

**Олексій Терещук¹, Сергій Крячок², Вадим Беленок³,
Людмила Мамонтова⁴, Олена Бойко⁵**

¹кандидат технічних наук, доцент, директор навчально-наукового інституту архітектури, дизайну та геодезії
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: olexter1957@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії, картографії та землеустрою
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: geodesist2015@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>

³кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)
E-mail: belenok.vadim@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5357-7493>

⁴старший викладач кафедри геодезії, картографії та землеустрою
Національний університет «Чернігівська політехніка» (Чернігів, Україна)
E-mail: liudmila_mamontova@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4144-5261>

⁵старший викладач кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою
Національний авіаційний університет (Київ, Україна)
E-mail: boyko_lena@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8654-9392>

ПРИСТРІЙ ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ВЕРТИКАЛІ НА БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТАХ, ПРИЗНАЧЕНИХ ДЛЯ АЕРОЗНІМАННЯ

На рівні корисної моделі розроблено функціональну схему пристрою для визначення положення вертикалі підвищеної точності для застосування на літальних апаратах, зокрема на БПЛА, та принцип роботи пристрою. Наведено формули для розрахунку габаритів герметичної ампули оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту залежно від чутливості стосовно положення рідинного горизонту та розмірів ампули. Розрахунки показують, що розроблений пристрій може мати чутливість положення рідинного горизонту (вертикалі) від кількох одиниць кутових секунд. Реалізація розробленого пристрою дозволить підвищити точність визначення тангажу та крену й у підсумку підвищити точність координатної інформації, отриманої методом аерознімання.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат; аерознімання; давач вертикалі (горизонту); тангаж; крен.
Рис.: 8. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Нині застосування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) завойовує дедалі більше сфер людської діяльності. Відоме використання БПЛА у військовій справі – для ведення розвідки та виявлення наземних цілей супротивника, нанесення точкових контрольованих авіоударів по вогневих засобах, ведення радіоелектронної боротьби [1]. В археології БПЛА використовуються для картографування територій археологічних пам'яток та встановлення їхніх меж, для пошуку слабовиражених у рельєфі місцевості архітектурних об'єктів старовини [2; 3]. Відоме застосування БПЛА для визначення об'ємів накопичення відходів на полігоні твердих побутових відходів за результатами аерознімання [4]. У лісовому господарстві БПЛА застосовуються для визначення характеристик деревостою, пошуку місць займання [5; 6]. Просторові данні, отримані за допомогою аерознімання з БПЛА, використовуються для віртуального моделювання складних наземних об'єктів та міських ландшафтів [7]. Вивчення рельєфу водної поверхні наразі є ефективним з використанням аерознімання з низьких висот із використанням БПЛА [8]. У землеустрої відоме застосування БПЛА для координування меж об'єктів нерухомості та аерознімання угідь – для створення топографічної основи кадастрових планів і визначення площ угідь та виконання оціночних робіт [9]. Виконання великомасштабного аерознімання невеликих за площею територій в масштабах 1:2000, 1:1000, 1:500 наразі виконується за допомогою БПЛА [10]. Крім того, аерознімання з БПЛА на малих висотах дозволяє виявляти дефекти аеродромних покриттів [11].

Якщо підсумувати наведене, то крім огляду місцевості з висоти пташиного польоту, основним завданням застосування БПЛА є отримання координатної інформації про об'єкти місцевості.

Постановка проблеми. Для отримання тривимірної моделі місцевості та картографічної основи у вигляді ортофотопланів необхідно визначати так звані елементи зовнішнього орієнтування кожного аерознімка, а саме: просторові координати центра проекції та три кутові елементи – крен, тангаж та курс. Нині для визначення просторових координат центра проекції аерознімка (вузлової точки об'єктива цифрової знімальної камери) у момент знімання використовуються GPS-приймачі, які розташовані на борту БПЛА. Для визначення крену, тангажу та курсу використовуються бортові інерційні системи. Застосовують також гіростабілізовані платформи, які дозволяють утримувати площину ПЗЗ-матриці цифрової камери у положенні, близькому до горизонтального. У будь-якому з цих випадків для визначення чи контролю тангажу та крену використовуються пристрої, які можуть мати давачі істинної вертикалі (горизонту). Отже, підвищення точності результатів аерознімання через підвищення точності визначення тангажу та крену БПЛА, у цих випадках безпосередньо залежить від точності відтворення істинної вертикалі (горизонту).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомий пристрій для побудови вертикалі на основі фізичного або математичного маятника. Пристрій містить: маятник; акселерометр; блок додаткової інформації про параметри кутового переміщення корпусу, зв'язаного з основою маятника, в саме: кут відхилення, кутова швидкість та кутове прискорення корпусу (основи) маятника відносно осі підвісу маятника; блок зворотного зв'язку по вихідному сигналу. Позитивний результат полягає у підвищенні стійкості до збурюючих горизонтальних прискорень за рахунок корегуючи зусиль на рух маятника від акселерометра, давачів кутового руху основи маятника та зворотних зв'язків [12]. Недоліком пристрою є низька точність фіксації вертикалі, яка становить $\delta = 0,99 - 0,35$ кутових градусів [12].

Відомий пристрій для визначення кутової орієнтації рухомого об'єкту (носія) відносно місцевої вертикалі у вигляді безплатформової інерційної вертикалі [13]. Пристрій містить: триканальний блок давачів кутових відхилень; триканальний блок лінійних аксельрометрів; блок обчислення вертикалі; дискретний блок Вінера; блок обчислення кутових швидкостей; блок перемикавання режимів руху носія; блок обчислення третьої проекції лінійного прискорення. Особливістю роботи пристрою є те, що в залежності від режиму роботи рухомого об'єкту: прямолінійний рівномірний рух, розгін, гальмування, поворот по куту тангажу чи поворот по куту курсу, – використовується для визначення положення вертикалі один, два чи три канали блока лінійних аксельрометрів та визначаються відповідно: три проекції сили ваги Землі g_x , g_y , g_z ; дві проекції g_y , g_z ; одну проекцію g_x ; дві проекції g_x , g_z . Визначення складових проекцій сили при цьому виконують за формулами

