

*И.В. КОРЫТЦЕВ, канд. техн. наук, С.А. ШЕЙКО, канд. техн. наук,  
В.М. КАРТАШОВ, д-р техн. наук, О.В. ЗУБКОВ, канд. техн. наук,  
В.Н. ОЛЕЙНИКОВ, канд. техн. наук, С.И. БАБКИН, канд. техн. наук, И.С. СЕЛЕЗНЕВ*

## ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ПРИ ПЕЛЕНГАЦИИ И ОПРЕДЕЛЕНИИ ДАЛЬНОСТИ ДО МАЛОРАЗМЕРНЫХ БПЛА В ОПТИЧЕСКОМ И ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНАХ

### Введение

В настоящее время количество сфер применения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) стремительно растет, многие из них стали доступными для обычных пользователей. Обнаружение и оценка координат БПЛА имеет решающее значение для защиты от их несанкционированного применения в охраняемых зонах, для предотвращения столкновения БПЛА с другими летательными аппаратами, в случаях навигации нескольких БПЛА при выполнении экологического мониторинга, наблюдения и ландшафтной разведки.

Для обнаружения и пеленгации БПЛА используют радиолокационные, радиочастотные, акустические и оптико-электронные методы, а также их комплексирование [1]. Среди оптико-электронных методов определения координат объектов выделяют лазерное сканирование, структурированное освещение и пассивные стерео-бинокулярные системы [2]. Пассивные оптико-электронные системы по сравнению с активными обеспечивают следующие преимущества: скрытность измерений, значительно меньшее энергопотребление и низкая себестоимость за счет отсутствия мощного дорогостоящего лазера, возможность распознавания объектов по анализу их изображений, возможность измерения расстояний до удаленных объектов или объектов с малым коэффициентом отражения [3, 4].

Стерео-бинокулярные системы могут быть реализованы как в оптическом (видимом) [5 – 7], так и в инфракрасном (ИК) [8] диапазонах. Они применяются для автоматизации посадки больших БПЛА или навигации малых БПЛА в условиях ограниченного пространства.

Существуют пассивные оптико-электронные системы определения местоположения объектов с применением одной камеры [9, 10]. Однако для измерения расстояния они должны оперировать серией кадров, сделанных камерой при разных значениях фокусного расстояния [9] либо при ее пространственном смещении [10]. Очевидно, что в случае наблюдения движущихся БПЛА применение таких методов не представляется возможным.

Прогресс в развитии матричной видеотехники высокого разрешения открывает новые возможности для обнаружения воздушных объектов малых размеров, измерения их координат, а также их распознавания. Применение современных светочувствительных матриц позволяет расширить возможности системы стереовидеонаблюдения (СВН) на ближний и дальний ИК диапазоны [8, 11]. Использование оптико-электронного метода СВН в сочетании с акустическим методом выявления воздушных объектов [12 – 15] позволит в значительной степени повысить эффективность аппаратного комплекса для противодействия дронам.

Существует множество алгоритмов обработки стереоизображений для измерения дальности [16 – 19]. Количество этапов обработки, содержание этих этапов и их параметры зависят от конкретной задачи: от вида, структуры, размера наблюдаемого объекта; от условий наблюдения – освещенности объекта, его контраста с фоном, отношения сигнал/шум; от наличия или отсутствия предварительного целеуказания и т.д.

В данной работе рассматривается задача выбора алгоритма обработки видеоизображений стереопары, полученных в видимом, ближнем или дальнем ИК диапазонах, определение параметров этого алгоритма, обеспечивающих надежное определение дальности до малых

БПЛА, их последующее автосопровождение и оценку параметров движения. При этом предполагается, что различие в обработке сигналов в оптическом, ближнем и дальнем ИК диапазонах проявляется на этапе обнаружения БПЛА. Это обусловлено различием портретов БПЛА в указанных диапазонах, что требует отдельной процедуры обучения нейронной сети на серии портретов в соответствующем диапазоне наблюдения.

### Метод пеленгации и измерения дальности

Рассмотрим возможности оптического метода двухканального СВН. На рис. 1 изображена схема формирования световых образов объекта  $T$  на светочувствительных матрицах  $VM_1$ ,  $VM_2$  видеокамер с фокусным расстоянием  $F$ . Схема показывает лишь основные принципы формирования оптических проекций, а все абсолютные их значения и угловые величины показаны условно, т.к. реальная дальность до объекта  $D$  значительно больше расстояния  $O_1O_2$  между оптическими осями  $z_1$  и  $z_2$  объективами видеокамер – стереобазы  $b$ . Угол обзора  $\beta$  определяется углами обзора объективов, полагаем  $\beta = \beta_1 = \beta_2$ . На бесконечно большой дальности до объекта угол параллакса  $\alpha$  будет равен нулю, и при нахождении объекта на оси его световые образы формируются в центрах матриц.

