

В. Б. Кононов, Ю. І. Рафальський, О. О. Дехніч

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ВІЛЬНО ПАДАЮЧИХ ТІЛ З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВИХ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

Анотація. Предметом вивчення в статті є залежності параметрів руху вільно падаючих тіл. Метою статті є дослідження методики визначення параметрів руху вільно падаючих тіл з використанням цифрових засобів вимірювання, в якості яких виступають цифрові відеокамери, впровадження яких дозволяє суттєво скоротити час на проведення обробки результатів випробувань. **Задача, що вирішується** – за допомогою визначених засобів реєстрації, вимог до проведення відео зйомки, визначених похибок координат об'єкту, допустимих значень відхилення площини дійсного шляху об'єкту від площини наземних орієнтирів, визначення вертикальної швидкості зниження обгрунтувати технічні рішення, впровадження яких в практику вимірювання дозволять регламентувати порядок розрахунку вертикальної швидкості зниження та швидкості горизонтального пересування на приземній ділянці траєкторії при проведенні стрибків (скидань) з парашутами з використанням цифрових засобів відео зйомки. **Результати.** Розроблена методика складається із визначення вимог щодо засобів реєстрації та їх характеристик; вимог до проведення відео зйомки; визначення похибки координат об'єкту за допомогою відеокамери, що складається з похибок, які вносяться у вимірювання під час зйомки та дешифрування; оцінки допустимих значень відхилення площини дійсного шляху об'єкту від площини наземних орієнтирів; визначення обчислення вертикальної швидкості зниження. **Висновки.** Методика регламентує порядок розрахунку вертикальної швидкості зниження та швидкості горизонтального пересування на приземній ділянці траєкторії при проведенні стрибків (скидань) з парашутами з використанням цифрових засобів відео зйомки. Запропоновані технічні рішення, що отримані при експериментальному дослідженні методики визначення параметрів руху вільно падаючих тіл з використанням цифрових засобів вимірювання надає можливість обирати найбільш корисну парашутну систему щодо використанні її за призначенням.

Ключові слова: параметрів руху вільно падаючих тіл, засоби реєстрації, вертикальної швидкості зниження.

Вступ

Постановка задачі. Правильне і глибоке розуміння суті методів вимірювань дозволяє організувати процес вимірювання так, щоб якнайкраще забезпечити виконання дуже суперечливих вимог щодо точності, часових і апаратних витрат. Незважаючи на чисельність методів вимірювань, можна виділити властиві їм спільні ознаки, за якими вимірювання розділяють на характерні різновиди. До найбільш поширених належать такі ознаки: фізична природа вимірюваних величин, функціональна залежність між шуканою і безпосередньо вимірюваною величинами, характер змінювання вимірюваної величини в часі, спосіб подання результату вимірювання, наявність попереднього (проміжного) вимірювального перетворення, кількість вимірювань у серії, характеристика точності, призначення вимірювань. Одним із питань процесу вимірювання є методика визначення параметрів руху вільно падаючих тіл з використанням цифрових засобів вимірювання, в якості яких виступають цифрові відеокамери, впровадження яких дозволяє суттєво скоротити час на проведення обробки результатів випробувань, що й підкреслює актуальність цієї науково-прикладної задачі.

Аналіз літератури. Принципи й організаційні основи метрологічного забезпечення, а також роль й місце метрологічного забезпечення Збройних Сил України, викладено в статтях [1, 2] та спеціальній літературі [3-7]. Математичні моделі визначення

кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості викладено в статті [1]. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення викладено в статті [2]. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення ООС викладені в літературі [3-5].

Нажаль в джерелах [1-7] питання, які пов'язані з визначення параметрів руху вільно падаючих тіл з використанням цифрових засобів вимірювання, не розглядалися.

Метою статті є дослідження методики визначення параметрів руху вільно падаючих тіл з використанням цифрових засобів вимірювання, в якості яких виступають цифрові відеокамери, впровадження яких дозволяє суттєво скоротити час на проведення обробки результатів випробувань.

1. Вимоги до відеозйомки

Існуюча нормативно-методична документація регламентує порядок визначення параметрів руху вільнопадаючих тіл за результатами кінозйомки і не розглядає питань, які пов'язані з використанням сучасної цифрової техніки.

