

<https://doi.org/10.15407/knit2024.06.094>

УДК 523.68, 520.373, 521.97, 528.021.4, 528.23

П. М. КОЗАК^{1,2}, старш. наук. співроб., докторант, канд. фіз.-мат. наук

E-mail: kpm@knu.ua

І. В. ЛУК'ЯНИК¹, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: iluk@knu.ua

Л. В. КОЗАК^{2,3}, доцент, д-р фіз.-мат. наук

E-mail: kozakliudmyla@knu.ua

В. М. ІВЧЕНКО², зав. кафедри, д-р фіз.-мат. наук

E-mail: vasyi_ivchenko@knu.ua

В. П. ЛАПЧУК², зав. навчальної лабораторії

E-mail: v.p.lapchuk@gmail.com

С. В. СТАРИЙ⁴, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: astro59@ukr.net

О. Б. СТЕЛЯ⁵, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

E-mail: oleg.stelya@gmail.com

¹ Астрономічна обсерваторія Київського національного університету імені Тараса Шевченка
вул. Обсерваторна 3, Київ, Україна, 04053

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет
проспект Академіка Глушкова 4, Київ, Україна, 03680

³ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
проспект Академіка Глушкова 40, корп. 4/1, Київ, Україна, 03187

⁴ Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова Національної академії наук України
проспект Науки 41, Київ, Україна, 03028

⁵ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, факультет комп'ютерних наук та кібернетики
проспект Академіка Глушкова 4д, Київ, Україна, 02000

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМИ РОЗМІЩЕННЯ ТА ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЕОКАМЕР ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНИХ ЗАДАЧ ЛОКАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРИ ТА БЛИЖНЬОГО ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ НА ОСНОВІ ДОСВІДУ МЕТЕОРНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

У роботі розглядається проблема створення локальних зон моніторингу атмосфери та ближнього повітряного простору в оптичному діапазоні спектру з метою пошуку природних і штучних динамічних об'єктів, розрахунку їхніх координат, швидкостей та можливої ідентифікації. Для відповідних розрахунків використовується багаторічний досвід базисних відеоспостережень метеорів на висотах 80...130 км, оригінальні методи обробки відеопотоків із зображеннями метеорів та

Цитування: Козак П. М., Лук'яник І. В., Козак Л. В., Івченко В. М., Лапчук В. П., Старий С. В., Стеля О. Б. Оптимізація схеми розміщення та технічних характеристик відеокамер для спеціальних задач локального моніторингу атмосфери та ближнього повітряного простору на основі досвіду метеорних спостережень. *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 6 (151). С. 94—111. <https://doi.org/10.15407/knit2024.06.094>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2024. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

спеціально розробленого програмного забезпечення. Розглядаються дві складові проблеми, які умовно можна назвати прямою та оберненою задачею. Пряма задача передбачає розрахунок розмірів спільної зони моніторингу та мінімальних розмірів динамічного об'єкта для пари відеокамер з уже вибраними технічними характеристиками, як то фотоприймач та об'єктив, та встановленими у певних місцях з заданою орієнтацією оптичних осей. Також дана задача має передбачати оцінку точності обчислення координат та швидкості об'єктів. Обернена задача, навпаки, передбачає рекомендації щодо вибору типів відеокамер, їхніх положень, та орієнтації оптичних осей для заданих зон моніторингу та типах об'єктів, в залежності від поставленої задачі — лише детектування об'єктів, або і їхню можливу ідентифікацію. Дана задача має передбачати оптимізацію за точністю обчислення координат та швидкостей об'єкта. Для розв'язку даних задач виводяться необхідні формули, як для забезпечення необхідної роздільної здатності, так і для розрахунку тривимірної спільної зони моніторингу, досліджується її зміна з висотою. Приводяться розрахунки для оцінки роздільної здатності відеокамер та фотографічних об'єктивів, які використовувалися для спостережень метеорів, і відповідно робляться висновки щодо динамічних об'єктів ближнього повітряного простору, які можуть бути зареєстровані та ідентифіковані. Робиться висновок про необхідність використання сучасних цифрових камер, оснащених об'єктивами із змінним фокусом для виконання поставлених задач моніторингу швидких малорозмірних об'єктів. Для прикладу створення парних спостережних базисів, або невеликих локальних моніторингових мереж розглядаються три приклади розміщення відеокамер та робиться висновок про їхню ефективність.

Ключові слова: базисні відеоспостереження, відеокамери, зона локального відеомоніторингу, атмосфера і повітряний простір, оптимізація відеоспостережень, триангуляція, метеори.

1. ВСТУП

Спостереження метеорів на сьогодні проводяться загалом двома основними методами: у радіодіапазоні — радаром, причому як прямого, так і зворотного розсіювання, та у оптичному — відеосистемами (від видимого до далекого інфрачервоного діапазонів). Відеоспостереження метеорів дають набагато більше інформації про метеор, особливо якщо одну або декілька камер спостережної відеосистеми оснащено передоб'єктивними ґратками або призмиами [1, 19]. За допомогою відеоспостережень метеорів створюються бази даних кінематичних характеристик індивідуальних метеорів, як поточкових, так і спорадичних [7]. Крім створення метеорних каталогів та накопичення статистичної інформації про метеори загалом, відеоспостережна апаратура з правильно підібраними чутливістю, відношенням сигнал/шум, просторовою та часовою роздільною здатністю дозволяє отримувати інформацію про досить рідкісні у спостереженнях метеори, які іноді називають аномальними. Це метеори, дотичні до земної атмосфери [10], метеори з надвеликими висотами появи [11, 16], метеори з дифузною структурою на початку траєкторії [15], метеори з бімодальною кривою блиску [13], метеорні кластери [20], та деякі інші типи метеорів.

Для розрахунку параметрів траєкторії в земній атмосфері та елементів геліоцентричної орбіти

метеороїдів відеоспостереження повинні бути базисними, тобто одна атмосферна зона має спостерігатись одночасно з двох пунктів. Далі схема розрахунків будується, з тими чи іншими варіаціями, на основі триангуляції. Для метеорів, які світяться на висоті приблизно 130...80 км, довжина базису — відстані між пунктами — має бути сумірною з висотою. Так, з очевидних міркувань можна зробити висновок, що оптимальна точність досягається при позиційному куті (кут з точки на метеорі між напрямками на пункти спостережень), рівному 90° . У роботі [9] було показано аналітично та підтверджено шляхом статистичного моделювання, що дане твердження справедливе, і відстань між пунктами спостережень для забезпечення максимальної точності має становити 200 км при висоті метеора 100 км, якщо базисна відстань відома точно. Інакше, якщо даний параметр також розглядається як величина з певною похибкою, для забезпечення максимальної точності базисна відстань має бути дещо більшою. При необхідності можна проводити спостереження і на менших базисах, але точність розрахунків при цьому буде нижчою від оптимальної. Так, у м. Миколаїв при використанні відносно довгофокусного спостережного комплексу, який забезпечував поле зору приблизно $3^\circ \times 4^\circ$, базис дорівнював лише 11 км [12].

Тим не менш, точність при спостереженні метеорів, яка очевидно забезпечується характерис-

тиками спостережної апаратури і диспозицією спостережних пунктів, є однією з кінцевих цілей оптимізації метеорних спостережень. Інша мета — намагатися відспостерігати метеор впродовж всієї його траєкторії, яка може бути досить довгою, для чого потрібне велике поле зору відеокамер. Також велике поле зору спостережних камер необхідне для максимізації кількості спостережуваних метеорів і накопичення відповідної статистики. Очевидно, що велике поле зору вимагає відносно коротких фокусних відстаней об'єктива, що призводить до великого кутового розміру пікселя, і зниження просторової роздільної здатності апаратури. Для усунення такої проблеми та накопичення достатнього спостережного матеріалу організовуються спостережні метеорні мережі [2, 3, 8, 14, 18]. Огляд метеорних мереж світу можна знайти у роботі [4].

Коли йдеться про випадкові комбінації пар спостережних камер, то такі мережі лише накопичують матеріал. Якщо ж цілеспрямовано виконується задача охопити якомога більший спостережний об'єм атмосфери і зберегти при цьому гарну просторову роздільну здатність — використовуються комплексні спостережні точки, які складаються із серії відносно довгофокусних об'єктивів [8]. Безперечно, це забезпечить виконання поставленої задачі, але суттєво збільшить вартість спостережних комплексів. Якщо ж ставиться окрема задача отримати максимальну роздільну здатність при спостереженнях метеорів для дослідження їхньої дрібної структури (фрагментації у польоті) [17], або реєстрації найдрібніших метеорів в оптичному діапазоні, доцільніше використовувати телескопічні спостереження [5, 6].

Із сказаного вище зрозуміло, що вимоги до спостережної апаратури різні для різних задач. Щодо просторової роздільної здатності, то для спостережень будь-яких метеорів, як слабких, так і болідів, використовуються відеокамери із стандартною телевізійною розгорткою: 25 к/с для систем PAL/SECAM або 30 к/с — для NTSC. Поля зору камер варіюють (крім телескопічних спостережень) від десятка до сотні градусів (у болідних мережах також використовуються камери всього неба [3]), і для таких задач, очевидно, ма-

ють використовуватися ширококутні фотографічні об'єктиви. Просторова роздільна здатність залежить від двох факторів: фокусної відстані об'єктива і від роздільної здатності фотоприймача. Щодо останнього, то для спостережень метеорів досі використовуються достатньо чутливі камери сімейства Watec, які мають приймач розміром 1/2 дюйма з роздільною здатністю 752×582 пікселів при лінійному розмірі пікселя 8.6×8.3 мкм. Сучасні системи спостережень використовують цифрові камери великого формату.