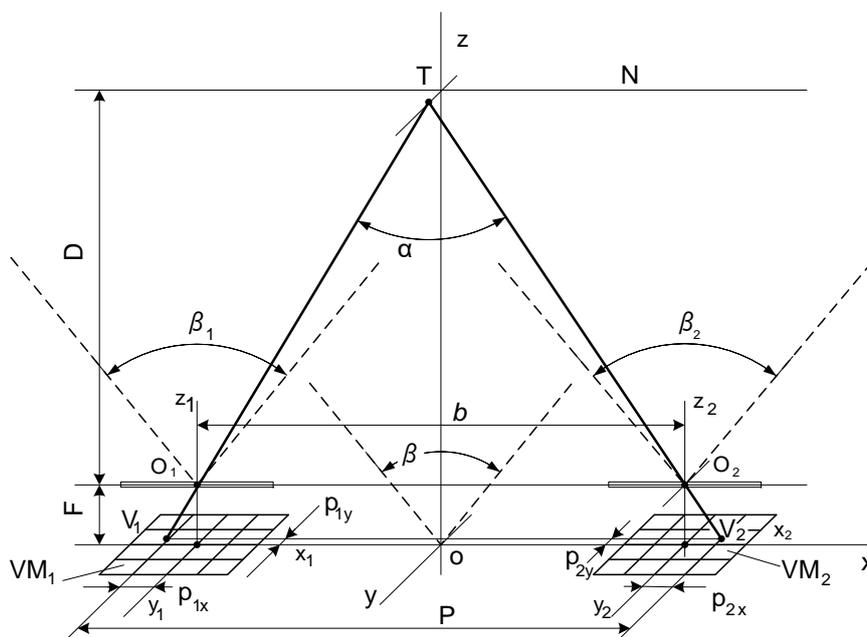


Рис. 1. Формирование световых образов на светочувствительных матрицах системы СВН

При уменьшении дальности и возможном смещении объекта от оси  $z$  угол параллакса увеличивается; на матрицах наблюдаются отклонения образов (точки  $V_1$ ,  $V_2$ ) от центров матриц как по горизонтали (ось  $x$ )  $p_{1x}$ ,  $p_{2x}$  – это величины соответствующих линейных параллаксов с определенными знаками, так и по вертикали (ось  $y$ )  $p_{1y}$ ,  $p_{2y}$  – это за счет смещения объекта вдоль оси  $y$  относительно оси  $z$ . Суммарную величину линейного параллакса  $p$  можно определить из подобия треугольников  $O_1TO_2$  и  $V_1TV_2$

$$p = \frac{bF}{D}, \quad (1)$$

где  $p = p_{2x} - p_{1x}$ .

Таким образом, дальность до объекта определяется базой системы, одинаковым фокусным расстоянием объективов и суммарным линейным параллаксом:

$$D = \frac{bF}{(p_{2x} - p_{1x})} = \frac{bF}{w_x(n_{2x} - n_{1x})}, \quad (2)$$

где  $n_{1x}$ ,  $n_{2x}$  – количество пикселей в линейных параллаксах, взятые с соответствующими знаками – (-) если линейный параллакс наблюдается на отрицательной полуоси  $x$ , (+) – если на положительной полуоси  $x$  видеоматриц  $VM_1$  и  $VM_2$  соответственно левой и правой видеокамер;  $w_x$  – размер зерна пикселей по горизонтали.

Суммарный линейный параллакс одинаков для всех положений точки  $T$  объекта на плоскости, проходящей через линию  $N$  параллельно плоскости измерений  $XU$ . В то же время линейные параллаксы на матрицах видеокамер изменяются и по величине, и по знаку в своих системах координат  $x_1y_1z_1$  и  $x_2y_2z_2$ , привязанных к центрам матриц, с плоскостями  $x_1y_1$  и  $x_2y_2$ , совпадающими с плоскостью  $XU$ . Как видно из рис. 1, если точка  $T$  находится на главной оси  $z$  системы СВН или смещена лишь по оси  $y$ , то  $|p_{1x}| = |p_{2x}|$ , и их разность  $\Delta p_x = 0$ . При смещении объекта вправо от оси  $z$  по горизонтали (вдоль оси  $x$ )  $|p_{1x}| > |p_{2x}|$ , появляется положительная разность в величинах модулей линейных параллаксов

$$\Delta p_x = |p_{1x}| - |p_{2x}| > 0,$$

а при смещении объекта влево от оси  $z$  эта разность становится отрицательной

$$\Delta p_x = |p_{1x}| - |p_{2x}| < 0.$$

Появляется возможность сформировать сигнал управления поворотным устройством оптической системы для перемещения ее оси  $z$  по горизонтали в направлении перемещения объекта на угол  $\Delta \gamma_x = \pm m_x \cdot \Delta p_x$  или до выполнения условия  $\Delta p_x = 0$ ; здесь  $m_x$  – коэффициент пропорциональности по горизонтали с размерностью град/пикс.

Ортогональные смещения световых образов  $p_{1y}$ ,  $p_{2y}$  являются также знакопеременными, и после выполнения перемещения главной оси по горизонтали они становятся равными, а их знак соответствует направлению перемещения объекта по оси  $y$ . Так, отрицательные значения смещений соответствуют перемещению объекта вверх по оси  $y$ , а положительные – вниз. Поворотное устройство системы должно отработать команду соответственно на увеличение или уменьшение угла места главной оси системы на величину  $\Delta \gamma_y = \pm m_y \cdot (p_{1y} + p_{2y})/2$  либо до выполнения условия  $p_{1y} + p_{2y} = 0$ ; здесь  $m_y$  – коэффициент пропорциональности по вертикали. Смещения  $p_{1y}$  и  $p_{2y}$  должны быть одинаковыми как по знаку, так и по величине. Их возможное неравенство указывает на неправильную юстировку видеокамер.