Призначенням методики є доповнення існуючої нормативно-методичної документації визначення параметрів руху вільно падаючих тіл в частині використання цифрових засобів реєстрації.

Дана методика регламентує порядок розрахунку вертикальної швидкості зниження та швидкості горизонтального пересування на приземній ділянці траєкторії при проведенні стрибків (скидань) з парашутами з використанням цифрових засобів відеозйомки.

Перш за все проведемо дослідження вимог щодо засобів реєстрації. В якості оптичних засобів реєстрації використовуються цифрові відеокамери формату Mini-DV. Відеокамера повинна мати стандартний набір функцій:

- режими фокусування: автоматичний, ручний, блокування авто фокусування;
- система виміру експозиції: точкова, центральновзважена оцінна;
- управління експозицією: автоматичний пріоритет діафрагми, автоматичний пріоритет витримки, автоматична, блокування автоекспозиції;
- інтерфейси: IEEE 1394, USB 2.0, S-Video, відео-аудіо вихід / вхід;
- носії інформації: 8 – ми міліметрова відеокасети або HDD.

Мають бути забезпечені характеристики (не гірше): масштабування відео зображення: оптичне збільшення / разом із цифровим збільшенням – 10x / 700x; розмір ПЗС матриці від 1,2 мегапікселей, що дозволяє одержувати відеофільми натурального розміру від 720x576 точок розрізняючою здатністю 72-96 точок на дюйм; частота зйомки 25 кадрів у секунду; прописування відносного і абсолютного часу зйомки до структури кадру; можливість синхронізувати час зйомки від зовнішнього пристрою. На відеокамері має бути роз'єм для встановлення її на штатив.

Наступним кроком є дослідження вимог до проведення відеозйомки:

1) місце встановлення відеокамери повинне бути обрано таким чином, щоб забезпечувалась зйомка усього процесу з моменту відділення від літака до моменту приземлення. Відеозйомка повинна проводитись із штатива, встановленого на відстані від 50 до 300 метрів від проекції курсу літака на площадку приземлення;

2) встановлення засобів реєстрації повинно бути здійснено за допомогою нівеліровочних засобів на штативі;

3) при зніманні приземної ділянки траєкторії, з метою подальшого визначення вертикальної та горизонтальної складової швидкості, засоби реєстрації повинні бути зафіксовані у горизонтальній та вертикальній площині;

4) зйомка повинна починатись за декілька секунд до відділення від літального апарату парашутиста (манекена, вантажу та ін.) і закінчуватись через декілька секунд після приземлення;

5) при зйомці парашутів з манекенами, або при скиданні платформ, відеокамера повинна бути встановлена з навітряного боку відносно курсу літального апарату; встановлення оператора з навітряного боку знижує погрішність вимірювань (рис. 12);

6) якщо дозволяють умови, необхідно встановити на місцевості орієнтири, наприклад, щити або віхи з визначеними геометричними характеристика-

ми: висота, довжина, відстань між ними;

7) парашутист повинен бути вдягнутий у контрастний костюм, який дозволяє легко його ідентифікувати на фоні неба та місцевості, на платформі (вантажу) повинна бути нанесена смуга із біло-чорних (жовто-чорних) квадратів;

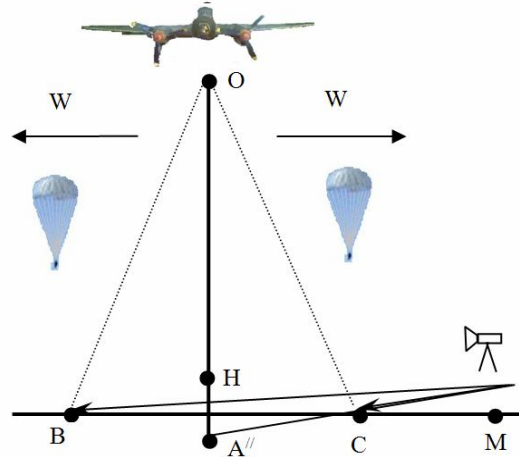


Рис. 1 Визначення впливу напрямку вітру і встановлення відеокамери на точність результатів вимірювання

8) перед проведенням залікових стрибків (скидань) виконується попередній стрибок для перевірки працездатності обладнання та врахування місцевих особливостей.