$$g_x = \sqrt{g^2 - g_y^2 - g_z^2}, \quad (1)$$

$$g_y = \sqrt{g^2 - g_x^2 - g_z^2}. \quad (2)$$

Недоліком наведеного пристрою є те, що обчислення вектору прискорення сили ваги g за допомогою дискретного фільтру Вінера за її проекціями g_x , g_y , g_z виконується лише на траєкторії прямолінійного рівномірного руху носія, а на траєкторії з іншим режимом руху необхідні значення проекцій для побудови вертикалі обчислюються за формулами (1) чи (2), які містять значення вектора g , обчисленого раніше і обов'язково на прямолінійній траєкторії. Однак відомо, що значення модулю та напрямку вектора g прискорення сили ваги залежить від географічних координат та висоти носія відносно поверхні Землі [14]. Це призведе до похибок у визначенні значень тангажу θ і крену γ , які обчислюються за формулами (3) та (4) [15] у точках траєкторії, де носій рухається нерівномірно та непрямолінійно

$$\theta = \operatorname{frctg} \left(\frac{g_x}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}} \right), \quad (3)$$

$$\gamma = -\operatorname{arctg} \left(\frac{g_z}{g_y} \right). \quad (4)$$

Найбільш близьким аналогом розробленого пристрою, взятого за прототип, є пристрій для визначення вертикалі на рухомому об'єкті, який містить: оптико-електронний блок вимірювання положення рідинного горизонту з герметичною ампулою, частково заповнену рідиною у вигляді рівня, багатоеlementний оптико-електронний давач та підсвітку; гіроскопічний блок, який разом з оптико-електронним блоком вимірювання положення рідинного горизонту закріплені на єдиній платформі; двокоординатний давач вимірювання положення осі гіроскопа; електронний блок курування; блок обробки інформації [16].

Застосування відомого пристрою для визначення вертикалі на рухомому об'єкті, взятого за прототип, має той недолік, що для відтворення істинної вертикалі використовується круглий рівень, який забезпечує точність побудови вертикалі лише до однієї – двох кутових мінут [16].

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Аналіз відомих пристроїв свідчить про низьку точність та надійність відтворення вертикалі на рухомих об'єктах, що обумовлює і низьку точність визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування аерознімка – тангажу та крену, що у свою чергу знижує точність визначення координат об'єктів, зображених на кінцевих продуктах аерознімання - тривимірних моделях місцевості.

Мета статті. Головною метою цієї статті є розробка функціональної моделі пристрою для визначення положення вертикалі підвищеної точності для застосування на літальних апаратах, призначених для аерознімання, зокрема на БПЛА.

Виклад основного матеріалу. Нами запропоновано технічне рішення пристрою для визначення положення вертикалі на рухомому об'єкті на рівні корисної моделі [17]. Істинна вертикаль (горизонт) відтворюється в оптико-електронному блоці вимірювання положення рідинного горизонту, поперечний розріз якого наведено на рис. 1. Якщо дно ампули 1, а разом з ним і площина платформи 3, яка встановлена на рухомий об'єкт, займуть паралельне положення відносно поверхні непрозорої рідини 5, то внаслідок підсвітки багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 7 та 7', які розташовані вище непрозорої рідини, буде зафіксовано положення вертикалі у напрямку 7 – 7'.

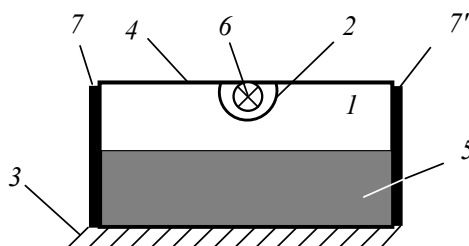


Рис. 1. Поперечний розріз оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту:

- 1 – оптико-електронний блок вимірювання положення рідинного горизонту;
 2 – прозорий захисний герметичний ковпак; 3 – платформа; 4 – герметична ампула;
 5 – непрозора рідина; 6 – підсвітка; 7, 7' – перша пара багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу, наприклад ПЗЗ-лінійки

Герметична ампула 4 має форму циліндра (рис. 2), на зовнішніх твірних якого в діаметрально-протилежних напрямках розташовані попарно багатоеlementні оптико-електронні давачі лінійного типу 7 і 7' та 8 і 8'. Стінки циліндра в місцях розташування вказаних давачів повинні бути прозорими – для потрапляння на них світла від підсвітки 6.

Функціонування пристрою для визначення положення вертикалі на рухомому об'єкті полягає в наступному (рис. 3). Єдину основу 3, на якій закріплені оптико-електронний блок вимірювання положення рідинного горизонту 1, встановлюють жорстко на рухливий об'єкт та орієнтують відносно головних осей рухомого об'єкта. Причому першу пару багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 7 та 7' встановлюють, наприклад, вздовж поздовжньої осі, а другу пару багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 8 та 8' - вздовж поперечної осі рухомого об'єкта.

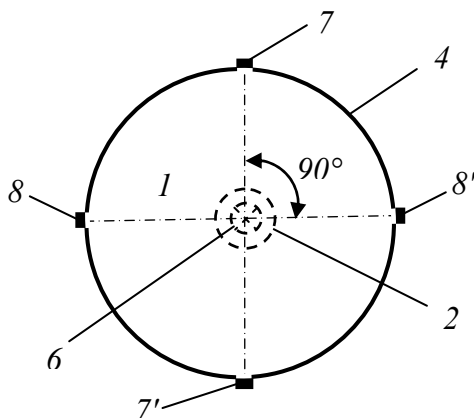


Рис. 2. Розріз оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту по діаметру:

8, 8' – друга пара багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу, наприклад, ПЗЗ-лінійки

На відрізках траєкторії, що відповідають рівномірному переміщенню рухомого об'єкта, положення рідинного горизонту відносно дна герметичної ампули 4 (рис. 3) визначається в оптико-електронному блоці вимірювання положення рідинного горизонту 1. Унаслідок освітлення підсвіткою 6 частин першої пари багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 7 та 7', які знаходяться над непрозорою рідиною 5, сигнали від них надходять, відповідно, до двоканального аналогово-цифрового перетворювача 11 та інвертора фази сигналу 9. Інвертор 9 змінює фазу сигналу від давача 7' на 180°, після чого цей сигнал надходить до двоканального аналогово-цифрового перетворювача 11. Далі, сигнали у цифровому вигляді, кожний по своєму каналу, надходять до блоку керування 13, а звідти – до блока обробки інформації 14.

У блоці обробки інформації 14 виконується опрацювання цифрових значень сигналів окремо від першої та другої пари багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу та визначаються положення поверхні непрозорої рідини 5 відносно дна ампули у двох взаємно перпендикулярних напрямках 7 - 7' та 8 - 8' у вигляді сигналу X та Y відповідно.