В умовах сучасності світу є досить широкий спектр задач, як винятково наукових, так і прикладних, в яких можуть ефективно використовуватися базисні відеоспостереження атмосфери та ближнього повітряного простору. Йдеться про значно менші просторові масштаби, ніж при спостереженнях метеорів на висоті 100 км. Найпростіший приклад — спостереження таких атмосферних явищ, як грозові розряди, спрайти, ельфи, блакитні джети тощо. Для оцінки інтенсивності їхнього світіння потрібно знати відстань до них від спостережних пунктів, що досягається саме базисними спостереженнями. Інша задача — відслідковування міграції птахів з метою контролю популяції та ареалу розповсюдження, вирішення екологічних проблем. Більш прикладний аналог даної задачі — контроль межі аеродромів на предмет наявності птахів, які можуть створювати суттєву небезпеку для літаків, хоча в даному випадку можна використовувати і односторонні спостереження. Контроль повітряного простору вздовж державного кордону — ще одна важлива задача сьогодення. Крім того, надзвичайно важливим є пошук та виявлення штучних низько літаючих об'єктів, як то вертольоти, крилаті ракети, БПЛА. Усі задачі моніторингу та контролю атмосфери і нижнього повітряного простору можуть бути частково вирішені за наявності сприятливих погодних умов за допомогою локальних спостережних відеомереж, де використовуються ті ж методи триангуляційної обробки, що й при метеорних спостереженнях. В даній роботі розглядається задача оптимізації розміщення відеокамер та вибору їхніх технічних характеристик для моніторингу локальних повітряних зон на основі досвіду ви-

користання метеорних патрулів — базисних відеоспостережень метеорів.

2. ПІДБІР ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК СПОСТЕРЕЖНИХ ВІДЕОКАМЕР

Початкова задача в найбільш загальній постановці можна сформулювати так: потрібно здійснювати неперервний моніторинг певної зони повітряного простору — в заданих географічних координатах та діапазоні висот — з метою виявлення, розпізнавання, визначення поточних координат та швидкості об'єктів певних лінійних розмірів і певного діапазону швидкостей. У ряді спеціальних задач необхідно здійснювати обробку в реальному режимі часу, а також розраховувати прогноз руху об'єкта з метою цілевказування. У деяких випадках мінімальна відстань потенційного розміщення камер від даної зони є обмеженою, а у певних випадках можна ставити камери будь-де. Дана задача має дві складові. Перша — вибір камер з необхідною роздільною здатністю для детектування об'єктів певних лінійних розмірів в заданому діапазоні відстаней до камер, та з певним мінімальним полем зору, здатним охопити задану повітряну зону. Друга задача — вибір мінімальної кількості камер та місць їхнього розташування і орієнтації оптичних осей для оптимізації ефективної роботи даної локальної спостережної відеомережі. Додатковими складовими другої задачі є певна можливість вибору камер для різних базисних пар (у межах заданих після вирішення першої задачі параметрів), та забезпечення необхідної просторової точності. Розглянемо першу задачу.

Позначимо лінійний розмір очікуваного об'єкта ΔW , а діапазон очікуваних відстаней до нього в рамках вказаної зони — як $D_{\min}$ та $D_{\max}$. Оскільки відстані до спостережуваної зони та її розміри є невеликими (у порівнянні з задачею спостереження метеорів), то будемо використовувати деяку середню вздовж оптичної осі камери відстань D . Тоді для кутового розміру об'єкта $\Delta\psi$ наближено можна написати $\Delta\psi \approx \Delta W/D$, де кут виражено в радіанах. Для визначення наближеного максимального горизонтального та вертикального розміру зони моніторингу будемо користуватися більш строгими залежностями.

Введемо позначення для кутового розміру поля зору камери вздовж осі X у площині детектора як $\Delta\alpha$, а вздовж осі Y — як $\Delta\beta$. Тоді відповідні до даних кутів лінійні розміри зони атмосфери на відстані D від спостережного пункту будуть визначатися з очевидних геометричних формул:

$$\Delta L_X = 2D \operatorname{tg}(\Delta\alpha/2), \quad (1)$$

$$\Delta L_Y = 2D \operatorname{tg}(\Delta\beta/2). \quad (2)$$

При цьому, очевидно, горизонтальний лінійний розмір зони однозначно відповідає куту $\Delta\alpha$, тобто $\Delta L_H = \Delta L_X$, тоді як кут ΔL_Y не описує лінійний вертикальний розмір атмосферної зони, і його слід знайти окремо. З геометричних міркувань можна показати, що висота точки оптичного центра на відстані D описується формулою $H = D \sin E_l$, а висота верхівки та нижньої точки зони визначаться відповідно як

$$H_{\min} = D \cos E_l \operatorname{tg}(E_l - \Delta\beta/2), \quad (3)$$

$$H_{\max} = D \cos E_l \operatorname{tg}(E_l + \Delta\beta/2), \quad (4)$$

де через E_l позначено елевацию оптичної осі камери над горизонтом. Тоді загалом вертикальний розмір зони можна знайти з виразу $\Delta L_H = H_{\max} - H_{\min}$:

$$\Delta L_V = D \cos E_l \{ \operatorname{tg}(E_l + \Delta\beta/2) - \operatorname{tg}(E_l - \Delta\beta/2) \} \quad (5)$$

і в подальшому використовувати його замість (2). Очевидно, що при напрямленні камери в зеніт $\Delta L_V \rightarrow \infty$, і будь-яка камера охоплюватиме увесь діапазон висот $[0... \infty]$.

Відповідні лінійні мінімальні розміри детектора l_X та l_Y тоді очевидно мають бути,

$$l_X = 2F \operatorname{tg}(\Delta\alpha/2), \quad (6)$$

$$l_Y = 2F \operatorname{tg}(\Delta\beta/2), \quad (7)$$

де F — фокусна відстань об'єктива камери. Зрозуміло, можна було б одразу користуватися елементарними виразами що пов'язують безпосередньо лінійні розміри зони моніторингу та приймача:

$$l_X = F \frac{L_X}{D}, \quad (8)$$

$$l_Y = F \frac{L_Y}{D}, \quad (9)$$

однак як вхідні параметри зони моніторингу можуть бути задані її кутові розміри, тому формули (6), (7) нам потрібні також.

Розмір зображення протяжного об'єкта l_w загалом буде залежати від його кутової відстані до оптичного центру камери χ_{OC} . Для розміру зображення, перпендикулярного до радіальних напрямків з оптичного центра (тангенціальна складова) маємо

$$l_{WT}(\chi_{OC}) = \frac{2F}{\cos \chi_{OC}} \operatorname{tg} \frac{\Delta\psi}{2},$$

а для положення зображення об'єкта на оптичній осі, очевидно,

$$l_{W0}(0) = 2F \operatorname{tg} \frac{\Delta\psi}{2}.$$

Для радіального розміру будемо мати

$$l_{WR}(\chi_{OC}) = \frac{2F}{\cos^2 \chi_{OC}} \operatorname{tg} \frac{\Delta\psi}{2}.$$

Наприклад, для фотографічного об'єктива Ricoh TV 6 мм, $f/1.2$ в компоновці з камерою Watec WAT-902H2, поле зору відеокadra складає приблизно $56^\circ \times 44^\circ$ [4]. Якщо розглядати в якості максимального значення кута $\chi_{OCmax} \approx 50^\circ/2 = 25^\circ$, то максимальний (на краю кадра) тангенціальний розмір зображення по відношенню до його розміру в центрі кадра зростає приблизно в 1.10 раза, а для радіального — в 1.22, середні по кадру відповідні коефіцієнти будуть дорівнювати приблизно 1.02 та 1.05. Очевидно, що при полях зору порядку 50° та менше можна користуватися одним значенням розміру зображення об'єкта l_w :

$$l_w \approx 2F \operatorname{tg} \frac{\Delta\psi}{2}. \quad (10)$$

Для задач локального моніторингу ширші поля зору навряд чи можна буде задіяти через малу роздільну здатність детекторів випроміню-

вання. Згідно із виразами (6)—(7) лінійний розмір матриці при заданому розмірі моніторингової зони та дальності до неї визначається лише фокусною відстанню об'єктива. Для детектування ж об'єкта або спробі його розпізнавання та ідентифікації, головну роль буде відігравати розмір його зображення в пікселях. Інший фактор, який може впливати на розмір зображення рухомого об'єкта — його швидкість. Очевидно, при детектуванні швидкісних цілей, особливо за допомогою камер з довгофокусними об'єктивами, а також при низькій часовій роздільній здатності детекторів випромінювання зображення буде розтягуватись вздовж напрямку руху. Даний фактор слід враховувати при спробі ідентифікації об'єкта. Також поле зору камер має забезпечити можливість детектування рухомого об'єкта в кількох кадрах (мінімум — у двох) для розрахунку його швидкості.

Розглянемо, на яких відстанях і для об'єктів якого розміру будуть ефективними спостереження безпосередньо з використанням об'єктивів, які використовувалися для спостережень метеорів (висоти порядку 100 км) в компоновці з камерами сімейства Watec з роздільною здатністю детектора 752×582 пікселів. Їхня часова роздільна здатність становить 50 півкадрів за секунду — камера працює в режимі черезрядкової розгортки (англ. interlaced). Параметри деяких таких об'єктивів приведено в табл. 1.

