

УДК. 681.5.08

Сравнительный анализ пассивных методов измерения дальности для малого беспилотного летательного аппарата

Бурага А.В., Костюков В.М.

Аннотация

В статье проведено сравнение двух современных методов пассивной оптической локации, применимых к задаче измерения дальности до наблюдаемого объекта. Описаны основные этапы их работы и особенности реализации. Проведено численное моделирование рассмотренных методов пассивной оценки дальности для монокулярных оптико-электронных систем.

Ключевые слова

беспилотный летательный аппарат; пассивные методы оценки дальности; метод триангуляции; учет параметров движения

Введение

Современные беспилотные летательные аппараты являются сложным техническим комплексом, позволяющим решать широкий круг задач. Развитие беспилотных летательных аппаратов идет в сторону увеличения автономности, расширения функциональности и совершенствования информационно-измерительных систем, входящих в их состав.

Решение навигационной задачи БПЛА обеспечивается при помощи следующих систем:

- инерциальная бесплатформенная навигационная система, интегрированная с приемником спутниковой навигационной системы;
- система воздушных сигналов;
- радиовысотомер;
- бортовая цифровая вычислительная машина;

В состав целевой нагрузки практически любого БПЛА входит оптико-электронная система, позволяющая получать изображение наблюдаемой сцены.

Ряд задач, которые ставятся перед современными БПЛА, такие как: построение цифровой карты местности, слежение за подвижными объектами, предупреждение столкновения с препятствиями, – предполагают наличие информации о дальности до наблюдаемых объектов.

На сегодняшний день основными средствами, предоставляющими информацию о дальности до наблюдаемого объекта, являются системы активной локации (в частности, радиолокационные системы и системы лазерной локации). Использование активных локационных систем на платформах воздушного базирования, таких как малые беспилотные летательные аппараты, невозможно в связи с их массогабаритными размерами и высоким энергопотреблением.

Применение современных методов пассивной оптической локации позволяют реализовать возможность измерения дальности до наблюдаемой точки путем компьютерной обработки изображений, полученных с оптоэлектронной системы (ОЭС). Данная возможность позволяет расширить функционал БПЛА практически без изменения его конструкции и модифицирования приборного комплекса [1].

Далее в работе рассмотрены 2 метода пассивной оптической локации как задачи косвенной оценки дальности до наблюдаемого объекта при известном пространственном положении и углах ориентации камеры ОЭС:

- метод триангуляции, сводящегося к геометрической задаче поиска координат точки, заданной как пересечение двух линий в трехмерном пространстве;
- метод, учитывающий модель шума, параметры движения БПЛА и статистические свойства оценок по положению и углам ориентации.

Постановка задачи

Сопоставляя геометрию внешней обстановки и её изображение на фотоприемной матрице в соответствии с [2], проекция точки на плоскость изображения зависит от внешних и внутренних параметров ОЭС. Внешние параметры ОЭС учитывают положение и ориентацию камеры в некоторой неподвижной системе координат. Внутренние параметры учитывают параметры оптической системы (фокусное расстояние, физический размер элемента фотоприемной матрицы, смещение главной точки ОЭС) (рис. 1).

В предположении установки жестко закрепленной на летательном аппарате (ЛА) оптико-электронной системы, недалеко от центра масс летательного аппарата, оптическая ось которой сонаправлена с продольной осью симметрии летательного аппарата, введем следующие системы координат:

- $Nx^N y^N z^N$ – неподвижная система координат, связанная с взлетно-посадочной полосой, где N – точка пуска БПЛА, Nz^N – направлена по направлению взлета, Ny^N – направлена по местной вертикали, Nx^N – достраивает систему до правой тройки векторов.

- $Cx^C y^C z^C$ – система координат, связанная с оптико-электронной системой (ОЭС). Направление оси Cz^C совпадает с положительным направлением продольной оси симметрии летательного аппарата; ось Cy^C противоположна нормальной оси симметрии летательного аппарата, ось Cx^C достраивает систему до правой тройки векторов. C – оптический центр (точка пересечения всех лучей) оптической системы.

