в военном деле: сборник статей. – Том II / сост. К.С. Андроников, В.В. Балаков, А.Н. Бужинский и др. [под ред. С.И. Вавилова и М.В. Савостьяновой] – 3-е изд. – Москва, Ленинград: Академия наук СССР, 1948. – 388 с.
5. Кузьменко Р.В. Моделирование траектории польоту артиллерийской мины за її образом, який отримано відеофіксацією / Р.В. Кузьменко // Системи озброєння і військова техніка. – 2011. – №2(26). – С. 61–64.
6. Шабатура Ю.В. Визначення координат балістичного тіла стереофотометричним методом та його метрологічний аналіз / Ю.В. Шабатура, Р.В. Кузьменко // Проблеми створення, випробовування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем: збірник наукових праць. – 2011. – Вип. №5. – С. 204–211.
7. Лобанов А.Н. Фототопография. Наземная стереофотограмметрическая съемка. 3-е изд., перераб. и доп. / А.Н. Лобанов. – М.: Недра, 1968. – 268 с.
8. Глов В., Пацетник О. Аналіз впливу похибок елементів внутрішнього орієнтування при коротко-базисному стереофотограмметричному зніманні / В. Глов, О. Пацетник. – Фотограмметрия, геоінформаційні системи та картографія. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Вип. II (16), 2008. – 117–122 с.
9. W. Xie, Zhang Z., Zhang J. Multi-image based camera calibration without control points // The international archives of the remote sensing and spatial information sciences/ XXXV congress ISPRS. Istanbul, 2004. – Comm. 5. – P. 36–41.
10. Глов В.М., Майоров Г.Є. Метод калібрування цифрових камер // Матер. 2-ї Міжнар. наук.-практ. конф. "Кадастр, фотограмметрия, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку". – Львів – Краків, 2000. – С. 163–169.
11. The Camera Calibration Toolbox v0.4 [Електронний ресурс] / Режим доступу до журн.: <http://graphics.cs.msu.ru/~ru/science/research/calibration/cpp>
12. AcrCalibrator 1.0 Released [Електронний ресурс] / Режим доступу до журн.: <http://www.fors.net/chromoholics/>
13. Camera Calibration Toolbox for Matlab [Електронний ресурс] / Режим доступу до журн.: [http://www.vision.caltech.edu/~bouguet/calib\\_doc/](http://www.vision.caltech.edu/~bouguet/calib_doc/)

### Анализ причин возникновения и оценка погрешностей определения координат снарядов и мин на траектории полета при применении цифровой фоторегистрации

П.П. Ткачук, Ю.В. Шабатура, Р.В. Кузьменко

*В работе проведен анализ причин возникновения погрешностей, которые предопределены внутренними и внешними факторами при определении координат снарядов и мин на траектории полета. Разработаны математические модели по оценке погрешностей определения координат снарядов и мин на траектории полета при стереофоторегистрации и их модели чувствительности к изменению входных параметров. Проведено компьютерное моделирование соответствующими процедурами пакета Maple 5.00.*

**Ключевые слова:** фоторегистрация, погрешность, координаты, траектория, снаряд

### Analysis of the causes and error estimates for determining the coordinates of mortar shells and bombs in flight trajectory using the digital photorecording

P. Tkachuk, Y. Shabatura, R. Kuzmenko

*An analysis of causes of the errors of determining the coordinates of shells and bombs at their flight trajectory with use of digital photorecording is presented in the paper. The internal and external error factors are defined and the corresponding estimates are built. The mathematical model of stereophotogrammetry is used for coordinates deriving. The coordinates sensitivity to base input parameters change is investigated and it is concluded that horizontal angle error is greater for close trajectory position and is mainly influenced by external factor errors, while distance error is negligible at close distance, noticeable at remote position and mainly influenced by internal factor errors. The internal factor errors rely strongly on digital camera specification. The computer modeling using relevant procedures of Maple 5.00 package has been conducted.*

**Keywords:** photometry, error, coordinates, shell, trajectory.

УДК 631.3

В.О. Чумакевич<sup>1</sup>, В.А. Назар<sup>1</sup>, К.М. Василів<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Академія сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного, Львів

<sup>2</sup> Львівський національний аграрний університет

## УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА БОЙОВИХ МАШИН

*В статті на основі аналізу перспективних напрямків розвитку механізмів наведення бойових машин пропонуються шляхи удосконалення електроприводів бойових машин, які є на озброєнні СВ ЗС України*

**Ключові слова:** бойова машина, електроприводи, система наведення, електронна система керування, цифрова система керування, стабілізатор, імпульсні підсилювачі, операційні підсилювачі.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Новий час диктує свої вимоги до конструкції і тактики застосування бойових броньованих машин на полі бою. Відходить у минуле масоване застосування броньованих армاد, чітка лінія фронту і закінчення війни із захопленням території. На початку ХХІ століття броньована техніка зазнає істотних перетворень, які пов'язані зі зміною існуючих концепцій ведення бойових дій. Тож значне місце в тактиці дій сучасних підрозділів сухопутних військ відводиться бойовим машинам.

Досвід застосування миротворчих підрозділів, підрозділів з підтримання миру та інших військових формувань у війнах і військових конфліктах показав важливість мати маневрену, добре озброєну бойову машину.

Різноманітне озброєння, яке використовується на бойових машинах, має, як правило, два приводи: механічний ручний та електричний дистанційний.

Електропривод механізмів наведення бойових машин пройшов значний шлях від простих механізмів до складних систем, які керуються електронними приладами та мають системи стабілізації ствола. Аналіз літератури показує, що найпоширенішим сьогодні є електроприводи з гіростабілізацією у вертикальній та горизонтальній площинах та електронною системою керування.

На бойових машинах, які сьогодні є на озброєнні Сухопутних військ ЗС України, використовують електроприводи, які були розроблені у 70-ті роки ХХ сторіччя. Вони морально та фізично застаріли. Нові розробки, наприклад, БМП-3, БТР-4, Дозор-Б, Пума тощо, засвідчують перспективність застосування електронних і цифрових систем керування електроприводами бойових машин.