

**ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТРЕХМЕРНОЙ СТРУКТУРЫ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ МЕСТНОСТИ  
ПО ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ КАДРАМ ИЗ ВИДЕОПОТОКА  
ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АВТОНОМНОЙ ВОЗДУШНОЙ НАВИГАЦИИ**

**канд. техн. наук, доц. А. А. ШЕЙНИКОВ,  
Э. А. СМОЛЕНСКИЙ, Л. А. ИВАНИЦКИЙ  
(Военная академия Республики Беларусь, г. Минск)**

**Аннотация.** В статье рассматриваются: алгоритм восстановления высот точек сцены по последовательным кадрам (стереопарам), снятым в надир с беспилотного летательного аппарата; алгоритм поиска корреляции между эталонной и восстановленной (текущей) цифровой моделью местности; разработанное на основе предложенных алгоритмов, программное обеспечение для системы автономной воздушной навигации по трехмерной цифровой карте местности.

**Ключевые слова:** обработка цифровых изображений, стереопара, фотограмметрия, трехмерная реконструкция, корреляционно-экстремальная навигационная система на базе системы технического зрения.

Одним из перспективных способов автономной воздушной навигации беспилотных летательных аппаратов (БЛА) является применение корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС) на базе систем технического зрения (СТЗ). Проблемным вопросом здесь является автоматическая привязка БЛА к участку местности с известными координатами по видовой информации [1]. Для ее осуществления производится сопоставление результатов текущей съемки подстилающей земной поверхности с эталоном, в качестве которого все чаще используются цифровые трехмерные модели местности (ЦММ) [2, 3]. Трехмерная реконструкция текущей ЦММ выполняется путем сравнения координат проекций точек сцены на двух плоских цифровых изображениях, сделанных с определенной задержкой. Съемка осуществляется бортовой цифровой камерой (БЦК) БЛА (рисунок 1).

Для реконструкции трехмерной геометрии сцены по стереопаре обычно производится вычисление карты глубины и дальнейшее преобразование результатов расчета в восстановленную (текущую) ЦММ с использованием фотограмметрических методов. В рамках этой задачи были получены математические соотношения, разработаны алгоритм и программа пересчета относительных смещений подобных точек на двух кадрах стереопары в значения высот точек местности и обратно с учетом внутренних и внешних параметров БЦК и параметров полета носителя (рисунок 2).