Механико-электрическое сопровождение объекта выполняется эпизодически с целью, чтобы объект не вышел из поля зрения оптической системы. Вся вторичная обработка сигналов, связанная с распознаванием дронов, на фоне помех и определения параметров их движения осуществляется при непрерывном электронном автосопровождении.

### **Экспериментальная установка СВН, ее калибровка и оценка погрешностей**

Экспериментальная установка включала в себя две IP камеры Dahua DH-IPC-HFW2431RP-ZAS-IRE6 разрешением 2688(H) x 1520(V), разнесенных по горизонтали на величину базы 1 м.

IP камеры подключались по LAN интерфейсу к сетевому роутеру TP-Link TL-WR841N, а затем по WAN интерфейсу – к ноутбуку с программным обеспечением Smart PSS для записи видеопотоков с видеокamer. Системные часы IP камер предварительно программно синхронизировались. Старт и окончание процессов записи производились путем одновременной подачи аппаратного сигнала "тревоги" на обе камеры.

Горизонтальное поле зрения обеих камер через веб-интерфейс устанавливалось одинаковым  $\beta = 60^\circ$  и контролировалось по изображению специальной мерной таблицы, установленной на расстоянии 1 м по оптической оси каждой камеры.

Структурная схема экспериментальной установки показана на рис. 2, а внешний вид – на рис. 3. Схема стереоскопической системы и приведенная формула (2) предполагают, что оптические оси объективов параллельны и фотоприемные матрицы находятся на одной прямой, параллельной оси  $x$ . Однако в реальной экспериментальной установке это реализовать достаточно трудно. Вторым источником ошибок измерения являются искажения объективов камер, главным образом – дисторсия. В этом случае коэффициент линейного увеличения изменяется по полю зрения объектива, нарушая геометрическое подобие между объектом и его изображением.

Таким образом, для оценивания трехмерных координат объекта по стереопаре необходимо: знать внутренние параметры камер (задача калибровки), знать параметры взаимного расположения камер (задача взаимной калибровки), определить на изображениях координаты соответствующих точек объекта (задача поиска сопряженных точек).

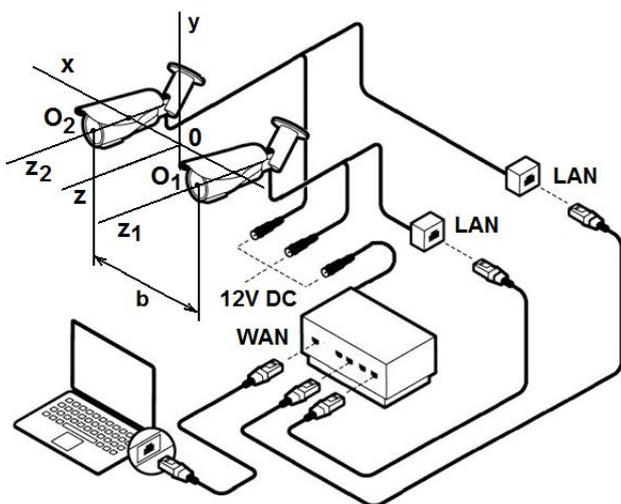


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки



Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки

Задача калибровки каждой камеры, составляющей стереопару, заключается в нахождении матрицы  $C$ , которая в случае линейной модели содержит только параметры объектива и светочувствительной матрицы [2]:

$$C = \begin{bmatrix} F/w_x & 0 & u_0 \\ 0 & F/w_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $w_x$  и  $w_y$  – шаг пикселей вдоль осей  $x$  и  $y$  соответственно;  $u_0$  и  $v_0$  – координаты главной точки относительно начала координат светочувствительной матрицы.

В нелинейной модели камеры матрица  $\mathbf{C}$  учитывает также дисторсию.

Задача взаимной калибровки решается путем нахождения внешних параметров стереоскопической системы, которые описываются матрицей поворота  $\mathbf{R}$  и вектором переноса  $\mathbf{t}$ :

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_\alpha \cdot \mathbf{R}_\beta \cdot \mathbf{R}_\gamma,$$
$$\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T,$$

где  $\mathbf{R}_\alpha, \mathbf{R}_\beta, \mathbf{R}_\gamma$  – матрицы поворота вокруг осей  $x, y, z$  на углы  $\alpha, \beta, \gamma$  соответственно;  $t_x, t_y, t_z$  – значения переноса вдоль осей  $x, y, z$ ;  $T$  – знак транспонирования.

Для определения матриц  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{R}$  и вектора  $\mathbf{t}$  существует много различных моделей и подходов [2, 3, 16]. Широко распространены методы, использующие в качестве объекта калибровки набор точек с известными пространственными координатами, например калибровочного щита [20]. Эти методы дают высокую точность калибровки стереопары, однако требуют сложной и точной системы крепления и перемещения щита для его съемки с различных ракурсов.

Существуют методы, которые используют для калибровки некоторые геометрические свойства сцены, например, линии схождения [21]. По понятным причинам, такие методы имеют недостаточную для наших целей точность.

В последнее время получили развитие методы самокалибровки [3, 9]. В качестве объекта съемки они используют калибровочную таблицу в виде сетчатого или шахматного поля известных размеров, снимаемую в различных положениях. Трех кадров достаточно, чтобы определить все внутренние и внешние параметры камеры. При малом числе снимков такие методы менее устойчивы и точны, чем при использовании точек с известными пространственными координатами, однако при большом количестве снимков (20 и более) их точность сопоставима.