- $Ox^I y^I$ – система координат фотоприемной матрицы. O – принципиальная точка (проекция оптической оси на плоскость фотоприемной матрицы);

- uv – система координат дискретизированного изображения .

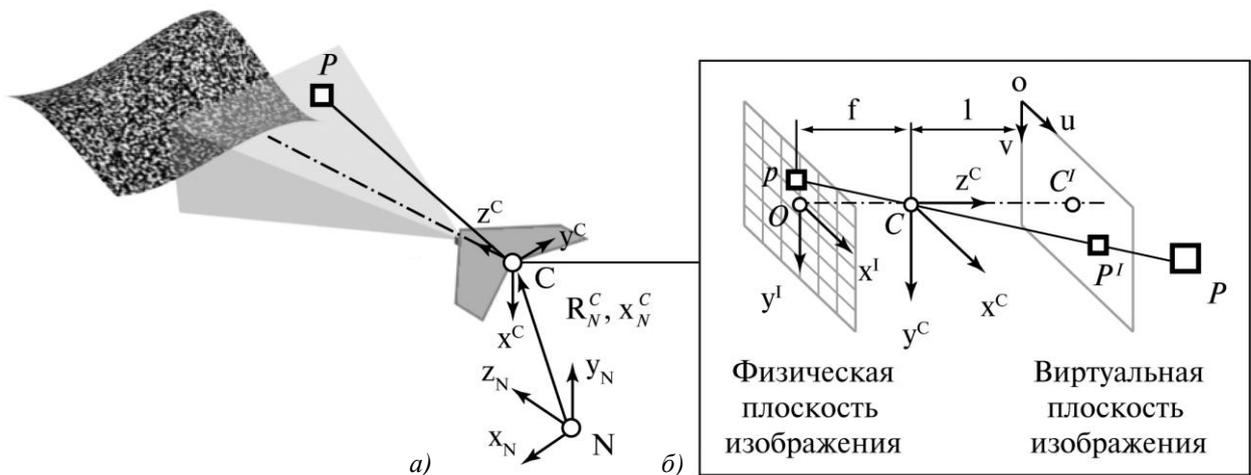


Рис. 1. К постановке задачи: *a* – внешние параметры ОЭС, *б* – внутренние параметры ОЭС

Пусть некоторая точка рельефа поверхности P имеет координаты, задаваемые вектором $\mathbf{x}_P^N = [X_P, Y_P, Z_P]$ в неподвижной системе координат. Предполагая, что расстояние между центром масс БПЛА и оптическим центром камеры C мало, определим координаты точки $\mathbf{x}_P^C = [X_P^C, Y_P^C, Z_P^C]$ наблюдаемой точки P в системе координат камеры:

$$\mathbf{x}_P^C = \mathbf{R}_N^C (\mathbf{x}_P^N - \mathbf{x}_C^N), \quad (1)$$

где \mathbf{R}_N^C – матрица поворота, обеспечивающая переход от системы координат ОЭС в систему координат взлетно-посадочной полосы [2]:

$$\mathbf{R}_N^C = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & \cos \vartheta \sin \psi & -\sin \vartheta \\ \sin \gamma \sin \vartheta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \sin \gamma \sin \vartheta \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi & \cos \vartheta \sin \gamma \\ \cos \gamma \sin \vartheta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi & \cos \gamma \sin \vartheta \sin \psi - \sin \gamma \cos \psi & \cos \vartheta \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где γ – угол крена, ϑ – угол тангажа, ψ – угол рыскания летательного аппарата.