Розглянемо особливості спостережень рухомих та відносно швидких у повітряному просторі штучних об'єктів (в основному мілітарного спрямування), а саме деяких типів крилатих ракет, БПЛА, мінідронів, гелікоптерів. У табл. 2

Таблиця 1. Характеристики системи з камерою Watec для різних об'єктивів, які використовуються для спостережень метеорів

Об'єктив	Фокусна відстань об'єктива F , мм	Відносний отвір об'єктива (світлосила)	Поле зору камери $\Delta\alpha \times \Delta\beta$, град.	Кутовий розмір пікселя, $P_{\Sigma 4}$
«Геліос-40»	85	1:1.5	4.4×3.3	0.3'
Raïxar	65	1:0.75	5.7×4.3	0.45'
«Юпітер-3»	50	1:1.5	7.4×5.5	0.6'
16KP1.2-35	35	1:1.2	10.6×7.9	0.8'
Ricoh TV12	12	1:1.2	30.2×22.8	2.3'
Ricoh TV06	6	1:1.2	56.6×43.9	4.5'

приведено їхні базові параметри: розміри, висоти польоту, швидкості. Слід зауважити, що при русі швидкого динамічного об'єкта слід розглядати ділянку його шляху ΔL_v , яку він проходить за час τ одного кадра телевізійної розгортки (як правило, $\tau = 0.04$ с), або за півкадр при черезрядковій телевізійній розгортці ($\tau = 0.02$ с), тобто величину $\Delta L_v = v\tau$ (остання графа у табл. 2), якщо вона значно більша за поздовжній розмір об'єкта ΔW , адже саме ця величина буде формувати розмір динамічного зображення. Якщо величини ΔW та ΔL_v сумірні — слід розглядати їхню суму. При цьому, очевидно, кутовий динамічний розмір об'єкта $\Delta\psi$ буде обернено пропорційним відстані до об'єкта та прямо пропорційним синусу кута γ_p — кута між напрямком руху об'єкта та напрямком на точку спостереження:

$$\Delta\psi \approx (\Delta W + \Delta L_v) \sin \gamma_p / D.$$

Іншими словами, формулу (10) можна переписати у вигляді

$$l_w \approx 2Ftg \frac{(\Delta W + \Delta L_v) \sin \gamma_p}{2D}. \quad (11)$$

Для подальшої оцінки ефективності використання камери Watec з табл. 1 для об'єктів з табл. 2 приймемо наближено, що для детектування об'єкта необхідно, щоб розмір його зображення був не меншим за 2-3 пікселі при достатньо великому контрасті зображення об'єкта з фоном неба, або дещо більшим в інших випадках. Для спроби ідентифікації об'єкта розмір зображення має бути ніяк не меншим 7-8, а краще 10 пкл. Дана величина, очевидно, сильно залежить від типу та особливостей конструкції літального апарата. Розмір l_p динамічного зображення об'єкта у пікселях можна знайти з виразу

$l_p \approx l_w / P_{sw}$, де P_{sw} — середній лінійний розмір пікселя. Значення наближене середнє, тому що в загальному випадку розмір пікселя по ширині та висоті може бути різним — так для камер Watec, в документації для варіанту CCIR (PAL/SECAM) вказано розмір пікселя 8.6×8.3 мкм. Інший варіант — визначити емпірично кутовий розмір пікселя камери — P_{sa} за знімками зовнішніх об'єктів, наприклад зірок — ці дані приведено в останній графі табл. 1. Тоді середній лінійний розмір пікселя можна знайти з кутового динамічного розміру об'єкта $\Delta\psi$ як $l_p \approx \Delta\psi / P_{sa}$.

Оцінимо два параметри: горизонтальний лінійний розмір повітряної зони ΔL_H для відповідного заданого поля зору камери $\Delta\alpha$ та розмір об'єкта в пікселях l_p як функції відстані D до об'єкта. Для розрахунків будемо використовувати формули (1) та (11). Також для визначеності будемо вважати, що об'єкти рухаються перпендикулярно до оптичної осі камери, коли $\sin \gamma_p \approx 1$, на відстанях, які відповідають їхнім можливим висотам, що еквівалентно спостереженню в зеніті $D \approx H$. Ще одним з критеріїв можливого застосування камери з вибраним об'єктивом будемо вважати необхідність попадання як мінімум двох зображень динамічного об'єкта в кадрі, тобто кутовий динамічний розмір об'єкта має бути менше половини кутового розміру кадра: $\Delta\psi < \Delta\alpha/2$.

Умовно об'єкти з табл. 2 можна розділити на підгрупи. Як приклад першої групи розглянемо великорозмірний об'єкт — гелікоптер, якого можна виявляти на великих відстанях, тому будемо використовувати значення максимальної висоти польоту (або дальності) $D \approx 4$ км. Для його виявлення та ідентифікації можна вико-

Таблиця 2. Необхідні для розрахунку базові характеристики деяких літальних апаратів (дані запозичені з відкритих джерел, <https://uk.wikipedia.org>)

Назва	Лінійні розміри ΔW , м	Висота польоту H , м	Швидкість польоту v , м/с	Шлях за 1 кадр $\Delta L_v = v\Delta t$, м
Гелікоптер К-52	16×5×7	5...4 000	70	1.4
Крилата ракета Х-555	6.0×0.5×3.1	40...110	230	4.6
Протикорабельна ракета «Калібр»	6×0.5×3	50...150	200	4
БПЛА «Шахед-136»	3×2	60...4 000	50	1
Мінідрон FPV r1	0.3	1...6 000	30	0.006

ристувати будь-який об'єкти з перерахованих, окрім Ricoh TV12 та Ricoh TV06 — вони створять зображення розмірами 6 та 3 пкл відповідно і годяться лише для детектування. Загалом об'єктиви «Юпітер-3» і «Геліос-40» досить ефективно застосовувались для спостережень метеорів у Києві [9, 11] з передавальними телевізійними трубками типу суперізокон Лі-804 і забезпечували поля зору $24^\circ \times 19^\circ$ та $13^\circ \times 11^\circ$ за рахунок великих лінійних розмірів фотокатода — приймача зображення. Однак у сукупності з камерою Wates поле зору у них значно менше, і їх можна використовувати для ідентифікації об'єктів. Так, розмір зображення гелікоптера буде близько 25 та 43 пкл на згаданий відстані відповідно. Зона повітряного простору на відстані 4 км становитиме $\Delta L_H \approx 520$ та 310 м, а сам об'єкт буде спостерігатися у 30 та 18 кадрах відповідно, що забезпечить надійне визначення швидкості. Тим не менш, малі поля зору практично унеможливають автоматичну роботу камери з даним об'єктивом, а лише в тандемі з оператором, або більш ширококутною оптичною системою. Об'єктиви Raixar і 16КП також дозволяють ідентифікацію об'єкта, однак вони зустрічаються набагато рідше, і ми не будемо приділяти їм великої уваги.

Інша група об'єктів — крилаті ракети та середньорозмірні БПЛА. Пошук ракет утруднений через їхню малу висоту польоту, що часто унеможливає детектування за допомогою радарів. Спостерігати їх можна на малих відстанях, а відносно велика швидкість польоту при цьому вимагає застосування більш ширококутних об'єктивів. Тому з табл. 1 для такої задачі по суті підходить лише один об'єктив — Ricoh TV06. Він забезпечить розмір зображення приблизно 142 та 47 пкл для відстаней до об'єкта 50 м та 150 м; охоплюється горизонтальна повітряна зона 54 м та 162 м при кількості кадрів 5 та 14 з наявним об'єктом. На практиці така ситуація може реалізуватися, наприклад, при прольоті ракет над руслами рік. Щодо детектування БПЛА, то тут проблемою є малі розміри та матеріал поверхні, який погано розсіює радіохвилі. Однак, якщо обмежитися висотами 300...400 м, де найчастіше відбуваються польоти, і середньою відстан-

ню від камери $D \approx 1$ км, то для пошуку БПЛА годяться усі об'єктиви з табл. 1, крім об'єктивів Ricoh TV12 та Ricoh TV06 — дані об'єктиви хоча і забезпечать максимальні поля зору ($\Delta L_H \approx 540$ та 1080 м), однак зображення будуть замалі для ідентифікації — розмір зображень буде 6 та 3 пікселі відповідно.

Щодо малорозмірних рухомих об'єктів з розмірами менше метра та в діапазоні висот до кілометра міг би підійти об'єктив «Геліос-40» (зображення 3 пкл), але контрольована ділянка повітряного простору занадто мала — близько 75 м. Тому для пошуку рухомих об'єктів найкраще підходять серед представлених у табл. 1 відносно ширококутні об'єктиви Ricoh. Об'єктиви радянського виробництва «Геліос-40» та «Юпітер-3» могли б використовуватись для розпізнавання об'єктів, однак вони зараз не випускаються і не можуть бути використані масово. Також варто зауважити, що усі представлені в табл. 2 літальні об'єкти є керованими, а отже, розрахунок прогнозу їхнього положення як функції часу є досить ненадійним, і може використовуватись лише як допоміжний елемент для коротких часових відрізків.

Аналіз проведених розрахунків приводить до висновку, що об'єктиви, які використовуються у спостережній метеорній астрономії для виявлення та розпізнавання літальних апаратів (ЛА), мають обмежене використання. На сьогодні широко використовуються цифрові камери з роздільною здатністю 1920×1080 пікселів — Full HD, 3840×2160 — 2K, і більше. Крім того, часто використовуються камери з об'єктивами змінної фокусної відстані (zoom). Як приклад можна привести мережеву цифрову камеру Univision UV-ZN2133 на базі чіпу IMX328 CMOS виробництва Sony, яка в режимі Full HD 1920×1080 має часову роздільну здатність 30 к/с. Розмір матриці $1/2.8''$. Телеоб'єктив може змінювати фокусну відстань у межах 4.8...158 мм, що відповідає 33-кратному оптичному збільшенню — відповідні кутові розміри горизонтального поля зору $60.5^\circ \dots 2.3^\circ$. Аналогічний варіант — система ТВ-M2MP-25XSS фірми TENBO TECHNOLOGY CO., має 25X моторизований зум з $F = 5.6 \dots 140$ мм, 2.38 MP, $1/1.9''$, фотоприймач IMX185 з розміром пікселя 3.75 мкм, поле зору

ширококутне: $59.8^\circ \times 44.4^\circ$, теле: $3.0^\circ \times 2.24^\circ$. На рис. 1, а—в приведено три тестові знімки скупчення зір скупчення Плеяди, отримані за допомогою даної камери з мінімальним, проміжним та максимальним збільшенням відповідно при експозиції 40 мс.