Поскольку в нашем случае используются недорогие IP камеры и угол поля зрения объективов достаточно широк, необходимо производить калибровку с учетом нелинейных искажений. Для нелинейной модели камеры обычно используются смешанные двухшаговые методы калибровки. Сначала проводится линейная оценка параметров, которая затем используется в итеративной оптимизации как начальное приближение. В качестве минимизируемого функционала ошибки берется среднеквадратическая ошибка проецирования всех калибровочных точек на плоскость изображения. Основные различия в калибровке у различных авторов заключаются в способе вычисления начального приближения. Эти методы калибровки подробно описаны, например, в работах [22, 23].

При проведении калибровки мы руководствовались следующими главными принципами: простота изготовления испытательной таблицы и точность измерения пространственных координат. Для устойчивой и точной калибровки необходимо достаточно большое количество калибровочных точек, в процессе калибровки различные положения таблицы должны заполнять как можно большую часть рабочей области стереозрения, а ее изображения – как можно большую часть площади кадра. Поэтому мы стремились, чтобы на каждом кадре калибровочная таблица покрывала максимальную область изображения.

Одним из подходов может служить большой щит с сеткой, который снимается из разных положений передвигающейся стереопарой. Однако при перемещении стереопары можно нарушить взаимное расположение камер, что приведет к ошибкам калибровки. Поэтому в нашем случае использовалась жестко закрепленная стереопара, изменялось положение калибровочной таблицы.

Изготовленная нами калибровочная таблица представляет собой фанерный щит с наклеенной на него калибровочной сеткой в виде шахматного поля с количеством квадратов  $9 \times 6$ . Углы квадратов сетки служат калибровочными точками. Размер таблицы  $0,9 \text{ м} \times 0,60 \text{ м}$  позволяет производить калибровочные снимки на расстоянии  $1 \text{ м}$  и более. При этом таблица

полностью попадает в кадр при горизонтальном угле поля зрения  $60^\circ$  и находится дальше, чем ближняя граница зоны резко изображаемого пространства.

Калибровка камер осуществлялась в OpenCV при помощи функции, основанной на методах Zhang [22] и Bouquet [23]. Для оценки погрешности определения дальности после калибровки экспериментальной установки были сформированы 30 изображений калибровочной таблицы в разных позициях на расстояниях 1 – 2 м от камер. Для видеопотоков IP камер при этом устанавливалось минимальное сжатие. Пример одного такого изображения с найденными калибровочными точками показан на рис. 4.

Погрешность калибровки оценивалась при фиксированных значениях базы  $b=0,5$  м и 1 м. Маркер дальности устанавливался вдоль оси  $z$  при  $y=0$  (по оси системы) и по осям, отклоненным от оси  $z$  на  $\pm 25^\circ$ . Диапазон дальностей до маркера от 5 м до 100 м, шаг – 5 м (рис. 5). Расстояния от центра системы СВН до маркера были измерены с помощью лазерного дальномера Bosh GLM 250 с типовой точностью измерений  $\pm 1$  мм. Маркер представлял собой таблицу, изготовленную аналогично калибровочной, но с изображением креста в центре. Определение точки пересечения линий креста на изображении производилось в автоматическом режиме. На каждом расстоянии производилось 10 измерений дальности по 10 произвольным парам кадров системы СВН.

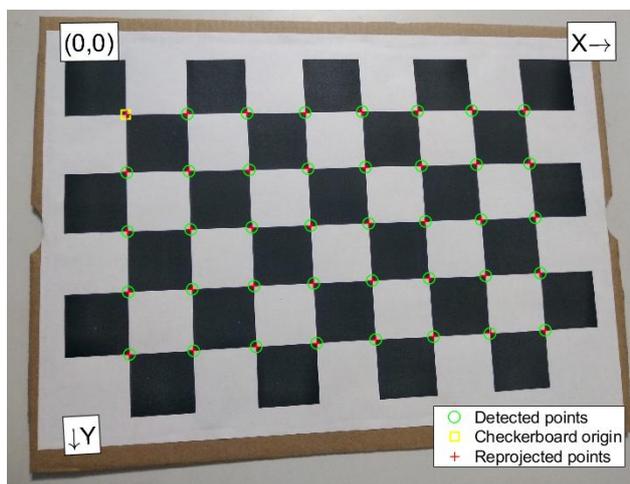


Рис. 4. Пример изображения калибровочной таблицы с найденными калибровочными точками

Определение дальности производилось по формуле (2), приведенной к виду, куда вместо фокусного расстояния  $F$  и шага пикселей  $w_x$  входят угол обзора  $\beta$  и разрешение по горизонтали  $M_x$  светочувствительной матрицы. Фокусное расстояние  $F$  можно выразить через угол обзора  $\beta$  камеры

$$F = \frac{W}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)}, \quad (3)$$

где  $W$  – ширина светочувствительной матрицы.