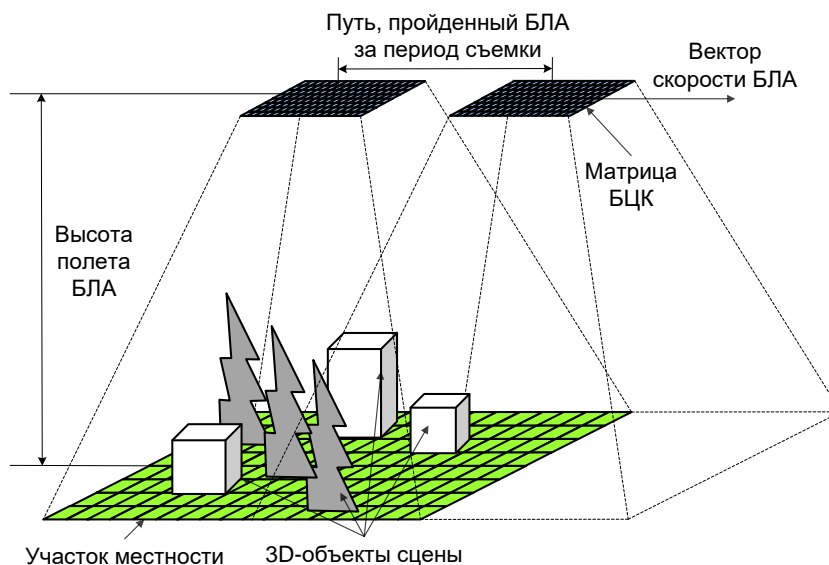


Рисунок 1. – Схема получения стереопары

<p><b>Введите:</b></p> <p>1. Дальность до объекта по горизонтали при первой съемке <math>l_1</math>, м <input type="text" value="15,25"/></p> <p>2. Размер матрицы камеры <math>2u</math>, мм <input type="text" value="5,7"/></p> <p>3. Фокусное расстояние камеры <math>f</math>, мм <input type="text" value="8"/></p> <p>4. Высота полета <math>H</math>, м <input type="text" value="70"/></p> <p>5. Скорость полета <math>v</math>, км/ч <input type="text" value="80"/></p> <p>6. Частота съемки <math>1/T</math>, к/с <input type="text" value="35"/></p> <p>7. Количество шагов между кадрами стереопары <math>n</math> <input type="text" value="1"/></p> <p>8. Размер пикселя <math>p</math>, мкм <input type="text" value="1,5"/></p> <p>9. Высота точки сцены <math>z</math>, м <input type="text" value="11"/></p> <p>10. Путь, пройденный БЛА за время съемки стереопары <math>S</math>, м <input type="text" value="0,634920634920635"/></p>	<p><b>Результаты расчета:</b></p> <p>1. Координаты проекции точки <math>a</math> на первом кадре <math>X_{a1}</math>, мм <input type="text" value="1,10714285714286"/></p> <p>2. Координаты проекции точки <math>b</math> на первом кадре <math>X_{b1}</math>, мм <input type="text" value="0,782203389830509"/></p> <p>3. Координаты проекции точки <math>a</math> на втором кадре <math>X_{a2}</math>, мм <input type="text" value="1,1797052154195"/></p> <p>4. Координаты проекции точки <math>b</math> на втором кадре <math>X_{b2}</math>, мм <input type="text" value="0,868294323379069"/></p> <p>5. Расстояние между точками <math>a</math> и <math>b</math> в первом кадре <math>k_1</math>, пкс <input type="text" value="217"/></p> <p>6. Расстояние между точками <math>a</math> и <math>b</math> во втором кадре <math>k_2</math>, пкс <input type="text" value="208"/></p>	<p>Относительное смещение точек <math>a</math> и <math>b</math> в стереопаре, пкс <input type="text" value="9"/></p> <p>Высота точки сцены <math>z</math>, м (обратный расчет) <input type="text" value="10,999999999999999"/></p> <p><input type="button" value="Расчет"/></p>
--	---	---

Рисунок 2. – Интерфейс программы пересчета относительных координат подобных точек стереопары в значения точек ЦММ и обратно

Для нахождения корреляции между текущей (ТМ) и эталонной (ЭМ) ЦММ использовался классический алгоритм для сопоставления цифровых изображений,

предполагающий вычисление функции взаимной корреляции (КФ) с последующим поиском ее максимума [4]:

$$F(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f_{ЭМ}(i, j) f_{ТМ}(i+x, j+y), \quad (1)$$

где  $x, y$  – смещение фрагмента  $f_{ЭМ}$  относительно  $f_{ТМ}$ ,  $0 \leq x \leq (K-N)$ ,  $0 \leq y \leq (L-M)$ ,  $K \times L$  – размер ТМ,  $N \times M$  – размер ЭМ.

В [4] показано, что устойчивость алгоритмов поиска глобального экстремума (ГЭ) КФ во многом зависит от степени геометрических искажений текущего изображения (ТМ). Для снижения этих искажений, перед сопоставлением с ЭМ, целесообразно осуществлять ее дополнительную обработку, включающую аффинные (сдвиг, поворот, изменение масштаба) преобразования с учетом данныхчисления пилотажно-навигационных параметров полета (ПНПП) в навигационном комплексе (НК) БЛА. Так, например, поворот ЭМ вокруг центра с координатами  $(x_r, y_r)$  на угол  $\theta$  можно осуществить с использованием выражений [4]:

$$\begin{aligned} m' &= x_r + (m - x_r) \cos \theta - (n - y_r) \sin \theta; \\ n' &= y_r + (m - x_r) \sin \theta - (n - y_r) \cos \theta, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $m, n$  – координаты отдельной точки исходной ТМ в системе координат, связанной с ЭМ;  $m', n'$  – координаты отдельной точки повернутой ТМ.