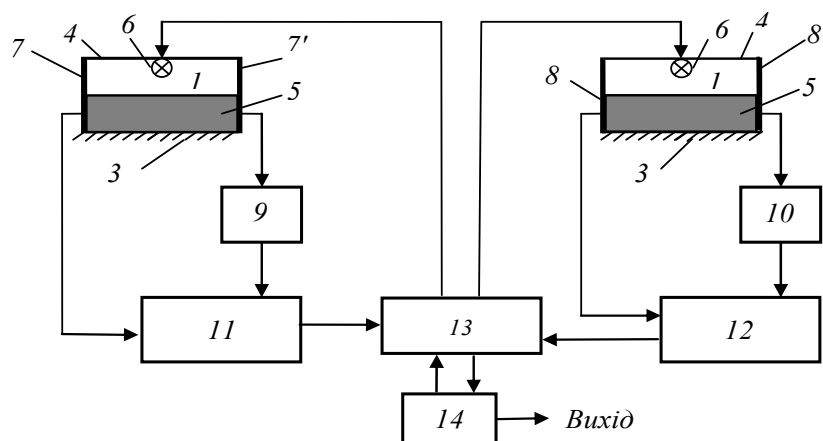


Рис. 3. Блок-схема запропонованого пристрою:

9 – інвертор фази сигналу першої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу; 10 – інвертор фази сигналу другої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу; 11, 12 – двоканальні аналогово-цифрові перетворювачі першої пари та другої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу; 13 – електронний блок курування; 14 – блок обробки інформації

Таким чином, під час польоту мають місце дискретні часові зони, в яких контролюється положення рухомого об'єкта за допомогою оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту 1. Ці дискретні зони відповідають рівномірним ділянкам руху носія, до яких відносяться маршрути (галси) аерознімання території, оскільки переміщення вздовж галсу, як правило, відбувається за прямолінійним напрямком. Тож, на таких ділянках обчислюють середнє положення непрозорої рідини 5 відносно дна герметичної ампули 4 шляхом фіксації щонайменше трьох послідовних крайніх положень поверхні рідини у кожній парі багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу.

У такий спосіб у блоці обробки інформації 14 (див. рис. 3) на виході формується сигнал $A = f(X, Y)$ про положення рідинного горизонту (вертикалі), прив'язаний до часової шкали, та будується графік значень тангажу і крену, який використовують для визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування в моменти фотографування місцевості цифровою камерою, чи для керування положенням носія у просторі. Вплив невеликих величин прискорень на положення поверхні непрозорої рідини 5 виключають (або значно послаблюють) обчисленням середнього її положення.

Особливості застосування оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту 1 для визначення значень тангажу та крену рухомого об'єкта полягають у наступному. У лабораторних умовах виконують тарування - визначають значення місць нулів (MO) багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7' та 8, 8' : $MO_7, MO_{7'}, -MO_8, MO_{8'}$ (рис.4). Місце нуля – число n комірок багатоелементного оптико-електронного давача, на які потрапило світло джерела 6, коли дно герметичної ампули 4 оптико-електронного блока 1 знаходиться в горизонтальному положенні. Для цього єдину основу 3 встановлюють на горизонтальну основу, вмикають блок керування 13, за командою з якого вмикається підсвітка 6 (рис. 3), світло від якої потрапляє на комірки верхніх частин першої та другої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7' та 8, 8', які не затінені непрозорою рідиною 5.

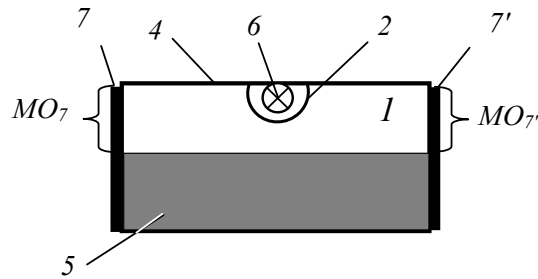


Рис. 4. Поперечний розріз оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту, розташованого в горизонтальному положенні:

MO_7 та $MO_{7'}$ – місця нулів багатоеlementного оптико-електронного давача лінійного типу 7 та 7'

Електричні сигнали від кожної пари потрапляють у інвертори фази сигналу багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 9 та 10 і двоканальні аналогово-цифрові перетворювачі 11 та 12, а потім через блок керування 13 до блока обробки інформації 14, у якому знаки сигналів у числовому вигляді міняються на протилежні та зберігаються в комірках пам'яті як: $-MO_7$, $MO_{7'}$, $-MO_8$ та $MO_{8'}$.

Єдину основу 3 встановлюють на рухомий об'єкт, орієнтуючи відносно головних осей рухливого об'єкта.

Нахил дна герметичної ампули 4 оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту 1 на кут α відносно горизонту за напрямком 7 - 7' (рис. 5) веде до освітлення n_7 комірок та $n_{7'}$ комірок верхніх частин першої пари багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7', які не затінені непрозорою рідиною 5. З фіг. 4 зрозуміло, що

$$n_7 = MO_7 + n_\alpha, \quad (1)$$

де n_α – кількість комірок, на які освітлені додатково відносно MO_7 за рахунок нахилу корпусу герметичної ампули 4 на кут α на багатоеlementному оптико-електронному давачі лінійного типу 7,

$$n_{7'} = MO_{7'} - n_\alpha, \quad (2)$$

де $-n_\alpha$ – число комірок, на які неосвітлені відносно MO_7 за рахунок нахилу корпусу герметичної ампули 4 на кут $-\alpha$ на багатоеlementному оптико-електронному давачі лінійного типу 7'.

Після проходження інвертора фази сигналу 9 (див. рис. 3) електричний сигнал, пропорційний числу освітлених комірок на багатоеlementному оптико-електронному давачі лінійного типу 7', поміняє фазу сигналу на протилежну, тобто

$$-n_{7'} = n_\alpha - MO_{7'}, \quad (3)$$

Після перетворення цього електричного сигналу та електричного сигналу від багатоеlementного оптико-електронного давача лінійного типу 7 у цифровий вигляд за допомогою двоканального аналогово-цифрового перетворювача першої пари багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 11, ці цифрові сигнали надходять через блок керування 13 до блока обробки інформації 14, в якому визначається сума цих сигналів та значень $-MO_7$, $MO_{7'}$ - видобутих з його пам'яті, та отримують результуючий сигнал X

$$X = n_7 + (-n_{7'}) - MO_7 + MO_{7'} = 2n_\alpha + MO_7 - MO_{7'} - MO_7 + MO_{7'} = 2n_\alpha. \quad (4)$$