Подставляя (3) в выражение (2) и учитывая, что  $W/w_x = M_x$ , получаем

$$D = \frac{bM_x}{2 \cdot \operatorname{tg}(\beta/2)[n_{2x} - n_{1x}]}. \quad (4)$$

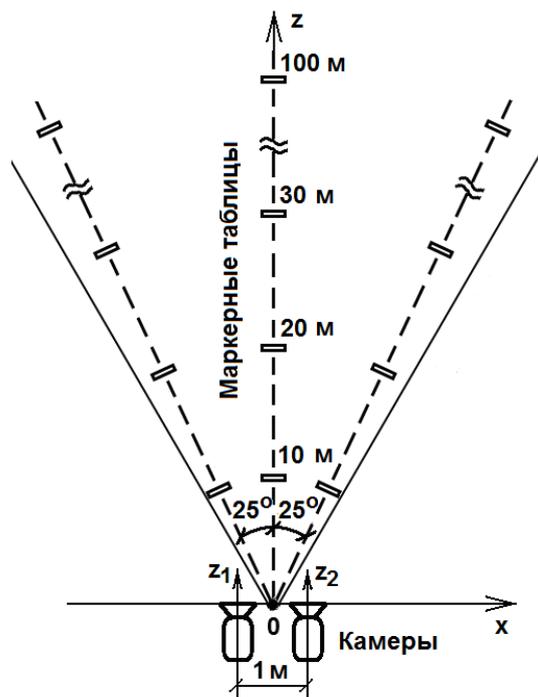


Рис. 5. К оценке погрешностей системы СВН

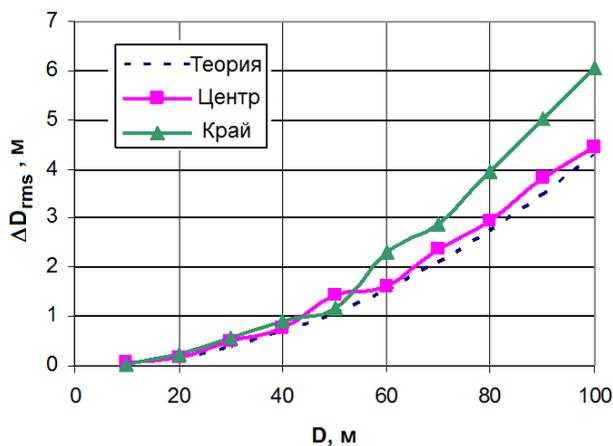


Рис. 6. Результаты испытаний откалиброванной системы СВН

Входящие в формулу (5) величины, соответствующие условиям эксперимента:  $F = 6,38$  мм с учетом  $\beta = 60^\circ$  и диагонали матрицы  $(1/3)''$ ,  $w_x = 2,74$  мкм при горизонтальном разрешении 2688. Как следует из рис. 6, экспериментальная ошибка измерения дальности не превышает 4,5 % по центру и 6 % по краям горизонтального поля наблюдения

### Экспериментальное определение координат БПЛА

Эксперимент по измерению координат БПЛА с помощью системы СВН проводился в полевых условиях в Харьковской области, Украина. Измерения осуществлялись 20.01.2020 г. с 14.00 до 16.00 в пасмурную погоду. Освещенность на вертикальной плоскости составляла 450 – 650 лк. Измерение освещенности проводилось люксметром Wintact WT81.

В эксперименте использовался квадрокоптер DJI Phantom 3 SE с горизонтальным размером 0,35 м. Тестовые полеты происходили на расстоянии до 200 м.

Координаты квадрокоптера (широта, долгота и высота), полученные стандартным GPS приемником квадрокоптера, использовались для сравнения с координатами БПЛА, полученными с помощью системы СВН. Для этого географические координаты квадрокоптера преобразовывались в декартовы, а затем путем поворота и смещения оси координат совмещались с системой координат системы СВН. Местоположение квадрокоптера описывается относительно начала отсчета в декартовых координатах.

В данной работе приводятся результаты измерений по двум тестовым полетам БПЛА. Трек 1 – пролет вдоль оси  $z$  с зависанием на высоте 5 м над точками, удаленными на 3 м, 25 м, 50 м, 100 м, 150 м, 200 м. Трек 2 – поднимающаяся спираль с диаметром витка 50 м на высоту 30 м с центром, удаленным по оси  $z$  на 100 м, 3 витка.

Алгоритм обработки изображений системы СВН для обнаружения и распознавания БПЛА подробно описан в [24]. Он включал в себя следующие этапы:

- преобразование цветного изображения в оттенки серого и выполнение нормализации его яркости для уменьшения влияния изменений интенсивности освещения;
- выделение движущихся фрагментов изображения в текущем видеокадре на неподвижном фоне методом MOG, MOG2 или KNN;
- применение ко всем фрагментам изображения, в которых обнаружено движение, алгоритма истории движения для уменьшения количества ложных тревог;
- распознавание изображения БПЛА при помощи нейронной сети.

Данный алгоритм позволяет обнаруживать и распознавать БПЛА при минимальном размере изображения 5x5 пикселей с вероятностью более 90 %. При разрешении видеокamеры 2688x1520 расстояние до квадрокоптера DJI Phantom 3 SE, при котором размер его изображения равен 5x5 пикселей, будет составлять 166 м. Это максимальная дальность системы СВН, ограниченная надежностью обнаружения и распознавания БПЛА.

Результаты испытаний откалиброванной установки СВН определения дальности по выражению (4) для откалиброванной установки СВН показаны на рис. 6.

Для каждого расстояния приведены значения среднеквадратической (по 10 измерениям) ошибки измерения дальности  $\Delta D_{rms}$ . Пунктирной линией показаны значения максимальной абсолютной ошибки определения дальности, рассчитанные по формуле, учитывающей разрешающую способность СВН

$$\Delta D = \pm \frac{bFw_x D^2}{(bF)^2 - (w_x \cdot D)^2}. \quad (5)$$

Алгоритм обработки изображений для пеленгации БПЛА показан на рис. 7.