Крім того, з рисунка можна оцінити непогану чутливість камери — заявлена чутливість в кольорі 0.002 лк, та 0.0002 лк в чорно-білому форматі. Дана камера суттєво краща від розглянутих вище. Великорозмірні далекі об'єкти (гелікоптери на відстані 4 км) можуть виявлятися в режимі максимального поля зору (розмір зображення $l_w \approx 9$ пкл, зона моніторингу на $D \approx 1$ км складе $\Delta L_H \approx 4.7$ км, при цьому в полі зору об'єкт буде перебувати протягом $N \approx 250$ кадрів, тобто близько 10 с), та гарно ідентифікуватися при мінімальному полі зору ($l_w \approx 230$ пікселів, $\Delta L_H \approx 160$ м, $N \approx 10$). Для крилатих ракет та інших схожих швидких об'єктів, які спостерігаються на відстанях 50...150 м підходять режими лише з широким полем зору. Так при максимальному полі 60.5° відповідні значення будуть такі: $l_w \approx 330...140$ пкл, $\Delta L_H \approx 60...170$ м, $N \approx 5...16$. А от для повільніших БПЛА, що літають вище, можна також використовувати два режими. У ширококутному полі на відстані 1 км будемо мати $l_w \approx 8$ пкл, $\Delta L_H \approx 1170$ м, $N \approx 260$; а при мінімальному полі $l_w \approx 218$ пкл, $\Delta L_H \approx 40$ м, $N \approx 10$. Цікавим є той факт, що дана камера при максимальному фокусі, тобто при полі зору 2.3° , здатна розрізняти навіть малорозмірні дрони на відстані 1 км: $l_w \approx 16$ пкл, $\Delta L_H \approx 40$ м, $N \approx 135$. Тобто, є можливість використовувати спостережні системи з такими камерами в режимі максимального поля зору для пошуку рухомих повітряних об'єктів. Далі, після виявлення об'єкта за допомогою двигунів та відповідного програмного забезпечення можна перенаправити камеру так, щоб об'єкт попав у центр кадра, а далі зменшувати поле зору до мінімуму для ідентифікації об'єкта. Однак при базисних спостереженнях для визначення координат та швидкостей об'єктів оптичні осі мають бути строго орієнтовані для перетину в одній точці. Виходом буде використання у спостережній системі високоточного поворотного пристрою з вимірюванням координат точки на-

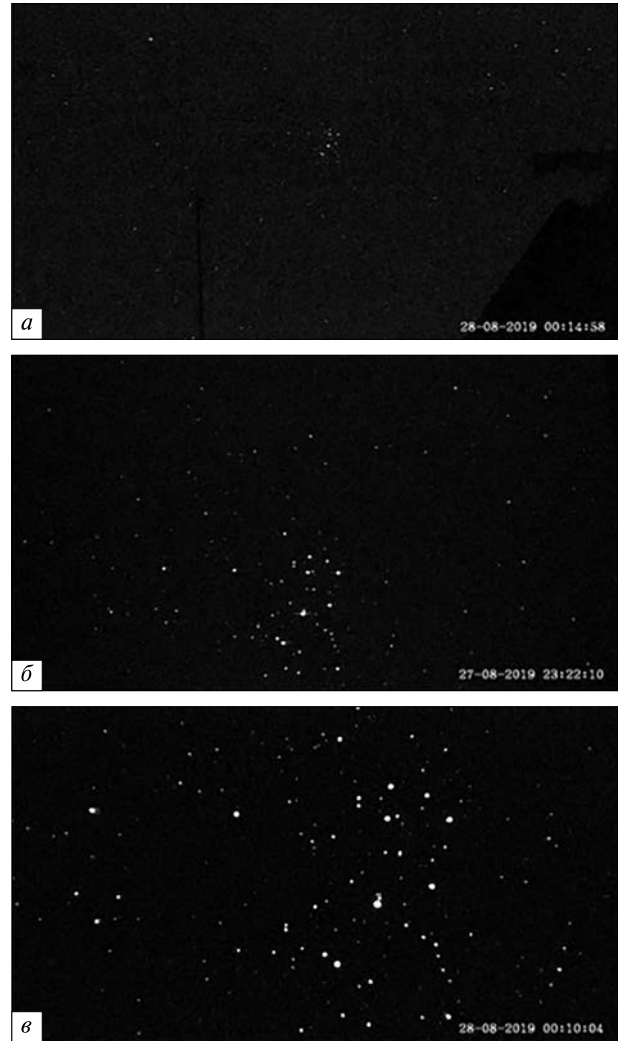


Рис. 1. Знімок скупчення зір Плеяди отриманий камерою TB-M2MP-25XSS з різним збільшенням

ведення або двох камер — стаціонарної та рухомої із змінним фокусом, хоча це більш ніж удвічі збільшить вартість комплексу. У ефективності такої системи можна не сумніватись, оскільки подібна двокамерна установка успішно застосовувалась канадськими дослідниками для спостереження метеорів, час життя яких порядку секунди або менше, а довгофокусну камеру слід переміщувати дуже швидко. Так вдалося зареєструвати метеор, який подрібнювався у процесі руху послідовно на декілька фрагментів, і цей процес було добре видно в декількох кадрах [17].

3. ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМИ РОЗМІЩЕННЯ СПОСТЕРЕЖНИХ КАМЕР

Наступним елементом оптимізації зон моніторингу у повітряному просторі є вибір місця розміщення та напрямку оптичних осей пар базисних відеокamer. Як критерій розв'язку даної задачі можна використовувати спільну площу атмосфери, яка перекривається полями зору камер в залежності від висоти. У загальному випадку, коли поля зору камер орієнтовані довільно, строгий розв'язок задачі виглядає досить складним. Однак якщо ввести деякі спрощення, задачу можна розв'язати досить легко. Тому припустимо, у першу чергу, що обидві камери стабілізовано в горизонтальній площині. При оптимізації розміщення камер у побудові метеорних спостережних мереж, де точки спостереження рознесені на досить великі відстані, а зона моніторингу за висотою перевищує сотню кілометрів, задачу можна розв'язувати у прямокутній геоцентричній системі координат з переходом до неї від геодезичних координат точок спостереження, що ускладнює розв'язок. Наразі введемо додаткові припущення про те, що камери розміщено в одній площині, тобто на однаковій висоті, а на-

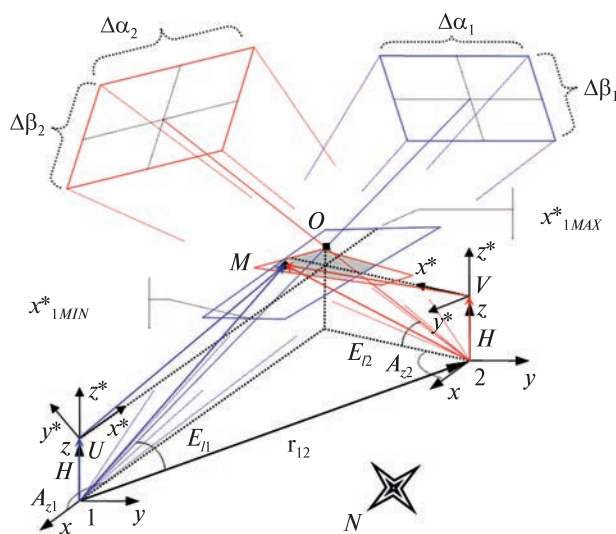


Рис. 2. Геометрична схема перекриття полів зору при базисних спостереженнях (зафарбована сірим кольором зона — спільна)

прямки оптичних осей будемо задавати в горизонтальній альт-азимутальній системі координат. Дане припущення не вплине суттєво на розрахунки для моніторингових зон на невеликих відстанях для об'єктів з табл. 2.

На рис. 2 приведено схему розміщення двох камер, позначених цифрами 1 та 2. Розрахунки будемо проводити в декартовій системі координат, розміщеній у точці 1, де вісь x направлена на північ (азимут відраховується від неї за годинниковою стрілкою). При цьому будемо вважати, що осі аналогічної системи координат у точці 2 орієнтовані паралельно до осей системи 1. Також будемо вважати, що базисний вектор $\mathbf{r}_{12} = \mathbf{r}_{12}\{x_{12}, y_{12}, z_{12}\}$ відомий. Оптичні осі камер мають азимут та елевачії над горизонтом відповідно A_1, E_1 та A_2, E_2 і перетинаються в точці O на деякій висоті H_O . Слід зауважити, що наявність спільної точки перетину оптичних осей не є необхідною умовою для того, щоб обидва поля зору частково перетиналися на певних висотах, однак така конфігурація є оптимальною. Також на рис. 2 приведено горизонтальний зріз полів зору камер на деякій висоті H . Як видно, поля частково перекриваються, і саме спільну площу $S(H)$ слід визначити як функцію висоти. Для цього введемо дві додаткові декартові правоорієнтовані системи координат, з нуль-пунктами, розміщеними над базовими системами координат на поточній висоті H — точки U та V . Осі x^*, y^* розміщені горизонтально, вісь x^* напрямлена у площині азимута відповідних оптичних осей, вісь z^* напрямлена вгору, вісь y^* доповнює трійку векторів до правоорієнтованої. Ідея розрахунку спільної площі полягає в тому, що початково для обох зрізів розраховуються їхні межі по координатах $x_{\min}^*, x_{\max}^*$ та $-y_{\max}^*(x^*), +y_{\max}^*(x^*)$, причому, як видно з рисунка, величини $-y_{\max}^*(x^*), +y_{\max}^*(x^*)$ є лінійними функціями від x^* . Після цього перебираються усі значення x_1^*, y_1^* у межах відповідних мінімальних та максимальних значень $x_{1\min}^*, x_{1\max}^*$ та $-y_{1\max}^*(x_1^*), +y_{1\max}^*(x_1^*)$, і на кожному кроці робиться векторно-матричний перерахунок у координати цієї ж точки для зрізу з іншого пункту x_2^*, y_2^* . Якщо дані значення лежать в межах $x_{2\min}^*, x_{2\max}^*$ та $-y_{2\max}^*(x_2^*), +y_{2\max}^*(x_2^*)$, то даний елемент $dS(x_1^*, y_1^*) = dx^* dy^*$ додається

ся до спільної площі $S(H)$, тобто

$$S(H) = \int_{x_{\min}^*}^{x_{\max}^*} \int_{y_{\min}^*}^{y_{\max}^*} dx^* dy^*.$$

На практиці будемо використовувати чисельний розв'язок, де послідовність ітерацій реалізується з деяким кроком Δx^* , Δy^* , а інтеграл замінюється сумою.