Аналогічним чином отримують результуючий сигнал Y від другої пари багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 8 та 8'

$$Y = n_8 + (-n_{8'}) - MO_8 + MO_{8'} = 2n_\alpha + MO_8 - MO_{8'} - MO_8 + MO_{8'} = 2n_\alpha. \quad (5)$$

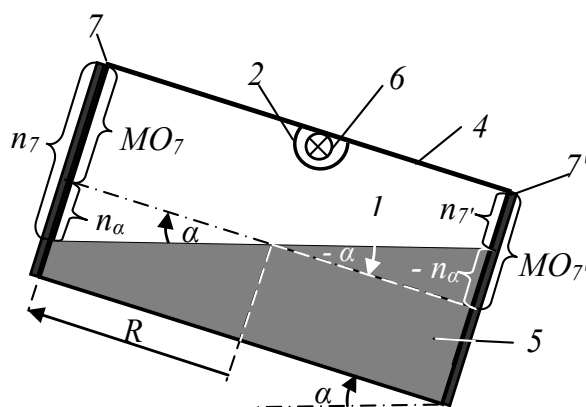


Рис. 5. Нахил дна ампули оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту на кут α відносно горизонту:

α – кут нахилу до верху корпусу 4 оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту за напрямком 7' - 7 відносно рідинного горизонту; $n_7, n_{7'}$ – число комірок оптико-електронних давачів лінійного типу 7 та 7', на які потрапило світло джерела 6; $n_\alpha, -n_\alpha$ – число комірок оптико-електронних давачів лінійного типу 7 та 7', які відповідають нахилу герметичної ампули 4 на кут α ; R – радіус герметичної ампули 4

Нахил дна герметичної ампули 4 оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту 1 на кут $-\alpha$ відносно горизонту за напрямком 7 - 7' (рис. 6) веде до освітлення n_7 комірок та $n_{7'}$ комірок верхніх частин першої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7', які не затінені непрозорою рідиною 5. З рис. 6 зрозуміло, що

$$n_7 = MO_7 - n_\alpha, \quad (6)$$

та

$$n_{7'} = MO_{7'} + n_\alpha. \quad (7)$$

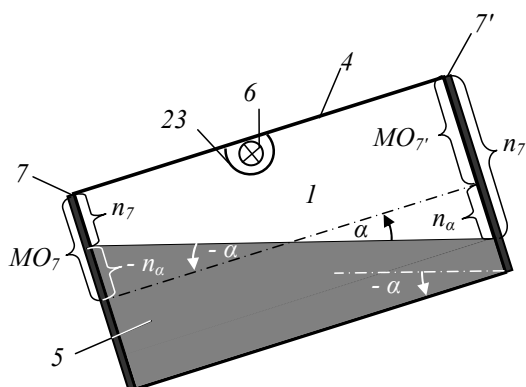


Рис. 6. Нахил дна ампули оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту на кут $-\alpha$ відносно горизонту за напрямком 7 - 7'

Після зміни фази сигналу на протилежну інвертором фази сигналу 9 (див. рис. 3), перетворення цього електричного сигналу та електричного сигналу від багатоелементного оптико-електронного давача лінійного типу 7 у цифровий вигляд за допомогою двоканального аналогово-цифрового перетворювача першої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 11, ці цифрові сигнали надходять через

блок керування 13 до блоку обробки інформації 14, в якому визначається сума цих сигналів та значень $-MO_7$, $MO_{7'}$, видобутих з його пам'яті, та отримують результуючий сигнал X у вигляді

$$X = n_7 + (-n_{7'}) - MO_7 + MO_{7'} = -2n_\alpha + MO_7 - MO_{7'} - MO_7 + MO_{7'} = -2n_\alpha, \quad (8)$$

Аналогічним чином отримують результуючий сигнал Y від другої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 8 та 8' у вигляді

$$Y = n_8 + (-n_{8'}) - MO_8 + MO_{8'} = -2n_\alpha + MO_8 - MO_{8'} - MO_8 + MO_{8'} = -2n_\alpha. \quad (9)$$

Як видно з формул (4), (5) та (8), (9), оптико-електронний блок вимірювання положення рідинного горизонту 1 відслідковує величину та напрямок тангажу (сигнал X) і крену (сигнал Y) єдиній основі – 3 відносно рідинного горизонту (вертикалі), причому, сигнали X_7 та Y_8 фіксують подвійне значення засвічених комірок n_α , які відповідають куту нахилу α .

З рис. 5 можна визначити співвідношення між величиною кута нахилу α герметичної ампули 4 відносно горизонту, її розміром, наприклад її радіусом R та величиною сигналу

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{kn_\alpha}{R}, \quad (10)$$

де k – фізичний розмір комірки багатоелементного оптико-електронного давача лінійного типу

Оскільки сигнали X фіксує подвійне значення засвічених комірок n_α , які відповідають куту нахилу α , то перехід до лінійних розмірів багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу, наприклад, 7, 7' надає вираз

$$X' = 2kn_\alpha. \quad (11)$$

Щоб визначити значення кута нахилу α у відповідності до формули (10), необхідно

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{2kn_\alpha}{2R} = \frac{X'}{2R} = \frac{X'}{D}, \quad (12)$$

де D – діаметр герметичної ампули, а для малих значень α

$$\alpha'' = \frac{X'}{D} \rho'', \quad (13)$$

де $\rho'' = 206265''$

Якщо вважати, що найменший сигнал, який фіксують багатоелементні оптико-електронного давач лінійного типу, наприклад, 7, 7', відповідає одному фотоприймальному елементу, то для засвіченої половини комірки ($n_\alpha = 0,5$) сигнал дорівнює $X = 2 \cdot 0,5 = 1$, а в лінійному розмірі $X' = 2k \cdot 0,5 = k$ – один фотоприймальний елемент. З урахуванням малого значення α з формули (13) можна визначити роздільну здатність блоку вимірювання положення рідинного горизонту 1 стосовно реєстрації найменшого кута нахилу герметичної ампули 4 разом з єдиною основою 3 за окремим напрямком відносно горизонту (значення тангажу чи крену) за формулою

$$\beta'' = \frac{k}{D} \rho'' \quad (14)$$

де D – діаметр герметичної ампули.

Розмір герметичної ампули 4 для заданого значення роздільної здатності можна визначити згідно з (14) за формулою

$$D = \frac{k}{\beta''} \rho''. \quad (15)$$

Наприклад, для розміру фотоприймального елемента $k = 6,5$ мкм [7] та $\beta = 30''$ діаметр герметичної ампули 4 $D = 44,7$ мм, а для $\beta = 10''$ $D = 34$ мм. Тобто підбором розміру герметичної ампули 4 можна регулювати роздільну здатність оптико-електронного блоку положення рідинного горизонту 1 за відомого розміру фотоприймального елемента стосовно вимірювання кутів тангажу та крену, а відповідно і точність їх визначення.