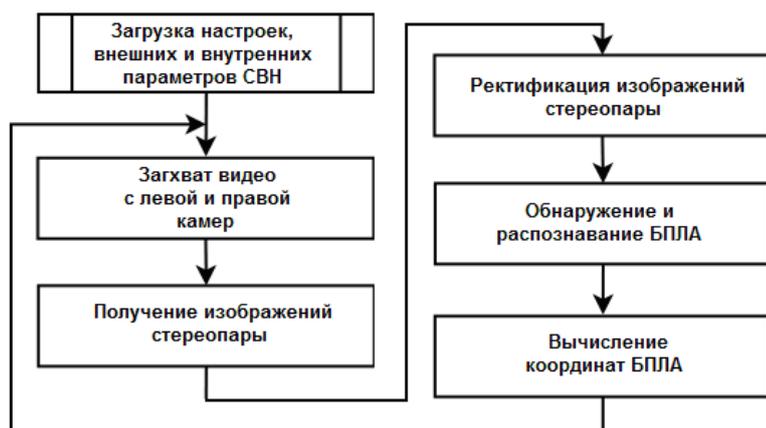


Рис. 7. Алгоритм обработки сигналов для определения координат

В качестве сопряженных точек изображения БПЛА использовались координаты центра  $V(x, y)$  области, выделенной на этапе обнаружения и распознавания (рис.8).

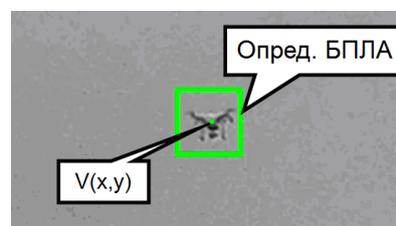


Рис. 8. Нахождение координат БПЛА на изображении

Азимут и угол места БПЛА вычислялись как

$$\varphi_{az} = \frac{\beta \cdot x}{M_x}, \quad \varphi_{el} = \frac{\beta \cdot y}{k \cdot M_y},$$

где  $M_x$ ,  $M_y$  – разрешение матрицы по вертикали,  $k$  – формат кадра (16/9).

Результирующие значения азимута и угла места вычислялись как среднее по результатам измерений двумя камерами.

На рис. 9, 10 показаны результаты сравнения GPS координат БПЛА и результатов измерений системы СВН. Рис. 9 соответствует треку 1, рис. 10 – треку 2. Графики построены в координатах:  $a$  – азимут-время;  $b$  – угол места – время;  $в$  – дальность – время.

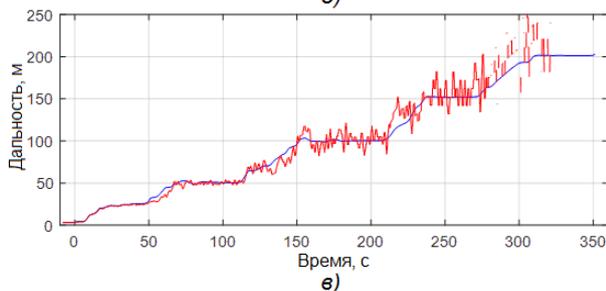
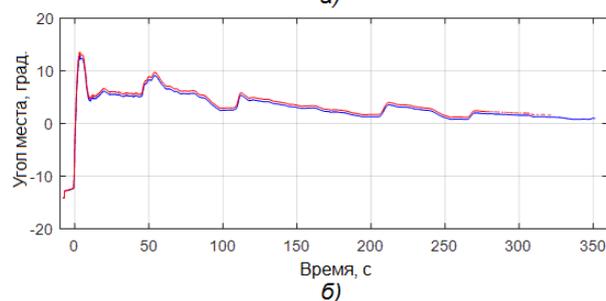
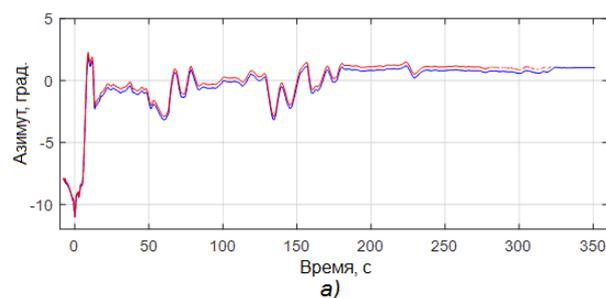


Рис. 9. Определение координат БПЛА (трек 1)