Обратное преобразование (переход от системы координат, связанной с БПЛА к неподвижной системе координат осуществляется как):

$$\mathbf{R}_N^C = (\mathbf{R}_C^N)^T = \begin{bmatrix} \cos \vartheta \cos \psi & \sin \gamma \sin \vartheta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \gamma \sin \vartheta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \vartheta \sin \psi & \sin \gamma \sin \vartheta \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi & \cos \gamma \sin \vartheta \sin \psi - \sin \gamma \cos \psi \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta \sin \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Составляющие вектора \mathbf{x}_P^C будут связаны с пиксельными координатами на плоскости изображения (u_p, v_p) как:

$$u_p = -\frac{f}{d_x} \frac{X_P^C}{Z_P^C} + u_c, \quad v_p = -\frac{f}{d_y} \frac{Y_P^C}{Z_P^C} + v_c, \quad (4)$$

что можно записать в матричной форме:

$$\lambda \begin{pmatrix} u_p \\ v_p \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{f}{d_x} & 0 & u_c \\ 0 & -\frac{f}{d_y} & v_c \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_P^C \\ Y_P^C \\ Z_P^C \end{pmatrix} = \mathbf{K} \mathbf{x}_C^P, \quad (5)$$

где f – фокусное расстояние ОЭС,

d_x, d_y – физические размеры пикселя фотоприемной матрицы;

u_c, v_c – координаты главной точки в системе координат изображения;

\mathbf{K} – матрица «внутренних параметров» ОЭС (калибровочная матрица);

λ – масштабный коэффициент.

Дальность до наблюдаемой точки определяется как:

$$d = \sqrt{(X_P^N - X_C^N)^2 + (Y_P^N - Y_C^N)^2 + (Z_P^N - Z_C^N)^2}, \quad (6)$$

где (X_p^N, Y_p^N, Z_p^N) – координаты наблюдаемой точки P в неподвижной системе координат, (X_c^N, Y_c^N, Z_c^N) – координаты оптического центра C в неподвижной системе координат.

Метод оценки дальности, основанный на триангуляции

Пусть в соответствии с рис. 2. направляющие вектора системы координат, связанной с камерой в начальный момент времени будет принята в качестве основной системы отсчета. За некоторое время (между получением изображений) камера изменяет свое положение и углы ориентации, т.е. происходит перемещение оптического центра камеры на вектор $\mathbf{t}_{C_1}^{C_2}$ и поворот вокруг оптического центра, который может быть описан через матрицу $\mathbf{R}_{C_1}^{C_2}$. Пусть пара $\{\mathbf{t}_{C_1}^{C_2}, \mathbf{R}_{C_1}^{C_2}\}$, включающая в себя вектор перемещения и матрицу поворота, называется параметрами движения камеры.

Пусть (u, v) – координаты проекции характерной точки на виртуальной плоскости изображения в момент времени $t_0 = 0$ и (u', v') – проекция наблюдаемой характерной точки на плоскость изображения камеры в момент времени $t_1 = t_0 + \Delta$. Используем следующее представление проекции характерных точек:

$$p = \begin{pmatrix} u/f \\ v/f \\ 1 \end{pmatrix} \quad \text{и} \quad p' = \begin{pmatrix} u'/f \\ v'/f \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Как показано на рис. 2, вектора p , $\mathbf{R}_{C_1}^{C_2} p'$ и $\mathbf{t}_{C_1}^{C_2}$ лежат в одной плоскости, и удовлетворяют следующему соотношению:

$$(p')^T \mathbf{t}_{C_1 \times}^{C_2} \mathbf{R}_{C_1}^{C_2} p = 0, \quad (8)$$

которое в соответствии с [3] принято называть *эпиполярным ограничением*, произведение $\mathbf{E} = \mathbf{t}_{C_1 \times}^{C_2} \mathbf{R}_{C_1}^{C_2}$ называется *существенной матрицей*, где $\mathbf{t}_{C_1 \times}^{C_2}$ – кососимметричная матрица (ротатор), образованная вектором, задающим перемещение от C_1 к C_2 .

В соответствии с принципами эпиполярной геометрии, точка на первом изображении может быть спроецирована в прямую на втором, при этом уравнения линий имеют вид $\mathbf{E}p'$ и $p^T \mathbf{E}$ соответственно, что позволяет существенно сократить область поиска соответствующей точки при известном относительном положении камеры в момент между съемками.