Розглянемо математичну складову розрахунку детальніше. Оскільки ми вибрали геометричну схему, де оптичні осі камер перетинаються, то у ролі початкових даних будемо використовувати лише A_{z1} , E_{l1} та відстань до точки перетину оптичних осей D_{10} , відтак вектор $\mathbf{r}_{10}$ буде мати компоненти

$$\begin{cases} x_{10} = D_{10} \cos E_{l1} \cos A_{z1}, \\ y_{10} = -D_{10} \cos E_{l1} \sin A_{z1}, \\ z_{10} = D_{10} \sin E_{l1}. \end{cases} \quad (12)$$

Як вхідні параметри замість відстані D_{10} від першого пункту можна також використовувати висоту перетину оптичних осей H_O — ці величини пов'язані очевидною рівністю $D_{10} = H_O / \sin E_{l1}$, де елевация має бути більшою від нуля. Тоді компоненти (12) набудуть вигляду

$$\begin{cases} x_{10} = H_O \operatorname{ctg} E_{l1} \cos A_{z1}, \\ y_{10} = -H_O \operatorname{ctg} E_{l1} \sin A_{z1}, \\ z_{10} = H_O, \end{cases} \quad (13)$$

де $E_{l1} > 0$. Для подальших розрахунків нам слід знайти вектор $\mathbf{r}_{20} = \mathbf{r}_{10} - \mathbf{r}_{12}$, компоненти якого $\{x_{20}, y_{20}, z_{20}\}$ можна описати системою, аналогічною (12), з якої можна знайти необхідні для практичного наведення камери з пункту 2: азимут A_{z2} та елевацию E_{l2} оптичної осі камери, та розрахувати D_{20} .

Для знаходження $x_{\min}^*$, $x_{\max}^*$ для кожного з пунктів скористаємося геометричною схемою, приведеною на рис. 2. Після нескладних перетворень отримаємо

$$\begin{cases} x_{\min}^* = H \operatorname{ctg}(E_l + \Delta\beta/2), \\ x_{\max}^* = H \operatorname{ctg}(E_l - \Delta\beta/2). \end{cases} \quad (14)$$

Величина $y_{\max}^*(x^*)$ розраховується дещо складніше, однак з рис. 2 можна отримати

$$\begin{cases} y_{\max}^*(x_{\min}^*) = \frac{H \operatorname{tg}(\Delta\alpha/2) \cos(\Delta\beta/2)}{\sin(E_l + \Delta\beta/2)}, \\ y_{\max}^*(x_{\max}^*) = \frac{H \operatorname{tg}(\Delta\alpha/2) \cos(\Delta\beta/2)}{\sin(E_l - \Delta\beta/2)}. \end{cases} \quad (15)$$

Таким чином, після того як границі зон перевірки на перетин та інтегрування встановлено, розпочинається власне процес перебору зони 1. Будь-яка точка $M(x_1^*, y_1^*)$ з даної зони описується вектором $\mathbf{r}_{1M}^*(x_{1M}^*, y_{1M}^*, 0)$ — на рис. 2 відповідає вектору $\mathbf{UM}$. Для того щоб отримати вектор $\mathbf{r}_{2M}^*(x_{2M}^*, y_{2M}^*, 0)$, потрібно здійснити ряд перетворень. Спочатку визначаємо вектор $\mathbf{r}_{1M}(x_{1M}, y_{1M}, z_{1M})$ як

$$\mathbf{r}_{1M}(x_{1M}, y_{1M}, z_{1M}) = \mathbf{r}_{1U}(0, 0, H) + \mathbf{R}_{A1N} \cdot \mathbf{r}_{1M}^*(x_{1M}^*, y_{1M}^*, z_{1M}^*), \quad (16)$$

де

$$\mathbf{R}_{A1N} = \begin{bmatrix} \cos A_{z1} & \sin A_{z1} & 0 \\ -\sin A_{z1} & \cos A_{z1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

— матриця повороту системи координат навколо осі z^* (або z — вони напрямлені однаково) від напрямку на азимут оптичної осі першої камери до напрямку на північ. Далі, очевидно, вектор $\mathbf{r}_{2M}(x_{2M}, y_{2M}, z_{2M}) = \mathbf{r}_{1M}(x_{1M}, y_{1M}, z_{1M}) - \mathbf{r}_{12}$. На цьому етапі можна запропонувати два різних алгоритми подальших дій. Перший з них такий — знаходимо зі складових вектора його кутові координати: азимут A_{z2M} та елевацию E_{l2M} і перевіряємо, чи лежать вони у межах $A_{z2M} \pm \Delta\alpha/2$ та $E_{l2} \pm \Delta\beta/2$. Якщо так — точка спільна. При такому алгоритмі не потрібно було б розраховувати $x_{2\min}^*$, $x_{2\max}^*$ та $y_{2\max}^*(x_{2\min}^*)$, $y_{2\max}^*(x_{2\max}^*)$. Інший алгоритм повторює початковий (16) у зворотному порядку і не потребує оберненого визначення кутових координат:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{2M}^*(x_{2M}^*, y_{2M}^*, 0) = \\ = \mathbf{R}_{NA2} \cdot \mathbf{r}_{2M}(x_{2M}, y_{2M}, H) - \mathbf{r}_{2U}(0, 0, H). \end{aligned} \quad (18)$$

Матриця $\mathbf{R}_{NA2}$ — матриця повороту від напрямку на північ до напрямку на азимут A_{z2} , яка має вигляд

$$\mathbf{R}_{NA2} = \begin{bmatrix} \cos A_{z1} & -\sin A_{z1} & 0 \\ \sin A_{z1} & \cos A_{z1} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Крім перевірки, чи є дана точка спільною, паралельно можна розрахувати її позиційний кут — кут між напрямками на точки спостереження, адже в основному саме він буде визначати точність визначення координат об'єкта в даному місці повітряного простору. Його можна визначити із скалярного добутку векторів

$$\frac{\mathbf{r}_{1M} \cdot \mathbf{r}_{2M}}{|\mathbf{r}_{1M}| |\mathbf{r}_{2M}|} = \cos \eta_p. \quad (20)$$

Фінальним етапом є аналіз отриманої залежності спільної площі базисно спостережуваної атмосфери від висоти $S(H)$.

4. ПРИКЛАДИ СТВОРЕННЯ МОЖЛИВИХ МОНІТОРИНГОВИХ ЗОН ПОВІТРЯНОГО ПРОСТОРУ

Як можливі зони моніторингу атмосфери і повітряного простору розглянемо декілька прикладів. Слід зауважити, що практично будь-які варіанти моніторингових контурів можуть бути зведені до декількох основних випадків. По-перше,

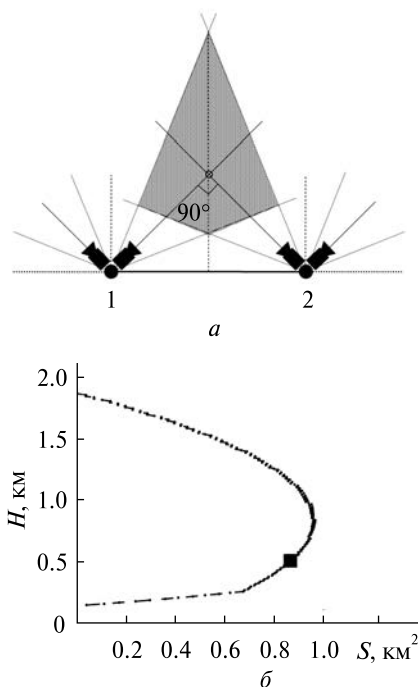


Рис. 3. Лінійна комбінація двох камер з перетином оптичних осей під кутом 90° (а), та залежність спільної площі моніторингу з висотою для спостережних пунктів при базисній відстані 1 км (б). Висота точки перетину оптичних осей позначена чорним квадратом

це лінійні зони, де серія камер розміщується вздовж певної лінії і може орієнтуватися вгору під певним кутом вздовж даної лінії — тобто усі оптичні осі лежать в одній площині 4. По-друге, це перпендикулярні (чи близькі до перпендикулярних) відхилення від цих ліній, що може реалізуватися, наприклад, на кутах моніторингових контурів. Розглянемо декілька потенційно можливих на практиці варіантів, але оскільки кількість варіацій розміщення та напрямків орієнтації оптичних осей камер формально є нескінченною, то будемо намагатися дотримуватися правила досягнення найкращої точності обчислення координат об'єкта — а саме будемо орієнтуватися на позиційний кут перетину оптичних осей приблизно 90° [9]. Зауважимо, що невеликі відхилення від прямого кута не призведуть до великої похибки — тим більше що такі випадки автоматично будуть мати місце для точок по всьому полю зору на віддалі від оптичного центра. При розрахунках будемо орієнтуватися на описану вище камеру зі змінним фокусом.

4.1. Приклад 1: моніторинг лінійної ділянки.

Перший — так званий лінійний — випадок може мати місце при охороні державного кордону, або контролю автостради. Суть його полягає в тому, що оптичні осі усіх камер лежать в одній вертикальній площині, яка проходить через лінію контролю-моніторингу. При цьому, очевидно, встановлення необхідного діапазону висот та відстаней між камерами має ставитися уповноваженими особами в кожному конкретному випадку. Найбільш простими виглядають два варіанти, які забезпечать в одному випадку точність, в іншому — охоплення широкої зони, починаючи від поверхні Землі, хоча кожен з них має свої недоліки. Отже, при розміщенні оптичних осей камер в одній площині вздовж заданої лінії, під кутом їхнього перетину 90° ($E_l = 45^\circ$) отримаємо картину, зображену на рис. 3, а. Рис. 3, б демонструє зміну спільної горизонтальної площі моніторингу з висотою. Як добре видно, при перетині оптичних осей камер на висоті 500 м максимальна площа (близько одного квадратного кілометра) лежить дещо вище — близько 830 м. Повну тривимірну картину продемонстровано на рис. 4.