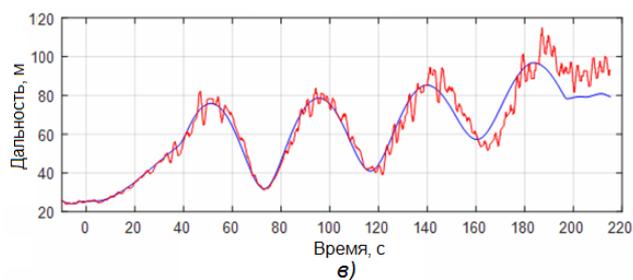
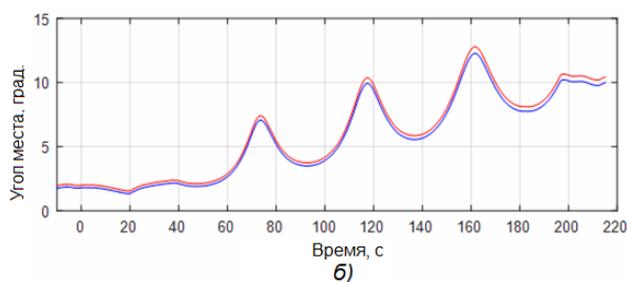
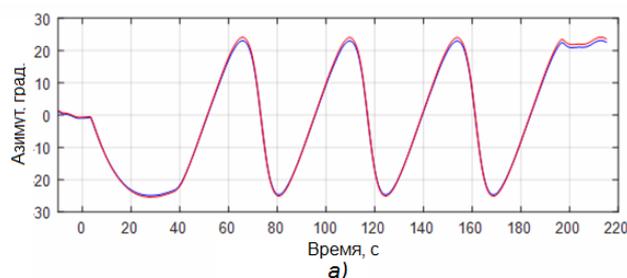


Рис. 10. Определение координат БПЛА (трек 2)

Анализируя графики на рис. 9, 10, можно отметить, что измерения азимута и угла места БПЛА системой СВН точно совпадают с данными GPS приемника. Это объясняется высокой разрешающей способностью камер и достаточно точной калибровкой их внутренних параметров. Для измерений по треку 1 среднеквадратическое отклонение относительной ошибки измерения дальности составило  $\Delta D_{rms} = 9,6 \%$ , максимальная относительная ошибка измерений  $\Delta D_{max} = 26,4 \%$ . Для измерений по треку 2 –  $\Delta D_{rms} = 7,8 \%$ ,  $\Delta D_{max} = 24,8 \%$ .

При дальностях более 160 м на рис. 9 наблюдаются сбои в системе обнаружения и распознавания БПЛА, связанные с тем, что размер изображения объекта становится менее чем 5x5 пикселей. Этот процесс сопровождается заметным увеличением абсолютной ошибки измерения дальности. Наибольшая среднеквадратическая ошибка измерений дальности наблюдается в среднем диапазоне расстояний действия системы СВН 70 – 120 м. Как показал анализ, причиной этого является одновременное действие двух факторов: первый – ухудшение разрешающей способности системы СВН по дальности с увеличением дальности (рис. 6), второй – невысокая точность метода определения сопряженных точек как координат центров  $V(x, y)$  областей обнаружения БПЛА (рис. 9). Причем, второй фактор дает большие ошибки на меньших дальностях до объекта.

На графике рис.10, в заметно влияние недостаточно точной ректификации системы СВН, что проявляется в увеличении ошибки измерения дальности при больших азимутах и углах места. При этом влияние ошибок неточной ректификации сравнимо с влиянием ошибок определения сопряженных точек.

## Выводы

Проведенный теоретический анализ и экспериментальные исследования показали:

1. Основной вклад в ошибку определения местоположения БПЛА с помощью системы СВН принадлежит измерению дальности. Измерения азимута и угла места при этом достаточно точны при высокой разрешающей способности камер и достаточно точной компенсации их нелинейных искажений.

2. Очевидными путями для увеличения точности измерения дальности системой СВН, а также увеличения дальности обнаружения объекта, является увеличение разрешающей способности камер. Однако для обнаружения, распознавания и пеленгации БПЛА в реальном времени в этом случае понадобятся значительные вычислительные ресурсы. Увеличение четкости изображения в два раза приводит к увеличению вычислительной сложности в четыре раза на каждом этапе обработки.

3. Уменьшение угла обзора камер при прочих равных условиях увеличивает разрешающую способность системы СВН по азимуту, углу места и дальности. Уменьшение поля зрения системы при этом необходимо компенсировать введением пространственного механико-электрического сканирования, а после обнаружения БПЛА – эпизодическим трекингом объекта, чтобы он не вышел из поля зрения.

4. Определение сопряженных точек как координат центров  $V(x, y)$  областей, выделенных на этапе обнаружения и распознавания БПЛА, дает недостаточно хороший результат на малых дальностях до объекта. Поэтому полагается целесообразным уточнять местоположение сопряженных точек корреляционным методом с размером окна, равным или несколько больше размера области  $V(x, y)$ .

5. Точность ректификации системы СВН существенно влияет на результат измерения дальности, поэтому к процессу калибровки нужно подходить тщательным образом. Необходимо использовать таблицы с как можно наибольшим числом калибровочных точек, в процессе калибровки различные положения таблицы должны заполнять как можно большую часть рабочей области стереозрения, а ее изображения – как можно большую часть площади кадра.

6. Для уменьшения максимальных ошибок целесообразно проводить усреднение во времени результатов измерений дальности с учетом радиальной скорости перемещения БПЛА.