Типова схема обладнання місця приземлення наведена на рис. 2.

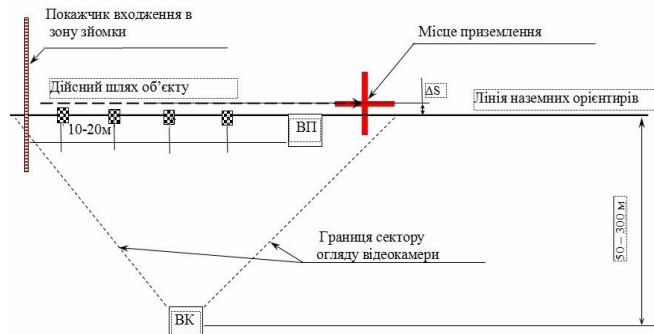


Рис. 2. Типова схема обладнання місця приземлення.

Похибка при визначенні координат об'єкту за допомогою відеокамери складається з похибок, які вносяться у вимірювання під час зйомки та дешифрування: від непаралельності площини явища що знімається і площини зображення на кадрі; суб'єктивних помилок у визначенні лінійних розмірів зображень при дешифруванні.

2. Визначення параметрів руху

Розглянемо методику оцінки допустимих значень відхилення площини дійсного шляху об'єкту від площини наземних орієнтирів.

Припустимо що відеокамера з фокусною відстанню F встановлена на віддаленні S від лінії орієнтирів, а об'єкт з лінійним розміром L під час зйомки літів з курсом, який складе з лінією наземних орієнтирів кут α . В цьому випадку розрахунковий

масштаб зображення на плівці, визначений з припущення паралельності площини явища що знімається і площини зображення:

$$M_p = F/S \quad (1)$$

Дійсний масштаб зображення буде різним у різних частинах кадру. Визначимо масштаб зображення для такого моменту зйомки, якщо об'єкт знаходиться у положення АВ:

$$M_1 = CB/BC. \quad (2)$$

У трикутнику ОВС згідно теоремі синусів справедливі співвідношення:

$$\frac{OC}{\sin(90 - (\beta \pm \alpha))} = \frac{BC}{\sin(90 + \alpha)}, \quad (3)$$

що крізь тригонометричні функції гострих кутів запишеться як:

$$\frac{OC}{\cos(\beta \pm \alpha)} = \frac{BC}{\cos \alpha}, \quad (4)$$

В запропонованих співвідношеннях верхній знак (плюс або мінус) відповідає випадку коли об'єкт знаходиться за лінією орієнтирів, нижній – випадку знаходження об'єкту перед лінією орієнтирів. Звідки може бути отримане значення ВС (нагадаємо, що $OC=S$):

$$BC = \frac{S \cos \alpha}{\cos(\beta \pm \alpha)}. \quad (5)$$

У трикутнику ОВС:

$$CB = F/\cos \beta. \quad (6)$$

Підставивши значення cb и BC у співвідношення для дійсного масштабу зображення, маємо:

$$M^1 = \frac{F \cos(\beta \pm \alpha)}{S \cos \beta \cos \alpha} = \frac{F}{S} \frac{\cos \alpha \cos \beta \mp \sin \alpha \sin \beta}{\cos \beta \cos \alpha}, \quad (7)$$

або кінцеву:

$$M^1 = (F/S) \cdot (1 \mp \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta). \quad (8)$$

Згідно з (8), дійсний масштаб зображення відрізняється від розрахованого множителем $(1 \mp \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta)$, який залежить від ступеня непаралельності площини явища що знімається і площини кадру (кут α) і від положення об'єкту відносно оптичної осі об'єкту (кут β). Так як величина кута β не може бути більш ніж половина кута зору об'єктиву відеокамери, то для кожного об'єктива по його фокусній відстані може бути визначено значення кута α , при якому скривлення масштабу не будуть перевищувати наперед задане значення.