В дискретних зонах переміщення носія, коли після прискорення носій рухається рівномірно, поверхня непрозорої рідини 5 буде виконувати затухаючі коливання відносно горизонтального положення – положення динамічної рівноваги поверхні рідини, що буде рееструватися у кожній парі багатоеlementних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7' та 8, 8'. Тому в основу обчислень середнього положення поверхні непрозорої рідини 5 відносно дна герметичної ампули 4 покладено програму спостереження точок реверсії для визначення положення рівноваги чутливого елемента гіротеодоліту [18]. Для пришвидшення визначення положення динамічної рівноваги можна використати програму спостережень, як мінімум, за трьома точками реверсії – трьома послідовними крайніми положеннями поверхні непрозорої рідини 5: $n_1 - n'_1$; $n_2 - n'_2$; $n_3 - n'_3$ (рис. 7).

Точки реверсії будуть зафіксовані в блоці обробки інформації 14 цифровими сигналами: перша точка – сигналом $X_1 = 2n_1$, друга точка – сигналом $X_2 = 2n_2$, третя точка – сигналом $X_3 = 2n_3$.

Положення динамічної рівноваги визначається у блоці обробки інформації 14 за умови, що оптико-електронний блок вимірювання положення рідинного горизонту 1 працює в допустимому діапазоні роботи X_D , (точніше в діапазоні, який більше X_D на величину подвійної роздільної здатності блоку вимірювання положення рідинного горизонту 1) та виконується умова

$$|X_3| < X_1 \tag{16}$$

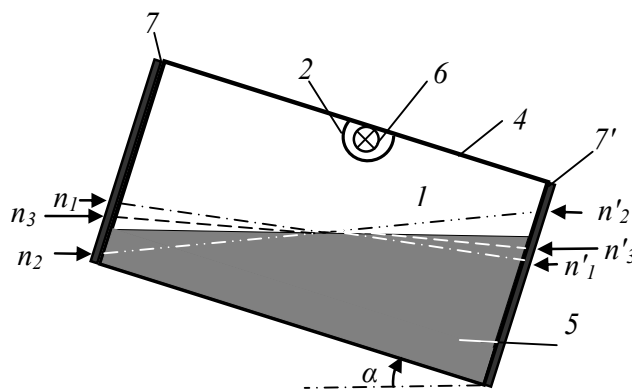


Рис. 7. Розташування точок реверсії поверхні непрозорої рідини - крайніх положень коливних рухів поверхні непрозорої рідини 5: $n_1 - n'_1$; $n_2 - n'_2$; $n_3 - n'_3$; відносно горизонту за напрямком 7 - 7'

Тоді за формулами, отриманими на основі джерела [18] сигнал, який відповідає горизонтальному положенню поверхні непрозорої рідини, дорівнює:

$$X_0 = N_1 + (X_3 - X_1) \frac{\Delta f}{8}, \tag{17}$$

де

$$N_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{X_1 + X_2}{2} + \frac{X_2 + X_3}{2} \right) = \frac{X_1 + 2X_2 + X_3}{4}, \tag{18}$$

$$\Delta f = \frac{X_1 - X_3}{X_3 - X_2}. \quad (19)$$

Для розмаху коливань точок реверсії до 60° , згідно з [18], $\Delta f \leq 0,2''$. Тому у цьому випадку наведені формули спрощуються до вигляду робочої формули

$$X_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{X_1 + X_2}{2} + \frac{X_2 + X_3}{2} \right) = \frac{X_1 + 2X_2 + X_3}{4}. \quad (20)$$

З урахуванням переходу до лінійних розмірів багатоелементних оптико-електронного давачів лінійного типу 7, 7'

$$X'_0 = kX_0. \quad (21)$$

Величина відхилення єдиної основи 3 від горизонту в напрямку поздовжньої осі (значення тангажу) згідно з (13) дорівнює

$$\theta = \operatorname{arctg} \left(\frac{X'_0}{D} \right). \quad (22)$$

Величина відхилення єдиної основи 3 від горизонту в напрямку поперечної осі (значення крену) визначається за формулами (16) – (22) заміною: $X_1 \rightarrow Y_1$, $X_2 \rightarrow Y_2$, $X_3 \rightarrow Y_3$ та обчислених значень: $X_0 \rightarrow Y_0$, $X'_0 \rightarrow Y'_0$, отже

$$\gamma = \operatorname{arctg} \left(\frac{Y'_0}{D} \right). \quad (23)$$

Визначення точок реверсії в напрямку крену і тангажу за сигналами першої та другої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7' та 8, 8' та їх обчислення у блоці обробки інформації 14 виконується паралельно в часі.

Діапазон кутових значень тангажу та крену визначається підбором довжини l багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7' та 8, 8'. Так, якщо

$$l = 2kn_\alpha, \quad (24)$$

то з урахуванням формули (10)

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{l}{D}. \quad (25)$$

звідки

$$l = D \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (26)$$

а чисельність комірок багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7' та 8, 8', які потрібні для фіксації максимального значення кута α , згідно з формулою (24), дорівнює

$$n_{\alpha, \max} = \frac{l}{2k}, \quad (27)$$

а повне число комірок багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу 7, 7' та 8, 8', які потрібні для фіксації значення кутів від $+\alpha$ до $-\alpha$, становить

$$n = \frac{l}{k}. \quad (28)$$

Наприклад, для значень тангажу та крену $\alpha = 10^\circ$ [19], діаметра ампули $D = 44,7$ мм згідно з (26) $l = 7,88$ мм, що для $k = 0,0065$ мм згідно з (28) $n = 1213$ комірок (пікселів), а для $D = 134$ мм, $l = 23,6$ мм, $n = 3631$ комірка (піксель).