З тривимірного графіка на рис. 4, *a* видно, що у площині XZ (XH), де лежить точка перетину оптичних осей камер, спільна зона починається з тієї ж висоти 130 м і швидко збільшується до максимальних розмірів — візуально швидше, ніж схематично показано на рис. 3, *a*. Водночас ширина спільної зони у площині YZ , тобто в напрямку, перпендикулярному до базисної лінії з висотою досить швидко розширюється в розмірах від 430 до 1650 м. В площині XY спільна зона моніторингу є симетричною відносно обох осей. Максимальні розміри площі на висоті $H \approx 830$ м складають: $\Delta X \approx 500$ м, $\Delta Y \approx 1$ км. Зауважимо, що рис. 4 відображає 3-вимірну картину в оригінальних співвідношеннях лінійних розмірів. Чорними кружками на рис. 4 позначено положення пунктів, а чорним квадратом — точка перетину оптичних осей.

Комбінація лише пари камер, незважаючи на відносно широке поле зору, створить достатньо обмежену зону моніторингу. Так, при розглянутому вище максимальному полі зору $\Delta\beta \approx 60^\circ$ при відстані між пунктами 1 км відстань до точки перетину оптичних осей складе близько 700 м, а висота зони моніторингу за формулами (3)—(4) буде лежати в межах від 130 до 1.9 км, і при цьому роздільна здатність буде низькою через великий кутовий розмір пікселя. Очевидно, діапазони висот не є достатніми як знизу, так і згори. Підняти роздільну здатність камер та збільшити верхню межу висотного діапазону можна комбінацією серії камер, як показано на рис. 5, *a*. Варіюючи розмір поля зору камер через зміну фокусної відстані об'єктива, можна добитися повного перекриття зон моніторингу камер 1—2, 1—3, 1—4 і т.д. Однак нижня межа в 130 м є занадто великою. Її можна понизити через зменшення базисної відстані, однак це не завжди можливо на практиці, і буде достатньо затратним. Так, ставити камери на відстанях менше одного кілометра можна, наприклад, при контролі автострад, аналогічно до спостережних камер дорожньої поліції, оскільки вздовж доріг практично завжди є лінії електропередач. Але при моніторингу державного кордону, або іншої лінійної структури на пересіченій місцевості, це неможливо. Єдиною альтернативою тут буде відхід від оптималь-

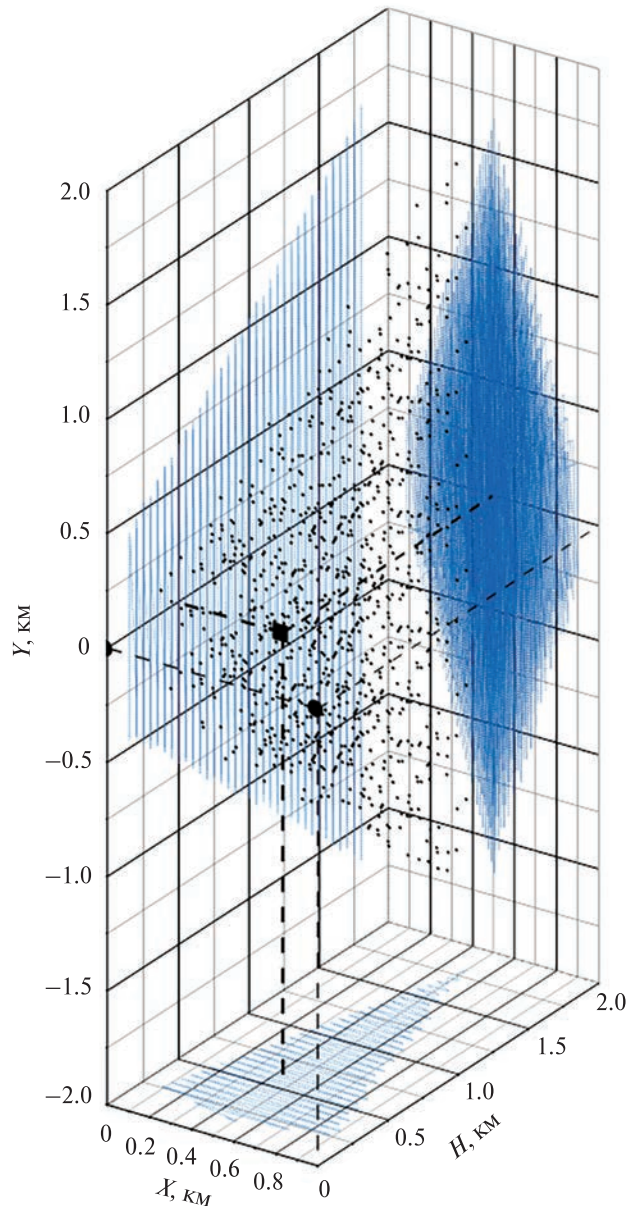


Рис. 4. Тривимірна реалізація схеми моніторингу відповідно до рис. 3, *a*

ної точності вимірювань, і направлення камер одна на одну так, щоб при полях зору $\Delta\beta = 60^\circ$ їхні оптичні осі перетиналися під кутом 120° , як це показано на рис. 5, *б*. В такому положенні зона моніторингу буде починатись від поверхні землі незалежно від відстані між камерами, що також дозволить підняти верхню межу зони до довільних висот.

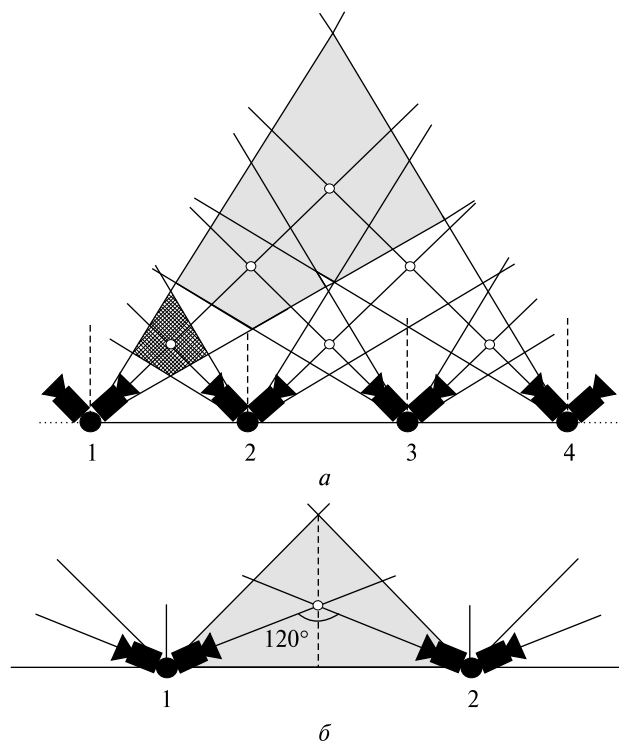


Рис. 5. Альтернативні до рис. 3, б схеми лінійного моніторингу

Недолік такої комбінації очевидний — мала роздільна здатність, коли камери забезпечать в основному виконання задач детектування штучних літальних об'єктів, при не завжди можливій їхній ідентифікації. Крім того, для об'єктів у приземній зоні буде неможливо визначити їхні координати (крім кутових) та швидкості, оскільки метод тріангуляції дасть надвелику похибку при кутах приблизно 180° . Як альтернативу можна запропонувати дві паралельні камери, одна з широким полем зору — для детектування, інша зі змінним — для ідентифікації.

4.2. Приклад 2: моніторинг річкової акваторії.

Інший приклад описує ситуацію, коли вздовж зони моніторингу камери розмістити неможливо. Типовий приклад — контроль повітряного простору над руслами великих рік. Часто об'єкти воєнного спрямування (ракети, БПЛА) запускаються низько над водою вздовж річкових русел, використовуючи той факт, що річки протікають у низинах, недоступних радарним спостереженням. У цьому випадку виглядає очевидним роз-

містити камери на сусідніх берегах, та спрямувати їх одна на одну під деяким кутом елевацій оптичних осей. Однак у попередньому розділі були описані недоліки такого підходу, зокрема суттєве падіння точності розрахунку координат при тріангуляції. Більш універсальний, і, можна сказати, оптимальний варіант — направити камери вбік — вгору чи вниз по руслу ріки, причому в такому випадку можна скористатись парами камер у кожному спостережному пункті (рис. 6). При цьому можна залишити необхідною умовою перетин оптичних осей базисних камер під кутом, близьким до 90° . У такому випадку маємо унікальну можливість не лише збільшити точність обчислень координат та швидкостей динамічних об'єктів, а й збільшити зону контролю повітряного простору удвічі, причому ці зони будуть рознесені вздовж потенційного напрямку руху об'єктів.