На рисунке 3 в качестве примера показан кадр из стереопары и, полученные в результате программной обработки стереопары, ЦММ в виде карты глубины и в виде, восстановленной из карты глубины, трехмерной структуры сцены.

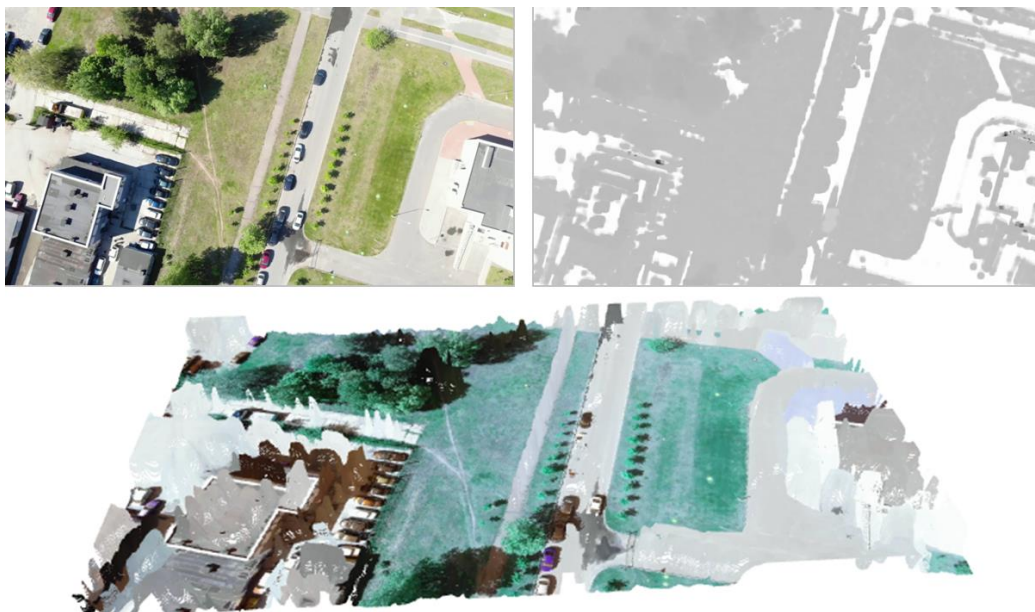


Рисунок 3. – Преобразование стереопары в карту глубины и в 3D-структуру сцены

На рисунке 4 приведен исправленный элемент ЭМ (повернутый на угол  $\theta$ ), обработанный кадр ТМ (с выделением совпадающего участка трехмерной модели и оценкой степени совпадения) и вид функции взаимной корреляции.