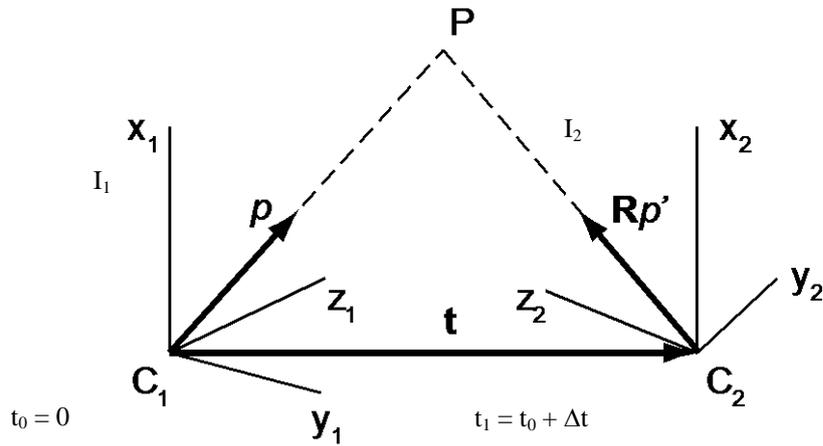


Рис. 2. Геометрическая интерпретация метода триангуляции.

Относительное перемещение центра проекции и изменение ориентации системы координат ОЭС относительно неподвижной системы координат за промежуток времени Δt может быть получено на основании анализа данных, поступающих с комплексной навигационной системы (КНС) БПЛА.

Определим координаты наблюдаемой в пространстве точки P как

$$P = Zp', \quad (9)$$

где Z – расстояние от плоскости изображения I_1 ($x_1 C_1 y_1$) до точки P в системе координат камеры. В соответствии с рис. 2 расстояние может быть вычислено как:

$$Z = \frac{(\mathbf{t}_{C1}^{C2} \times \mathbf{R}p') \cdot (p \times \mathbf{R}p')}{\|p \times \mathbf{R}p'\|^2}, \quad \text{где} \quad (10)$$

\mathbf{t}_{C1}^{C2} – вектор перемещения оптического центра ОЭС;

\mathbf{R}_{C1}^{C2} – матрица поворота, описывающая переход из системы координат $C_1 x_1 y_1 z_1$ в $C_2 x_2 y_2 z_2$;

p и p' – координаты проекции наблюдаемой точки на плоскость виртуального изображения в момент времени t_1 и t_2 соответственно.

Откуда видно, что для трехмерного восстановления сцены методом триангуляции должны выполняться два условия:

1. $\|\mathbf{t}_{C1}^{C2}\| > 0$, т.е. при отсутствии перемещения оптического центра ОЭС, треугольник $C_1 P C_2$ вырождается в отрезок $C_1 P$, что приводит к невозможности решения уравнения (6).

2. $\|p \times \mathbf{R}p\| \neq 0$, т.е. координаты проекций наблюдаемой точки при сонаправленности оптических осей ОЭС в моменты времени t_0 и t_1 не должны совпадать (например, точка P не должна быть бесконечно удалена от C_1 либо лежать на прямой, образованной вектором $\mathbf{t}_{C1[x]}^{C2}$).

Алгоритм триангуляции состоит из следующих шагов:

1. Определение относительного перемещения камеры за время $(t_1 - t_0)$ между получением двух последовательных изображений: $\mathbf{t}_{C1[x]}^{C2} \mathbf{R}_{C1}^{C2}$
2. Оценка расстояния Z , используемого в качестве масштабного коэффициента выполняется в соответствии с уравнением (10).
3. Восстановление пространственного положения наблюдаемой точки путем умножения координат проекции наблюдаемой точки в виртуальной плоскости изображения на оценку дальности в соответствии с уравнением (9).