При такому варіанті орієнтація камер в загальному випадку буде задаватись двома координатами — елевацією оптичних осей на горизонті E_l та відносним локальним азимутом A_{z21} (рис. 6). При цьому для визначеності вважатимемо параметри спостережних камер однаковими ($\Delta\beta_1 = \Delta\beta_2$), і для прикладу розглянемо варіант розрахунку однієї спільної зони атмосфери справа в системі координат ближньої точки 2 на рис. 6, а друга розраховується аналогічно в системі координат пункту 1. У загальній теорії розрахунків для оптимізації орієнтації камер зручно буде користуватися не азимутом та елевацією оптичної вісі камери, які є необхідними для практики позиціонування та наведення спостережної системи, а іншими параметрами. Перший з них виберемо таким, щоб точка перетину оптичних осей була симетричною відносно розташування базисних камер — для цього виберемо площину, перпендикулярну до базисної лінії між камерами, і розташовану на однаковій відстані $r_{12}/2$ від камер (умовно середина русла ріки) на лінії базису (рис. 6). Дана вимога не є необхідною в загальному випадку, але наразі є оптимальною. Інші незалежні параметри — висота H точки перетину оптичних осей камер і відстань $L_\perp$ у горизонтальній площині по нормалі від середини базисної лінії до проекції точки

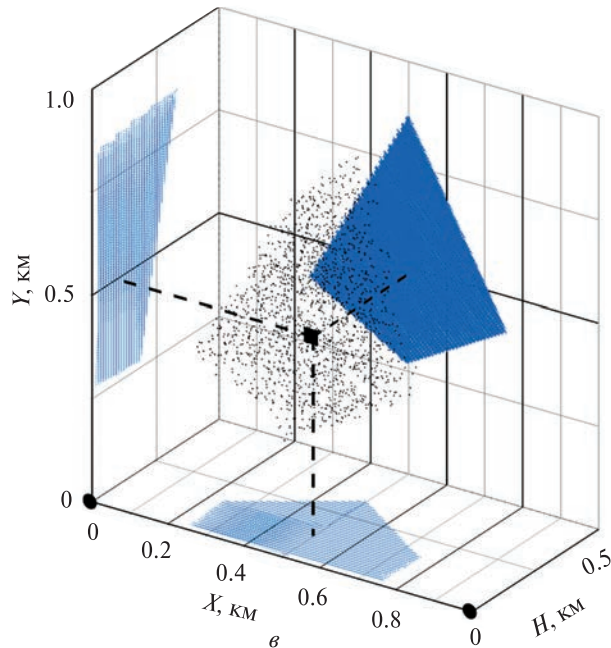
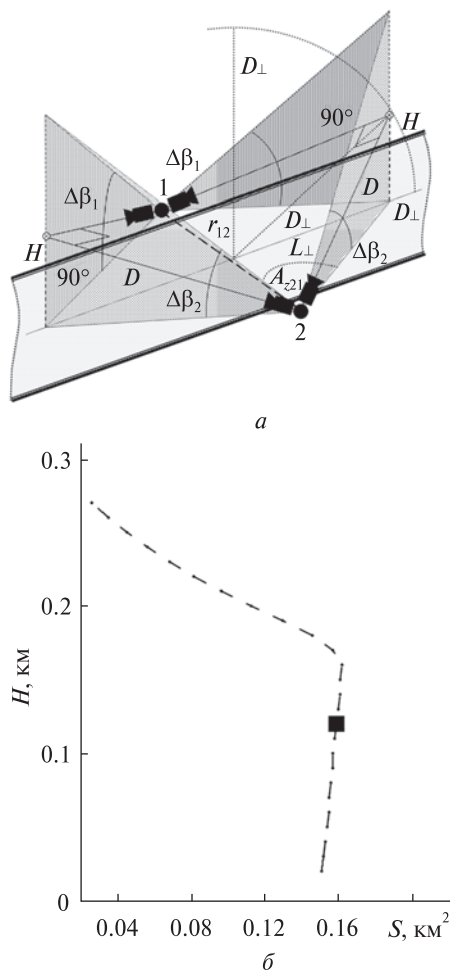


Рис. 6. Приклад створення двох зон моніторингу типу «контроль русла ріки» з двох спостережних пунктів: *a* — геометрична схема розміщення камер, *б* — зміна спільної площі моніторингу з висотою, *в* — вимірна схема спільної зони моніторингу

перетину оптичних осей на площину рис. 6. Разом знання цих параметрів дозволить визначити необхідні для практики величини E_l , A_{z21} , D .

Для подальших розрахунків розглянемо два варіанти такої схеми. Одна, більш загальна, не оптимізована по точності розрахунків, яка дозволяє довільно задавати $L_\perp$. Інша оптимізована по точності і відповідно забезпечує перетин оптичних осей базисних камер під кутом 90° . При цьому в обох випадках слід дотримуватись правила, щоб нижня межа поля зору лежала вздовж поверхні річкової акваторії, тобто $H_{\min} = 0$, і з виразу (3) очевидно, що $E_l = \Delta\beta/2$.

У першому випадку висота точки перетину оптичних осей на відстані D від кожної камери, за умови відповідності нижнього краю кадру горизонтальній площині, буде дорівнювати $H =$

$= D\sin(\Delta\beta/2)$, а верхня межа кадра з (4) визначиться як $H_{\max} = D\cos(\Delta\beta/2)\tan\beta$, де відстань D наразі невідома. Азимут знайдемо з очевидного виразу $\tan A_{z21} = 2L_\perp/r_{12}$. Тоді можна показати, що відстань від пунктів спостереження до точки перетину оптичних осей визначиться як

$$D = \frac{L_\perp}{\sin A_{z21} \cos(\Delta\beta/2)},$$

або

$$D = \frac{r_{12}}{2 \cos A_{z21} \cos(\Delta\beta/2)}.$$

Очевидно, що меншими є поле зору і $L_\perp$, то меншими є вертикальний і горизонтальний розміри зони моніторингу, а відстань між двома зонами можна варіювати величиною $L_\perp$. Якщо ми прагнемо забезпечити максимальну точність ви-

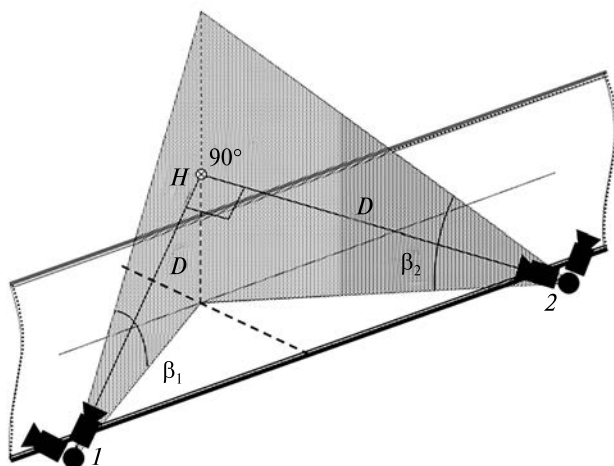


Рис. 7. Схема розміщення камер для контура типу «контроль морської акваторії з берегової лінії»

мірювань координат та швидкості об'єкта, слід вибрати позиційний кут $\eta_p = 90^\circ$, і тоді очевидно має бути $D_\perp = \text{const}$, а саме $D_\perp = r_{12}/2$. Відстань від камер до перетину оптичних осей тоді буде $D = r_{12}/\sqrt{2}$ незалежно від зміщення оптичних осей вбік від базисної лінії. Це накладає додаткове рівняння зв'язку на базові величини H та $L_\perp$:

$$H_2 + L_\perp^2 = (r_{12}/2)^2, \quad (21)$$

а отже, і на A_{z21} та E_l , як випливає з (21):

$$\text{tg}^2 A_{z21} + 2 \sin^2(E_l) = 1,$$

або для даного конкретного випадку контролю підстильної поверхні

$$\text{tg}^2 A_z + 2 \sin^2(\Delta\beta/2) = 1. \quad (22)$$

Даний метод виглядає досить привабливим, оскільки дозволяє отримати одразу дві зони моніторингу при необхідних мінімальних двох спостережних пунктах лише за рахунок збільшення кількості камер.

4.3. Приклад 3: моніторинг морської акваторії.

У ряді випадків скористатися другим прикладом неможливо. Наприклад, при неможливості встановити спостережну камеру на одному з берегів ріки, або при моніторингу морської акваторії, коли камери можна встановити лише вздовж берегової лінії. Тоді можна використати аналогічний підхід, але відслідковувати лише одну зону (рис. 7). З іншого боку, якщо ми будемо використовувати по дві спостережні камери

у кожному пункті, кількість моніторингових зон можна збільшити за рахунок однієї додаткової спостережної точки. У загальному випадку при створенні берегової спостережної мережі з N спостережних точок отримаємо $N-1$ зону моніторингу.

Дана схема частково поступається попередній, оскільки вимагає додаткового спостережного пункту, хоча загалом при великій кількості камер у спостережній мережі це несуттєво змінює схему. Вигляд спільної зони моніторингу в даному випадку є повністю аналогічним прикладу 2, з тією лише різницею, що симетрію зони контролю буде повернуто на 90° — у прикладі з рікою лінію базису було направлено поперек ріки — перпендикулярно до русла, а в даному випадку — паралельно береговій лінії.

5. ВИСНОВКИ

Досвід багаторічних базисних відеоспостережень метеорів, розробки методів опрацювання спостережних даних та відповідного програмного забезпечення дозволяє оцінювати ефективність використання різних відеокамер для ряду інших задач моніторингу атмосфери та ближнього повітряного простору. Розглянута в даній роботі проблема має на меті розв'язок двох базових задач. Перша — пряма задача — визначення меж зони моніторингу повітряного простору при заданих характеристиках камер та критичних розмірів об'єктів спостереження для їхнього детектування, а оптимально — і для їхньої ідентифікації. Дана задача передбачає також оцінку точності розрахунків кінематичних характеристик об'єкта, включаючи прогноз його подальшого руху. Друга — обернена задача — передбачає підбір типів відеокамер, їхнього позиціонування на місцевості та орієнтації оптичних осей з метою контролю заданої зони повітряного простору при заданих типах та швидкостях руху динамічних об'єктів. Дана задача мала б також передбачати мінімізацію фінансових витрат для такого моніторингу.

Серед розглянутих типів камер Watec та об'єктивів, які використовувалися для спостережень метеорів, можна умовно виділити два типи об'єктивів. Перший тип — ширококутні

сучасні об'єктиви, такі як Ricoh з полями зору $40^\circ \dots 60^\circ$ для детектування крупногабаритних об'єктів, наприклад гелікоптерів на відстанях у кілометри. Інший тип — це порівняно довгофокусні об'єктиви радянського виробництва «Юпітер-3», «Геліос-40» та деякі інші для розпізнавання невеликих, але близьких об'єктів (ракети, БПЛА), які у сукупності з даними відеокамерами мають досить мале поле зору, але при цьому забезпечують більші базисні відстані. Аналогові камери та фотографічні об'єктиви морально застаріли і не забезпечують необхідних характеристик спостережної системи. Альтернативою буде використання сучасних, досить недорогих мережевих відеокамер формату Full HD, оснащених телеоб'єктивом зі змінним фокусом, і дозволяють змінювати поле зору від $2^\circ \dots 3^\circ$ до 60° . Ідеальним варіантом виглядає комбінація двох камер у кожному спостережному пункті у наступній схемі. Одна із камер нерухома, має максимальне поле зору і служить для детектування та тріангуляційної обробки об'єкта, тобто визначення його кінематичних параметрів — координат та швидкості. Інша камера має можливість швидко переміщуватись у межах поля зору ширококутної камери за допомогою крокових двигунів в режимі реального часу, передбачаючи при цьому необхідну зміну фокуса, тобто масштабування зображення, для ідентифікації об'єкта. Необхідно відмітити, що мережеві камери мають затримку даних мінімум в один кадр, тому для критичних систем реального часу необхідні

камери з інтерфейсом MIPI CSI-2 спряжені з достатньо потужним контролером обробки зображень.