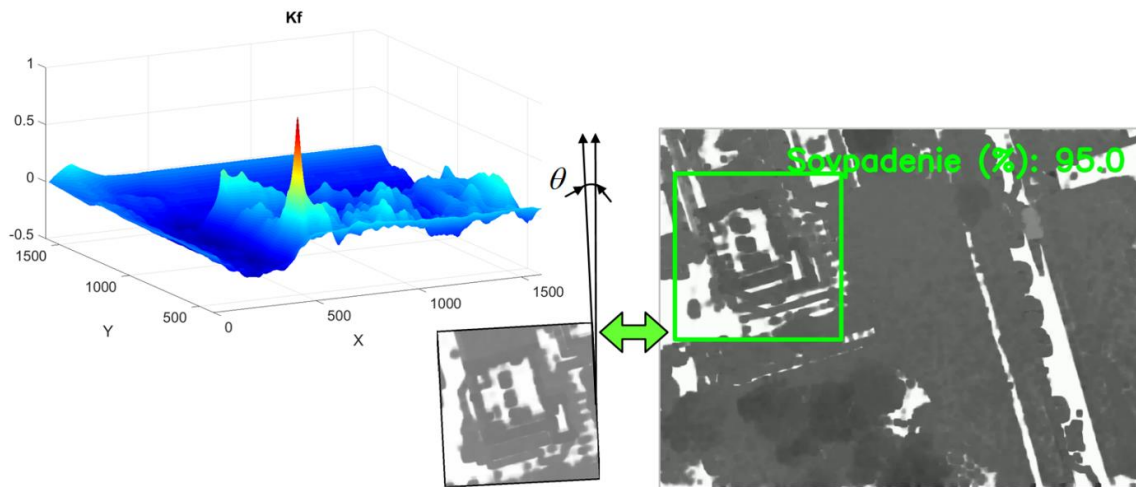


Рисунок 4. – Обработанная ТМ, исправленная ЭМ и вид функции взаимной корреляции

Для обработки видеопотока на основе алгоритмов машинного зрения и рассмотренных математических соотношений была разработана программа, адаптированная под одноплатный компьютер Raspberry Pi 4. Последний широко применяется в качестве бортового вычислителя, в том числе для решения задач навигации и наведения БЛА по видеопотоку. На рисунке 5 изображена функциональная схема разработанной программы.

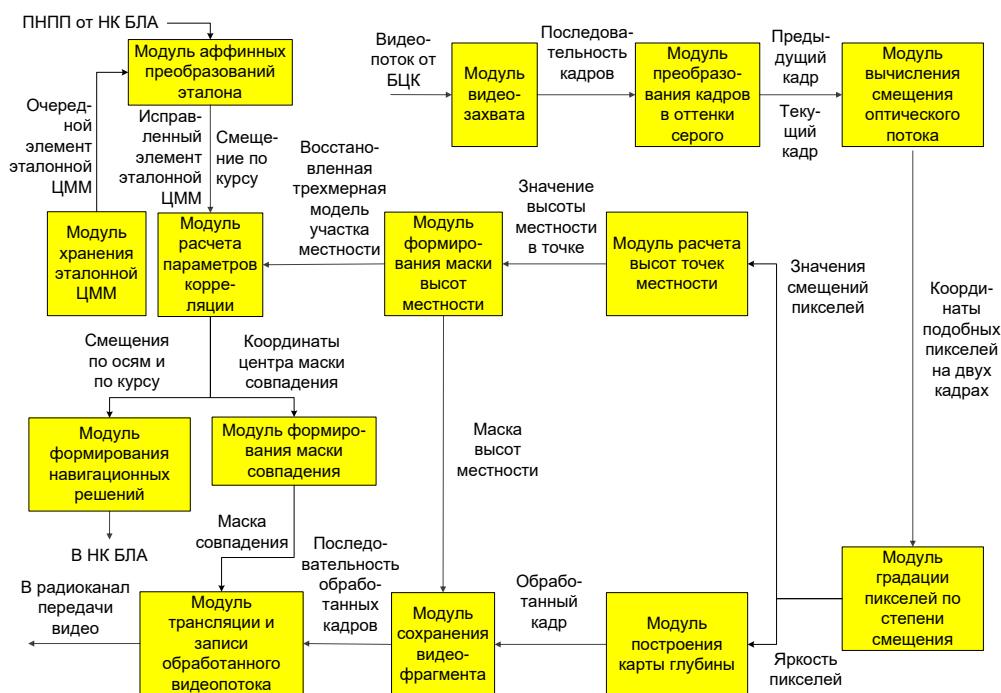


Рисунок 5. – Функциональная схема программы для КЭНС на базе СТЗ для БЛА

Применение разработанного программного обеспечения в бортовой КЭНС обеспечит возможность реализации режима автономной воздушной навигации БЛА по данным геоинформационных систем в условиях плохого приема или подавления спутниковых сигналов позиционирования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко, А.М. Коррекция ошибок бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата с использованием наземных навигационных ориентиров / А.М. Коваленко, А.А. Шейников // ГУ НИИ ВС РБ «Наука и военная безопасность». – 2020. – № 2(64). – С. 16–22.
2. Латкин, В.А. Трехмерное картографирование местности / В.А. Латкин // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 2. – С. 133–146.
3. Тужилкин, А.Ю. Распознавание и реконструкция 3D-объектов по спутниковым изображениям на основе сравнения спектров графов / А.Ю. Тужилкин // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2. – С. 3727–3732.
4. Костяшкин, Л.Н. Совмещение изображений в корреляционно-экстремальных навигационных системах / Л.Н. Костяшкин, М.Б. Никифоров. – М.: Радиотехника, 2015. – 208 с.