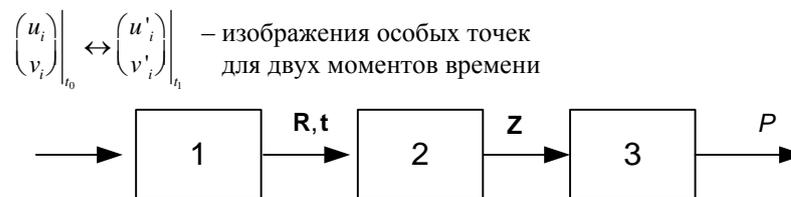


Рис 3. Оценка дальности до точки на основании метода триангуляции:

- 1 – оценка относительного перемещения ОЭС в момент времени от $t_1 - t_0$;
- 2 – оценка дальности до наблюдаемой точки
- 3 – восстановление координат наблюдаемой точки в пространстве

Метод оценки дальности при учете параметров движения летательного аппарата и шума модели измерения

При известной модели движения летательного аппарата (которая может быть аппроксимирована кинематическим уравнением движения) и модели измерения необходимо учитывать статистические свойства шумов и их влияние на точность оценки дальности. Для получения качественной оценки дальности до наблюдаемых точек в работе использован расширенный фильтр Калмана [4].

Алгоритм оценки дальности до наблюдаемой точки представлен на рис. 4.