Допустимий діапазон роботи оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту l за результатами обробки результуючого сигналу у блоці обробки інформації l_4 визначається за формулою

$$\pm X_{\text{д}} = \pm 2n_{\alpha, \max} = \pm \frac{l}{k} . \quad (29)$$

У випадку, якщо рівень непрозорої рідини 5 зменшиться, наприклад, через зменшення розмірів ампули внаслідок її охолодження, а визначення значень місць нулів (рис. 8) виконані за іншого рівня рідини (за більш високої температури), то це приведе до зміни значень місць нулів $MO_7, MO_{7'}$ на величину ΔMO . Тоді нові значення місць нулів дорівнюватимуть

$$MO'_7 = MO_7 + \Delta MO , \quad (30)$$

$$MO_{7'} = MO_{7'} + \Delta MO \quad (31)$$

Після зміни фази сигналу від багатоелементного оптико-електронного давача лінійного типу $7'$ на протилежну інвертором фази сигналу 9 (рис. 3), перетворення цього електричного сигналу та електричного сигналу від багатоелементного оптико-електронного давача лінійного типу 7 у цифровий вигляд за допомогою двоканального аналогово-цифрового перетворювача першої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу $7, 7'$, ці цифрові сигнали ($MO'_7, - MO_{7'}$) надходять через блок керування l_3 до блока обробки інформації l_4 , в якому визначається сума цих сигналів та значень $- MO_7, MO_{7'}$, видобутих з його пам'яті, та отримують результуючий сигнал з урахуванням (34) та (35) у вигляді

$$MO'_7 - MO_{7'} - MO_7 + MO_{7'} = MO_7 + \Delta MO - MO_{7'} - \Delta MO - MO_7 + MO_{7'} = 0 . \quad (32)$$

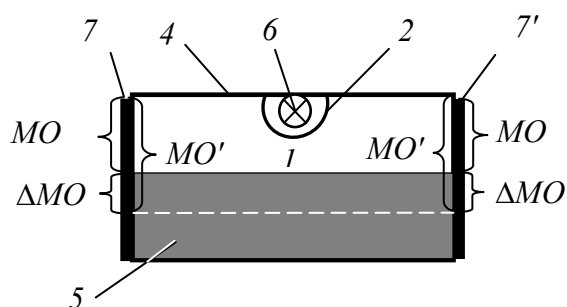


Рис. 8. Вплив зменшення рівня непрозорої рідини на відліки місць нулів: $MO_7, MO_{7'}$ - значення місць нулів – першої пари багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу до зміни рівня непрозорої рідини 5 ; $MO'_7, MO_{7'}$ - значення місць нулів цих же багатоелементних оптико-електронних давачів лінійного типу після зміни рівня непрозорої рідини 5 ; ΔMO – зміна значення місця нуля

Тобто зменшення (збільшення) рівня непрозорої рідини 5 не впливає на результуюче значення сигналу. Отже оптико-електронний блок вимірювання положення рідинного горизонту l не чутливий до зміни рівня непрозорої рідини 5 у герметичній ампулі 4 , наприклад, внаслідок зміни об'єму герметичної ампули через зміну температури навколишнього середовища.

Якщо пристрій для визначення вертикалі на рухомому об'єкті розташовано на дистанційно керованому об'єкті, то для його функціонування необхідно, щоб електронний блок керування 13 був електрично зв'язаний з блоком керування самого рухомого об'єкту, що забезпечить дистанційне керування роботою пристрою, та відправлення отриманої інформації на станцію спостереження, а за необхідності за значеннями тангажу та крену, отриманими в електронному блоці керування 14 виконувати виправлення значень тангажу та крену рухливого об'єкту до мінімальних значень.

Висновки. На рівні корисної моделі розроблено функціональну схему пристрою для визначення положення вертикалі підвищеної точності для застосування на літальних апаратах, призначених для аерознімання, зокрема на безпілотних літальних апаратах. Наведено формули для розрахунку габаритів герметичної ампули оптико-електронного блоку вимірювання положення рідинного горизонту залежно від чутливості стосовно просторового положення рідинного горизонту та розмірів ампули. Апріорні розрахунки показують, що розроблений пристрій може мати чутливість стосовно положення рідинного горизонту (вертикалі) від кількох одиниць кутових секунд. Дано математичне обґрунтування визначення положення динамічної рівноваги поверхні рідини під час її затухаючих коливань у герметичній ампулі на основі теорії визначення положення рівноваги чутливого елемента гіротеодоліту, що суттєво скорочує час на індикацію просторового положення рідинного горизонту на ділянках рівномірного переміщення носія знімальної апаратури. Реалізація даної розробки дозволить підвищити точність визначення тангажу та крену носія знімальної апаратури та у підсумку підвищити точність отримання координатної інформації, отриманої методом аерознімання.

Список використаних джерел

1. Hlotov V. Analysis of application of the UAVs for military tasks / Hlotov V., Hunina A., Kniziev S., Kolesnichenko V., Prokhorchuk O. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2019. – Вип. I (37). – С. 69-77.
2. Федорук А. С. Определение границ археологических памятников с использованием БПЛА-съёмки: опыт решения задач на примере горного Алтая / А. С. Федорук, Д. В. Панин, Е. В. Крупочкин, С. И. Суханов // Теория и практика археологических исследований. – 2021. – Т. 33, № 2. – С. 32-44.
3. Аерофотосъёмка с БПЛА в поисковых задачах археологии: обзор и практические примеры / Е. В. Балков, Ю. Г. Карин, О. А. Позднякова, И. О. Шапаренко, Д. А. Гоглев // Геофизические технологии. – 2020. – № 3. – С. 38-47. DOI: 10.18303/2619-1563-2020-3-38.
4. Методика визначення об'єму Львівського полігону ТПВ з використанням архівних картографічних матеріалів та БПЛА TRIMBLE UX-5 / В. А. Лозинський, В. І. Нікулішин, К. Р. Третяк, Є. О. Шило // Геодезія, картографія і аерознімання. – 2016. – Вип. 83. – С. 64-82.
5. Иванов Н. В. Определение характеристик смешанных древостоев по данным аэрофотосъёмки с применением беспилотного летательного аппарата (БПЛА) / Н. В. Иванов, М. П. Шашков, В. Н. Шанин // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2021. – № 54. – С. 158-175.
6. Горелова Д. А. Преимущества использования беспилотных летательных аппаратов по сравнению с аэрокосмическим мониторингом в лесном хозяйстве [Электронный ресурс] / Д. А. Горелова, М. А. Горелова // Студенческий вестник. – 2020. – № 11 (109). – С. 28-31. – Режим доступа: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/109>.
7. Рыльский И. А. Совместное использование технологий БПЛА и наземного лазерного сканирования для создания объектно-ориентированных виртуальных моделей / И. А. Рыльский, Д. А. Парамонов, М. С. Малеванная // Геоинформационные технологии и дистанционные методы исследования Земли. – 2019. – Т. 25. – С. 398-413.
8. Определение спектральных характеристик взволнованной водной поверхности по цифровым фотографиям, полученным с БПЛА / В. А. Малинников, Д. В. Учаев, Дм. В. Учаев, А. С. Силович // Известия высших учебных заведений «Геодезия и аэрофотосъёмка». – 2018. – Т. 62, № 6. – С. 703-711.