Дані розрахунків для поширених значень фокусних відстаней об'єктивів при яких викривлення складають 5% ($\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta < 0,05$) приведені у табл. 1.

Відхилення вертикальної площини шляху об'єкту (ΔS) від площини наземних орієнтирів, при яких викривлення масштабу не перевищує 5%:

$$\Delta S = 0,05 \cdot H/\operatorname{tg}(\beta), \quad (9)$$

де H – висота об'єкту, м; β – половина кута зору об'єктиву.

Таблиця 1 – Дані розрахунків для поширених значень фокусних відстаней об'єктивів при яких викривлення складають 5% ($\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \beta < 0,05$)

Фокусна відстань об'єктиву, мм	35	50	75	100	250
Половина кута зору об'єктиву β , град (по горизонталі)	17 ⁰ 27'	12 ⁰ 25'	8 ⁰ 03'	6 ⁰ 17'	2 ⁰ 30'
Кут відхилення α , град	9 ⁰ 2''	13 ⁰ 5''	19 ⁰ 39''	25 ⁰ 12''	48 ⁰ 52''

Результати розрахунків для поширених значень фокусних відстаней об'єктивів приведені у табл. 2 (висота об'єкту $H=100$ м).

Таблиця 2 – Результати розрахунків для поширених значень фокусних відстаней об'єктивів

Фокусна відстань об'єктиву, мм	35	50	75	100	250
Бокове відхилення ΔS , метри	17,7	23,6	35,6	46,0	114,0

Розглянемо методику визначення обчислення вертикальної швидкості зниження. Методика складається із обчислення вертикальної швидкості зниження та методику визначення горизонтальної швидкості пересування, статистичної обробки результатів, приведення вертикальної швидкості зниження до стандартних умов.

Обчислення вертикальної складової швидкості зниження виконується у такому порядку:

1. Визначається розмір (у пікселях) характерних деталей зображення на кадрі. Наприклад, довжина стропи, яка в натуральному виді наперед виміряна. Тоді довжина зображення об'єкту на кадрі:

$$l = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (9)$$

де (x_1, y_1) – координати початку зображення об'єкту; (x_2, y_2) – координати кінця зображення об'єкту.

2. Визначається масштаб зображення об'єкту:

$$M = L/l, \quad (10)$$

де L – фактична довжина об'єкту.

3. По масштабах, визначених для кадрів n_1 та n_2 , обчислюється середній масштаб зображення:

$$M_{cp} = (M_{n_1} + M_{n_2})/2. \quad (11)$$

де n_1 – номер (назва) кадру, який обробляється; n_2 – номер наступного кадру, який підлягає обробці.

4. Визначається можливий зсув камери у вертикальній площині:

$$h_{zc} = y_{0n1} - y_{0n2}, \quad (12)$$

де y_{0n1} та y_{0n2} – ординати положення наземного орієнтиру відповідно на кадрах n_1 та n_2 .

5. Визначається різниця висот об'єкту на кадрах n_1 та n_2 :

$$h = y_{cn1} - y_{cn2} + h_{zc} \quad (13)$$

де y_{cn1} та y_{cn2} – ординати центру мас об'єкту відповідно на кадрах n_1 та n_2 .

6. Визначається інтервал часу між кадрами n_1 та n_2 :

$$\Delta t = N/f, \quad (14)$$

де N – кількість кадрів за аналізований період, $N = n_2 - n_1$; f – частота зйомки, кадр/сек.

7. Визначається вертикальна швидкість зниження:

$$V_{zn} = M_{cp} \cdot h/\Delta t. \quad (15)$$

Аналогічно визначаємо горизонтальну складову швидкості пересування.

Для висновку про відповідність парашуту, який проходить випробування, вимогам, результати розрахунків та вимірювань обробляються за допомогою методів математичної статистики.

Висновки

1. В статті досліджено методику визначення параметрів руху вільно падаючих тіл з використанням цифрових засобів вимірювання, в якості яких обрано цифрові відеокамери.

2. Призначенням методики є доповнення існуючої нормативно-методичної документації визначення параметрів руху вільно падаючих тіл в части-

ні використання цифрових засобів реєстрації.