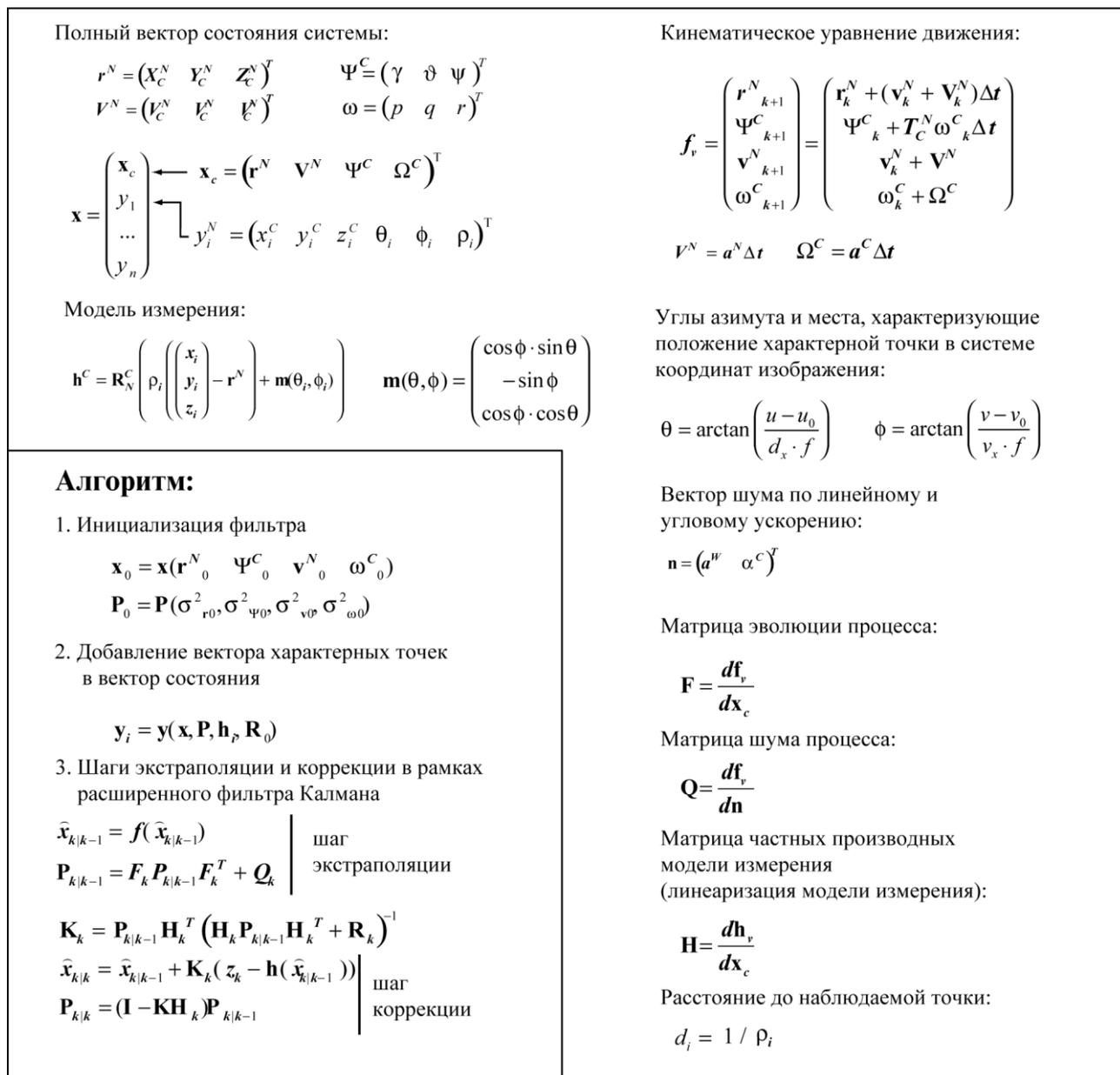


Рис 4. Схема оценки дальности до наблюдаемых точек сцены при учете шумов кинематической модели движения и модели измерения.

$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ – апостериорная оценка вектора состояния в момент k по результатам наблюдений вплоть до момента k-1; $\mathbf{P}_{k|k-1}$ – апостериорная ковариационная матрица ошибок; z_k – вектор измерения; σ_x^2 – априорное значение дисперсии шума измеряемой величины. \mathbf{R}_0 – ковариационная матрица шума измерения, \mathbf{T}_C^N – матрица перехода от связанной с камерой системой координат к неподвижной системе координат для вектора угловой скорости.

Выделение характерных точек изображения

Из рассмотренных алгоритмов (рис. 3 и 4), видно, что их работа предполагает выделение характерных точек и их сопоставление на последовательности изображений наблюдаемой сцены.

Под детектором понимается функция, способная выделять характерные точки изображения. Для двумерного полутонового изображения как функции яркости от пространственных координат, признаком наличия характерных точек является локальный максимум контрастности, который может быть получен путем численного дифференцирования.

В работе в качестве детектора применяется [5] детектор углов Харриса, анализирующий яркостную компоненту в окрестности каждой точки изображения путем анализа градиента яркости \mathbf{D} :

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial I}{\partial u}\right)^2 & \left(\frac{\partial I}{\partial v}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial u}\right) \\ \left(\frac{\partial I}{\partial u}\right)\left(\frac{\partial I}{\partial v}\right) & \left(\frac{\partial I}{\partial v}\right)^2 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где $I(u, v)$ – яркость изображения в точке (u, v) .

Если оба собственных значения матрицы \mathbf{D} достаточно велики, изменение в яркости в окрестности (u, v) тоже велико, что соответствует наличию угла в данной точке изображения. Отклик (значение детектора) угла может быть записан в виде:

$$\mathbf{Har} = \det \mathbf{D} - k(\text{tr}(\mathbf{D}))^2 \quad (12)$$

$\text{tr}(\mathbf{D})$ – сумма элементов главной диагонали матрицы \mathbf{D} ;

k – коэффициент чувствительности (в работах Харриса $k = 0.04$)

Сопоставление характерных точек

При наличии двух полутоновых изображений I_1 и I_2 , на которых присутствует проекции p_1 и p_2 наблюдаемой точки сцены P . Необходимо вычислить координату точки p_2 в системе координат изображения I_2 , которая с наибольшей вероятностью является проекцией точки P на изображение I_2 .

Предполагая, что время между получением изображения I_1 и I_2 мало, яркостные изменения изображения в окрестности точки p_1 незначительны и смещение точки p_2 относительно p_1 в системе координат I_2 невелико, в качестве меры близости по яркости выберем нормированный коэффициент кросс-корреляции [3]:

$$k(f, g) = \frac{\sum_{(u,v) \in X} (f(u, v) - f^0)(g(u, v) - g^0)}{\sqrt{\sum_{(u,v) \in X} (f(u, v) - f^0)^2} \cdot \sqrt{\sum_{(u,v) \in X} (g(u, v) - g^0)^2}}, \quad (13)$$