9. Губар Ю. Аналіз впливу похибок положення межових знаків, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів, на вартість нерухомості / Ю. Губар // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2019. – Вип. I (37). – С. 106-115.
10. Глотов В. М. Аналіз сучасних методів знімання під час опрацювання великомасштабних планів / В. М. Глотов, А. В. Гуніна // Геодезія, картографія і аерознімання. – 2016. – Вип. 83. – С. 53-63.
11. Крячок С. Сучасний стан геодезичного моніторингу аеродромних покриттів в Україні / С. Крячок // Технічні науки та технології. – 2020. – № 1 (19). – С. 305-314.
12. Петрухин В. А. Маятниковая вертикаль для беспилотного летательного аппарата [Электронный ресурс] / В. А. Петрухин, В. Е. Мельников // Труды МАИ. – 2016. – Вып. 88. – Режим доступа: http://trudymai.ru/upload/iblock/a3d/petrukhin_melnikov_rus.pdf?lang=ru&issue=88.
13. Бесплатформенная инерциальная гировертикаль: пат. 154291 U1 Российская Федерация / Ю. В. Иванов, В. В. Лихошерст, А. В. Шукалов, В. Я. Распопов. – № 2014149328/28. – заявл. 08.12.2014; опубл. 20.08.2015, Бюл. № 23.
14. Двудіт П. Д. Гравіметрія : підручник для вузів / П. Д. Двудіт. – Львов : ЛАГТ, 1998. – 196 с.
15. Бесплатформенная инерциальная гировертикаль: пат. 96235 U1 Российская Федерация / Иванов Ю. В., Шведов Ю. В., Распопов В. Я. – № 2010108047/22. – заявл. 04.03.2010; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 23.
16. Пристрій для визначення вертикалі на рухливому об'єкті: пат. 10397 Україна: МПК G02B13/10 / Бурачек В. Г., Крельштейн П. Д., Надточій О. В., Шульц Р. В., Якунін О. В. – № u 2005 03805. – заявл. 21.04.2005; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11.
17. Пристрій для визначення вертикалі на рухомому об'єкті: пат. на корисну модель 148680 Україна. G01D 1/00, G01C 19/18 / Беленок В. Ю., Бойко О. Л., Крячок С. Д., Мамонтова Л. С., Терещук О. І. – Заявл. 17.05.2021; опубл. 01.09.2021, Бюл. № 35.
18. Воронов Н. Н. Гироскопическое ориентирование / Н. Н. Воронков, В. В. Кутырев. М. : Недра, 1989. – 296 с.
19. Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарату / В. Глотов, А. Церклевич, О. Збруцький, В. Колісниченко, О. Прохорчук, Р. Карнаушенко, В. Галецький // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2014. – Вип. I (27). – С. 131-136.

References

1. Hlotov, V., Hunina, A., Kniziev, S., Kolesnichenko, V., Prokhorchuk, O. (2019). Analysis of application of the UAVs for military tasks. *Present-day Achievements of Geodesic Sciences and Production*, 1(37), 69-77.
2. Fedoruk, A.S., Panin, D.V., Krupochkin, E.V., Sukhanov, S.I. (2021). Opredelenie granic arkeologicheskikh pamiatnikov s ispolzovaniem BPLA-semki: opyt resheniia zadach na primere gornogo Altaia [Determination of the boundaries of archaeological sites using UAV surveys: the experience of solving problems on the example of mountainous Altai]. *Teoriia i praktika arkeologicheskikh issledovaniï – Theory and practice of archaeological research*, 33(2), 32-44.
3. Balkov, E.V., Karin, Iu.G., Pozdniakova, O.A., Shaparenko, I.O., Goglev, D.A. (2020). Aero-fotosemka s BPLA v poiskovykh zadachakh arkeologii: obzor i prakticheskie primery [Aerial photography from UAVs in search tasks of archeology: an overview and practical examples]. *Geofizicheskie tekhnologii – Russian Journal of Geophysical Technologies*, 3, 38-47. DOI: 10.18303/2619–1563–2020–3–38.
4. Lozynskiy, V.A., Nikulishyn, V.I., Tretiak, K.R., Shylo, Ye.O. (2016). Metodyka vyznachennia ob'emu Lvivskoho polihonu TPV z vykorystanniam arkhivnykh kartografichnykh materialiv ta BPLA TRIMBLE UX-5 [Methods for determining the volume of the Lviv landfill using archival cartographic materials and UAV TRIMBLE UX-5]. *Heodeziia, kartografiia i aereznimannia – Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 83, 64-82.
5. Ivanov, N.V., Shashkov, M.P., Shanin, V.N. (2021). Opredelenie kharakteristik smeshannykh drevostoev po dannym aerofotosemki s primeneniem bespilotnogo letatel'nogo apparata (BPLA) [Determination of the characteristics of mixed forest stands according to aerial photography using an unmanned aerial vehicle (UAV)]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiia – Tomsk State University Journal of Biology*, 54, 158-175.