3. Досліджена методика регламентує порядок розрахунку вертикальної швидкості зниження та швидкості горизонтального пересування на приземній ділянці траєкторії при проведенні стрибків (скидань) з парашутами з використанням цифрових засобів відео зйомки.

4. Досліджена методика складається із визначення вимог щодо засобів реєстрації та їх характеристик; вимог до проведення відео зйомки; визначення похибки координат об'єкту за допомогою відеокамери, що складається з похибок, які вносяться у вимірювання під час зйомки та дешифрування; оцінки допустимих значень відхилення площини дійсного шляху об'єкту від площини наземних орієнтирів; визначення обчислення вертикальної швидкості зниження.

5. За допомогою дослідженої методики визначення параметрів руху вільно падаючих тіл з використанням цифрових засобів вимірювання доцільно обирати найбільш корисну парашутну систему щодо використанні її за призначенням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кононов В.Б., Бурцева В.В. Математичні моделі визначення кількості замовлень на гарантоване метрологічне обслуговування зразків озброєння та військової техніки з урахуванням їх важливості Системи обробки інформації: зб. наук. пр. ХНУПС. – Вип.1 (147). – Харків, 2017. – С. 88–92.
2. Кононов В.Б. Методика прогнозування можливостей метрологічних підрозділів з відновлення пошкоджених засобів вимірювальної техніки військового призначення // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Харків: НАУ ХАИ—2011.-№ 8 (85) -С.231 – 234.
3. Кононов В.Б., Науменко А.М., Водолажко О.В., Коваль О.В., Кондрашова І.І. Основи експлуатації засобів вимірювальної техніки військового призначення в умовах проведення АТО.- Харків: ХНУПС, 2017. – С. 288.
4. Кононов В.Б. Застосування електричних вимірювань засобами вимірювальної техніки в умовах проведення АТО: навч. посіб./ В.Б. Кононов, А.М. Науменко, О.В. Коваль та ін.. – Х.:ХНУПС, 2018. – 392 с.
5. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
6. Організація застосування пересувних засобів метрологічного обслуговування: навч. посіб. / І. Б. Кузнецов, О. В. Ярошенко. – К. : НУОУ, 2009. – 356 с.
7. Кузнецов І. Б., Марценківський В. Т., Ярошенко О. В., Буяло О. В., Проценко В. О. Удосконалення парку пересувних лабораторій вимірювальної техніки як фактор підвищення оперативності та ефективності метрологічного обслуговування складних систем // *Збірник наукових праць КНУ*. Вип. 32. – К. : ВІКНУ, 2011. – С. 33–46.

Received (Надійшла) 11.03.2020

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.07.2020

The study of methods for determining motion parameters freely falling objects using digital measuring instruments

V. Kononov, Yu. Rafalskij, O. Dehnich

Abstract. The subject of the study of the article is the dependence of the time of movement of free falling objects. The purpose of the article is study of the methodology for determining the parameters of the movement of free falling objects using digital measuring instruments in which quality digital video cameras. The introduction of which will make it possible do it in short time for process and test results. **The problem to be solved** is with the help of certain means of registration requirements for conducting of certain object's coordinates of the allowable values of deviations of the area of the actual path of the object from the area of landmarks, determination of the vertical rate of decline justification of technical solutions, the introduction of which into the practice of measurement will allow regulating the procedure for calculating the vertical rate of decline, and also the speed of horizontal movement on the surface of the trajectory during jumps (dropping) with parachute using digital video shooting. **Results.** The developed methodology consists of determining the requirements for means of registration and their characteristics; requirements for video recording; Determining the error of the coordinates of the object using a video camera, which consists of errors that are introduced into the measurement during shooting and decoding; estimates of permissible values of deviation of the plane of the actual path of the object from the plane of landmarks; determining the calculation of the vertical rate of decline. **Conclusions.** The method regulates the procedure for calculating the vertical rate of descent and the speed of horizontal movement on the ground section of the trajectory when performing jumps (dumps) with parachutes using digital means of video recording. The proposed technical solutions obtained from the experimental study of the methodology for determining the motion parameters of freely falling objects using digital measurements tools make it possible of verify the most appropriate parachute system for its intended use.

Keywords: parameters of falling objects of registrations vertical descent rate.