#### Список литературы:

1. Farlik J., Kratky M., Casar J., Stary V. Multispectral Detection of Commercial Unmanned Aerial Vehicles // *Sensors*. 2019. Vol. 19 (7). P.1517–1545.
2. Shapiro L., Stockman G. *Computer Vision*. Prentice Hall, 2001. 617 p.
3. *Computer Vision. CCF Chinese conf. CCCV 2015. Proceedings, Part II / Editors Zha H., Chen X., Wang L., Miao Q. Xi'an, China. September, 2015. 471 p.*
4. Mrovlje J., Vrancic D. Distance measuring based on stereoscopic pictures // *Proc. 9th International PhD Workshop on Systems and Control. Izola, Slovenia. 2008. 6 p.*
5. Gökçe F, Üçoluk G, Şahin E, Kalkan S. Vision-Based Detection and Distance Estimation of Micro Unmanned Aerial Vehicles // *Sensors*. 2015. Vol. 15 (9). P. 23805–23846.
6. Ma Z., Hu T., Shen L. Stereo Vision Guiding for the Autonomous Landing of Fixed-Wing UAVs: A Saliency-Inspired Approach // *International Journal of Advanced Robotic Systems*. March, 2016. 13 p.
7. Mustafah Y. M., Azman A. W., Akbar F. Indoor UAV positioning using stereo vision sensor // *Procedia Engineering*. 2012. Vol. 41. P. 575–579.
8. Kong W., Zhang D., Wang X., Xian Z., J. Zhang. Autonomous landing of an UAV with a ground-based actuated infrared stereo vision system // *2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, 2013. P. 2963–2970.*
9. Chaudhuri S., Rajagopalan A.N. *Depth from Defocus: A Real Aperture Imaging Approach*. Washington: Springer, 1999. 172 p.
10. Патент RU2568335C1. Способ измерения дальности до объектов по их изображениям преимущественно в космосе / Смирнов А.И. Заявл. 22.05.2014; опублик. 20.11.2015, бюл. № 32. 10 с.
11. Andraši P., Radišić T., Muštra M., Ivošević J. Night-time Detection of UAVs using Thermal Infrared Camera // *Transportation Research Procedia*. Vol. 28. 2017. P. 183–190.
12. Kartashov V., Oleynikov V., Koryttsev I., Zubkov O., Babkin S., Sheiko S. Processing and Recognition of Small Unmanned Vehicles Sound Signals // *International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications – Science and Technology, PICS&T 2018 – Proceedings*. P. 392–396.
13. Oleynikov V.N., Zubkov O.V., Kartashov V.M., Koryttsev I.V., Babkin S.I., Sheiko S.A. Investigation of detection and recognition efficiency of small unmanned aerial vehicles on their acoustic radiation // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2019. Vol. 78 (9). P. 759–770.
14. Oleynikov V., Zubkov O., Kartashov V., Koryttsev I., Sheiko S., Babkin S. Experimental estimation of direction finding to unmanned air vehicles algorithms efficiency by their acoustic emission // *2019 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications – Science and Technology, PIC S&T 2019 – Proceedings*. P. 175–178.
15. Kartashov V.M., Oleynikov V.N, Sheyko S.A., Babkin S.I., Koryttsev I.V., Zubkov O.V., Anokhin M.A. Information characteristics of sound radiation of small unmanned aerial vehicles // *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77 (10). P. 915–924.
16. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Washington: Springer, 2011. 812 p.
17. Zaarane A., Slimani I., Al Okaishi W., Atouf I., Hamdoun A. Distance measurement system for autonomous vehicles using stereo camera // *Array*. 2020. Vol. 5. P. 100016–100023.
18. Kusworo A. Distance measurement with a stereo camera // *International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering*. 2017. Vol. 4 (11). P. 24–27.
19. Hou A.L., Cui X., Geng, Y., Yuan J., Hou J. Measurement of Safe Driving Distance based on Stereo Vision // *Sixth International Conference on Image and Graphics (ICIG)*. Hefei, Anhui, China. 2011. P. 902–907.
20. Tsai R.Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses // *IEEE Int. Journal on Robotics and Automation*. 1987. Vol. 3. P. 323–344.
21. Cipolla R., Drummond T., Robertson D. Camera calibration from vanishing points in images of architectural scenes // *BMVC*. September, 1999. P. 382–391.
22. Zhang Z. Flexible New Technique for Camera Calibration // *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000. Vol. 22 (11). P. 1330–1334.
23. Bouguet J.Y. *MATLAB calibration tool* // [http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib\\_doc](http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc).
24. Kartashov V., Oleynikov V., Zubkov O., Sheiko S. Optical detection of unmanned air vehicles on a video stream in a real-time // *The Fourth International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo'2019)*. Odessa, Ukraine. 9–13 September 2019. 4 p.

*Поступила в редколлегию 00.00.2020*

*Сведения об авторах:*

**Корытцев Игорь Васильевич** – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: [igor.koryttsev@nure.ua](mailto:igor.koryttsev@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1875-5534>

**Шейко Сергей Александрович** – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: [sergiy.sheiko@nure.ua](mailto:sergiy.sheiko@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1638-4478>

**Карташов Владимир Михайлович** – д-р техн. наук, профессор, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, заведующий кафедрой медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: [volodymyr.kartashov@nure.ua](mailto:volodymyr.kartashov@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8335-5373>

**Зубков Олег Викторович** – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, доцент кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: [Oleh.zubkov@nure.ua](mailto:Oleh.zubkov@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8528-6540>

**Олейников Владимир Николаевич** – канд. техн. наук, доцент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, профессор кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: [vladimir.oleinikov@nure.ua](mailto:vladimir.oleinikov@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7197-9760>

**Бабкин Станислав Иванович** – канд. техн. наук, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, старший научный сотрудник кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, e-mail: [prl.res@nure.ua](mailto:prl.res@nure.ua), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4903-3551>

**Селезнев Иван Сергеевич** – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, аспирант кафедры медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Украина, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0731-7540>