6. Gorelova, D.A., Gorelova, M.A. (2020). Preimushchestva ispolzovaniia bespilotnykh letatelnykh apparatov po sravneniiu s aerokosmicheskim monitoringom v lesnom khoziaistve [Advantages of using unmanned aerial vehicles over aerospace monitoring in forestry]. *Studencheskii vestnik – Student bulletin*, 11(109), 28-31. <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/109>.
7. Rylskii, I.A., Paramonov, D.A., Malevannaia, M.S. (2019). Sovmestnoe ispolzovanie tekhnologii BPLA i nazemnogo lazernogo skanirovaniia dlia sozdaniia obektno-orientirovannykh virtualnykh modelei [Combined use of UAV and ground laser scanning technologies to create object-oriented virtual models]. *Geoinformatcionnye tekhnologii i distantsionnye metody issledovaniia Zemli – Geoinformation technologies and remote methods of Earth research*, 25, 398-413. DOI: 10.35595/2414-9179-2019-1-25-398-413.
8. Malinnikov, V.A., Uchaev, D.V., Uchaev, Dm.V., Silovich, A.S. (2018). Opredelenie spektralnykh kharakteristik vzvolnovannoi vodnoi poverkhnosti po tsvetovym fotografiiam, poluchennym s BPLA [Determination of the spectral characteristics of the agitated water surface using digital photographs obtained from the UAV]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii «Geodeziia i aerofotosemka» – Proceedings of the Higher Educational Institutions «Geodesy and aerophotosurveying»*, 62(6), 703-711. DOI: 10.30533/0536-101X-2018-62-6-703-711.
9. Hubar, Yu. (2019). Analiz vplyvu pokhybok polozhennia mezhovykh znakov, otrymanykh za dopomohoiu bezpilotnykh litalnykh aparativ, na vartist nerukhomosti [Analysis of the impact of errors in the position of boundary markers obtained with the help of unmanned aerial vehicles on the value of real estate]. *Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Present-day Achievements of Geodesic Sciences and Production*, 1(37), 106-115.
10. Hlotov, V.M., Hunina, A.V. (2016). Analiz suchasnykh metodiv znimannia pid chas opratsiuvannia velykomasshtabnykh planiv [Analysis of modern survey methods during the development of large-scale plans]. *Heodeziia, kartohrafiia i aeroznimannia – Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 83, 53-63.
11. Kriachok, S. (2020). Suchasnyi stan heodezychnoho monitorynhu aerodromnykh pokryttiv v Ukraini [Current state of geodetic monitoring of aerodrome surfaces in Ukraine]. *Tekhnichni nauky ta tekhnologii – Technical sciences and technologies*, 1(19), 305-314.
12. Petrukhin, V.A. Melnikov, V.E. (2016). Maiatnikovaia vertikal dlia bespilotnogo letatel'nogo apparata [Pendulum vertical for an unmanned aerial vehicle]. *Trudy MAI – Proceedings of the MAI*, 88. http://trudymai.ru/upload/iblock/a3d/petrukhin_melnikov_rus.pdf?lang=ru&issue=88.
13. Ivanov, Iu.V., Likhosherst, V.V., Shukalov, A.V., & Raspopov, V.Ia. (2015). *Besplatformennaia inertialnaia girovertikal [Strapdown inertial gyrovertical]* (Rossiiskii patent № 154291 U1).
14. Dvulit, P. D. (1998). *Hravimetriia [Gravimetry]*. LAHT.
15. Ivanov, Iu.V., Shvedov, Iu.V., & Raspopov, V.Ia. (2010). *Besplatformennaia inertialnaia girovertikal [Strapdown inertial gyrovertical]* (Rossiiskii patent № 96235 U1).
16. Burachek, V.H., Krelshtein, P.D., Nadtochii, O.V., Shults, R.V., Yakunin, O.V. (2005). *Prystrii dlia vyznachennia vertykali na rukhlyvomu obiekti [Device for determining the vertical on a moving object]*
17. Belenok V.Iu., Boiko O.L., Kriachok S.D., Mamontova L.S., & Tereshchuk O. I. (2021). *Prystrii dlia vyznachennia vertykali na rukhomomu obiekti [Device for determining the vertical on a moving object]* (Ukrainskyi patent na korysnu model № 148680). Derzhavna sluzhba intelektualnoi vlasnosti.
18. Voronov, N. N., & Kutyrev, V. V. (1989). *Giroskopicheskoe orientirovanie [Gyroscopic orientation]*. Nedra.
19. Glotov, V., Tcerklevich, A., Zbrutckii, O., Kolisnichenko, V., Prokhorchuk, O., Karnausenko, R., Galetckii, V. (2014). Analiz i perspektyvy aeroznimannia z bezpilotnogo lital'nogo aparatu [Analysis and prospects of aerial photography from an unmanned aerial vehicle]. *Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva – Present-day Achievements of Geodesic Sciences and Production*, 1(27), 131-136.

Отримано 08.08.2021

UDC 629.7.014: 528.71

**Oleksiy Tereshchuk¹, Sergiy Kryachok², Vadym Belenok³,
Lyudmila Mamontova⁴, Olena Boiko⁵**

¹PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Director of the Educational and Scientific Institute of Architecture, Design and Geodesy
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: olexter1957@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-6433-9351>

²PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv national University of Technology (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: geodesist2015@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5633-1501>

³PhD in Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor of Aerospace Geodesy and Land Management Department
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: belenok.vadim@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-5357-7493>

⁴Senior Lecturer of the Department of Geodesy, Cartography and Land Management
Chernihiv Polytechnic National University (Chernihiv, Ukraine)

E-mail: liudmila_mamontova@gmail.com. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0003-4144-5261>

⁵Senior Lecturer at the Department of Aerospace Geodesy and Land Management
National Aviation University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: boyko_lena@ukr.net. **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-8654-9392>

DEVICE FOR DETERMINING THE POSITION OF VERTICAL ON UNMANNED AIRCRAFT DESIGNED FOR AERIAL PHOTOGRAPHY

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are used in various spheres of human activity. However, the main task of using a UAV is to obtain coordinate information about terrain objects.

The accuracy of determining the coordinates based on the results of aerial photography largely depends on the accuracy of determining the spatial position of the aerial camera at the moments of photographing, which in turn depends on the values of the pitch and roll of the carrier of the survey equipment, which can be determined using vertical (horizon) sensors.

The analysis of known devices for reproducing the position of the vertical (horizon), which are placed on moving objects, based on the properties of a physical pendulum, using accelerometers as an indicator of the horizon of a circular level, has been carried out.

Analysis of the known technical solutions showed low accuracy and reliability of vertical reproduction on moving objects, which also causes low accuracy in determining the pitch and roll of the carrier; and, as a result, coordinate information.

The purpose of this article is to develop a functional model of the device for determining the vertical position of increased accuracy for use on aircraft intended for aerial photography, in particular with UAVs.

The article provides a functional diagram of a device for determining the vertical position of increased accuracy for use on aircraft and the principle of operation of the device. The mathematical substantiation of the signal values for calculating the pitch and roll values is given. Formulas for calculating the dimensions of a sealed ampoule of an optoelectronic unit for measuring the position of a liquid horizon, depending on the sensitivity with respect to the spatial position of the liquid horizon and the dimensions of the ampoule are given. Calculations showing that the developed device can be sensitive to the position of the liquid horizon (vertical) from several units of angular seconds have been performed. The determination of the position of the dynamic equilibrium of the liquid surface during damped oscillations in a sealed ampoule is mathematically substantiated, which significantly reduces the time for indicating the spatial position of the liquid horizon in the areas of uniform movement of the carrier.

The development is protected by a patent for a useful model, and its implementation will improve the accuracy of determining the pitch and roll of the carrier of the survey equipment and, as a result, increase the accuracy of coordinate information obtained by the method of aerial photography, including the use of UAVs.

Keywords: *unmanned aerial vehicle; aerial photography; vertical (horizon) sensor; pitch; roll.*

Fig.: 8. References: 19.