Щодо кількості камер, їхнього розміщення, орієнтації оптичних осей є досить багато варіантів, і вони мають реалізовуватися в залежності від поставленої задачі. Серед розглянутих найбільш типових трьох випадків оптимальним виглядає другий приклад, де використовуються незалежні пари спостережних пунктів, кожен з яких забезпечується парою незалежних камер, які в кінцевому варіанті забезпечують дві спостережні зони моніторингу, і при цьому будуть забезпечувати оптимальну точність розрахунку координат та швидкості об'єкта.

Усі приведені формули та розрахунки можна реалізувати у вигляді цифрового калькулятора, який дозволить ефективно розв'язувати задачу створення зон локального моніторингу атмосфери та повітряного простору. Усі алгоритми можуть бути застосовані також для відеокамер ближнього інфрачервоного діапазону та тепловізорів.

Робота виконана в рамках фінансування Міністерства освіти і науки України у відповідності до додаткової угоди № БФ/3-2024 до Договору № БФ/30-2021 від 4 серпня 2021 року на виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Математичні науки та природничі науки» у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка» від 1 квітня 2024 р.

REFERENCES

1. Betzler A. S., Sekiguchi T. (2024). A statistical analysis of over three thousand meteors and their spectra. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **529** (4), 3408–3423.
2. Borovička J., Spurný P., Šrbený L., et al. (2020). Data on 824 fireballs observed by the digital cameras of the European Fireball Network in 2017–2018. *Astron. and Astrophys.*, **667**, A157. *omy*
3. Cook W. J., Moser D. E. (2012). The status of the NASA All Sky Fireball Network. *Proc. Int. Meteor Conf.* (Sibiu, Romania, 15–18 September 2011). Eds. M. Gyssens, P. Roggemans. Int. Meteor Organization, 9–12.
4. Golubaev A. V., Gorbanev Yu. M., Shulga O. V., et al. (2022). Creation of the Ukrainian meteor observation network: instruments, methods for processing, observatin possibilities. *Space Science and Technology*, **28** (4), 39–70.
5. Gorbanev Yu. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V., Knyaz'kova E. F., Kimakovskii S. R., Kimakovskaya I. I., Podlesnyak S. V., Sarest L. A., Stogneeva I. A., Shestopalov V. A. (2006). Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors. *Solar System Res.*, **40** (5), 412–426.
6. Gorbanev Yu. M., Golubaev A. V., Zhukov V. V., et al. (2008). Techniques for positional measurements of telescopic meteor TV images. *Solar System Res.*, **42** (1), 35–50.
7. Hajdukova M., Rudawska R., Jopek T. J., Koseki M. (2023). Modification of the shower database of the IAU Meteor Data Center. *Astron. and Astrophys.*, **671**, A155.
8. Jenniskens P., Gural P. S., Dynneson L., Grigsby B. J., Newman K. E., Borden M., Koop M., Holman D. (2011). CAMS: Cameras for Allsky Meteor Surveillance to establish minor meteor showers. *Icarus*, **216** (1), 40–61.
9. Kozak P. M., Lapchuk V. P., Kozak L. V., Ivchenko V. M. (2018). Optimization of video camera disposition for the maximum calculation precision of coordinates of natural and artificial atmospheric objects in stereo observations. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **34** (6), 314–327.
10. Kozak P. M., Watanabe J. (2017). Upward-moving low-light meteor. I. Observation results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **467** (1), 793–801.
11. Kozak P. M., Watanabe J. (2020). Meteors with extreme beginning heights from observations with high-sensitivity super-isocon TV systems. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **497** (4), 5550–5559.
12. Kulichenko M. O., Shulga O. V. (2017). Double station observation of meteors with low baseline in Mykolaiv. *Odessa Astron. Publ*, **30**, 230–231.
13. Roberts I. D., Hawkes R. L., Weryk R. J., et al. (2014). Meteoroid structure and ablation implications from multiple maxima meteor light curves. *The Meteoroids 2013. Proc. Astron. Conf. at A. M. University* (Poznan, Poland, Aug. 26–30). Eds T. J. Jopek, F. J. M. Rietmeijer, J. Watanabe, I. P. Williams. A. M. University Press, 155–162.
14. SonotaCo (2009). A meteor shower catalog based on video observations in 2007–2008. *WGN. J. IMO*, **37** (2), 55–62.
15. Spurný P., Betlem H., Jobse K., et al. (2000). New type of radiation of bright Leonid meteors above 130 km. *Meteoritics and Planetary Sci.*, **35**, 1109–1115.
16. Spurný P., Betlem H., Leven J. V., Jenniskens P. (2000). Atmospheric behavior and extreme beginning heights of the thirteen brightest photographic Leonid meteors from the ground based expedition to China. *Meteoritics and Planetary Sci.*, **35**, 243–249.
17. Vida D., Brown P., Campbell-Brown M., Huggins S. (2017). Canadian Automated Meteor Observatory: Cometary meteoroid strengths derived from a highly fragmenting event observed on July 21, 2017. *Int. Meteor Conf.* (Petnica, Serbia, 21–24 September 2017). Eds M. Gyssens, J.-L. Rault. *Int. Meteor Organization*, 18–24.
18. Vida D., Segon D., Gural P., Brown P., McIntyre M., Dijkema T., Pavletic L., Kukic P., Mazur M., Eschman P., Roggemans P., Merlak A., Zubovik D. (2021). The Global Meteor Network — Methodology and First Results. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **506** (4), 5046–5074.
19. Vojaček V., Borovička J., Koten P., et al. (2015). Catalogue of representative meteor spectra. *Astron. and Astrophys.*, **580**, A67.
20. Watanabe J.-I., Tabe I., Hasegawa H., et al. (2003). Meteoroid clusters in Leonids: evidence of fragmentation in space. *Publ. Astron. Soc. Jap.*, **55**, L23–L26.

Стаття надійшла до редакції 30.10.2024

Після доопрацювання 06.11.2024

Прийнято до друку 06.11.2024

Received 30.10.2024

Revised 06.11.2024

Received 06.11.2024

P. M. Kozak^{1,2}, Senior Researcher, Post-doc, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: kpm@knu.ua

*I. V. Luk'yanyk*¹, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: iluk@knu.ua

L. V. Kozak^{2,3}, Associate Professor, Dr. Sci. in Phys&Math

E-mail: kozakliudmyla@knu.ua

*V. M. Ivchenko*², Head of Department, Dr. Sci. in Phys&Math

E-mail: vasy_l_ivchenko@knu.ua

*V. P. Lapchuk*², Head of Laboratory

E-mail: v.p.lapchuk@gmail.com

*S. V. Stariy*⁴, Senior Researcher, Ph.D. in Phys. & Math.

E-mail: astro59@ukr.net

*O. B. Stelya*⁵, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

E-mail: oleg.stelya@gmail.com

¹Astronomical Observatory of Taras Shevchenko National University of Kyiv

3, Observatorna Str., Kyiv, 04053 Ukraine

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Physics

4, Glushkova Ave., Kyiv, 03680 Ukraine

³Space Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine

40, Glushkov Ave., build. 4/1, Kyiv 187, 03680 Ukraine

⁴Taras Shevchenko National University of Kyiv, Faculty of Computer Sciences and Cybernetics

4d, Glushkova Ave., Kyiv, 02000 Ukraine

⁵V. Ye. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine

41, pr. Nauki, Kyiv, 03028 Ukraine

OPTIMIZATION OF THE DISPOSITION SCHEME AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF VIDEO CAMERAS FOR SOLVING SPECIAL TASKS OF LOCAL MONITORING OF THE ATMOSPHERE AND NEAR AIRSPACE BASED ON THE EXPERIENCE OF METEOR OBSERVATIONS

The problem of the construction of local zones for monitoring the atmosphere and near airspace to search natural and artificial dynamic objects, calculate their coordinates and velocities, predict positions and possible identification is considered in this work. For necessary calculations, many years of experience in double-station TV and video meteor observations at altitudes of 80...130 km is used, as well as original methods for processing video streams with meteor images and corresponding developed software. Two components of the problem, conditionally called direct and inverse tasks, are described. The direct task envisages calculating the size of the common monitoring zone and minimal sizes of the dynamical objects for a couple of video cameras with preliminary selected technical characteristics like the light detector and lens installed in fixed positions and optical axes orientation. The direct task should involve estimating the computational precision for both coordinates and velocities of the objects. On the contrary, the inverse task envisages the recommendations for selecting video camera types, their dispositions, and the orientation of optical axes for hand-picked monitoring zones and searched object types, depending on the aim – only object detection or its possible identification. The given task should ensure optimization of the precision of calculating the coordinates and velocity of an object and predicting its position. To address these issues, we derive the necessary formulae to ensure the required spatial resolution and to calculate the three-dimensional common monitoring zone. Additionally, we examine its changes with altitude. The computations are made for estimating the spatial resolution of video cameras and photographic lenses used for meteor observations. Appropriate conclusions are drawn for the detection and identification of dynamic objects in near airspace. The recommended method for monitoring fast, small-size objects is the use of modern Full HD digital network cameras equipped with changeable focus lenses. As an example of the creation of a double-station camera couple or small local monitoring networks, three variants of cameras' dispositions are considered with an evaluation of the efficiency of each.

Keywords: double-station video observations, video cameras, atmosphere and airspace zone for local monitoring, optimization of video observation, triangulation, meteors.