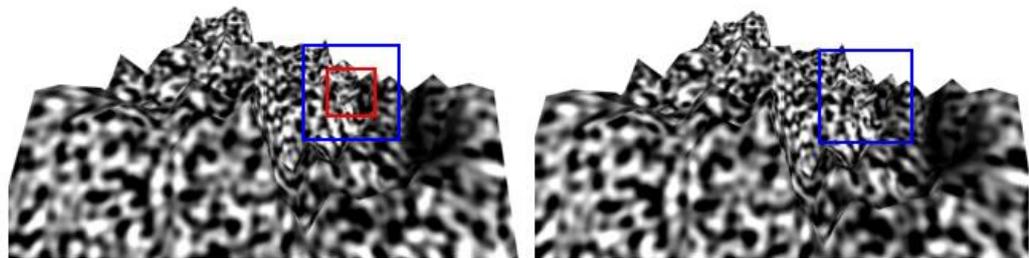
где $f(u, v)$ – окрестность точки p_1 в системе координат изображения I_1 ; $g(u, v)$ – исследуемая область в системе координат изображения I_2 ;
 X – область поиска (размер шаблона),
 f^0 и g^0 – средние значения яркости по области X для $f(u, v)$ и $g(u, v)$ соответственно.

При неизменном шаблоне $f(u, v)$ для двумерного полутонового дискретного изображения наиболее вероятными координатами нахождения точки p_2 будут

$$(u_{p_2}, v_{p_2}) = \arg \max_i (k(f, g_i)), \quad (14)$$

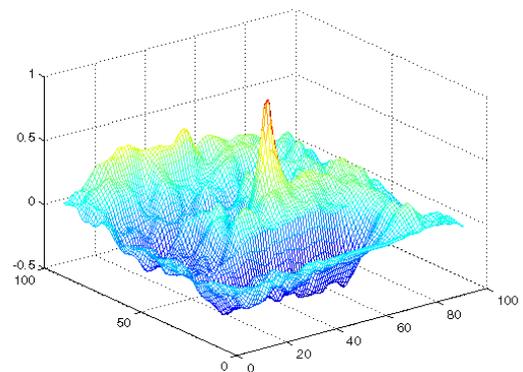
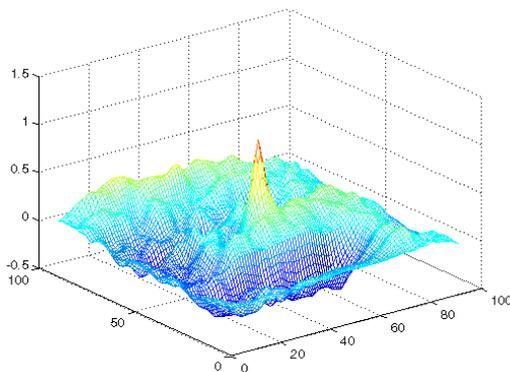
т.е. точка изображения I_2 с максимальным нормированным коэффициентом кросс-корреляции. Для увеличения устойчивости работы алгоритма сопоставления точек, целесообразно проверять достоверность детектирования сравнением с пороговым значением коэффициента кросс-корреляции. Т.е. если $k(f, g_i) \geq k_{\min}$ обнаружение признается достоверным.

Результат процедуры кросс-корреляции и поиска координат наиболее вероятного положения точки p_2 показан на рис. 5.



Слева: изображение в момент времени t_1 (внешняя рамка – область поиска, внутренняя – шаблон); справа – изображение в момент времени t_2 (рамка – область поиска)

Красная рамка – эталонный фрагмент изображения («шаблон»), синяя – область поиска.



Слева: значение коэффициента корреляции по области поиска на исходном изображении ($k_{\max} = 1$ ($x = 46, y = 46$)). Справа: значение коэффициента корреляции по области поиска ($k_{\max} = 0,9328$ ($x = 46, y = 48$)).

Рис. 5. Сопоставление характерных точек на двух изображениях по методу кросс-корреляции.

Проведение численного моделирования

Для оценки эффективности предлагаемых алгоритмов проведено численное моделирование процесса оценки дальности до наблюдаемых характерных точек сцены по курсу движения при равномерном прямолинейном движении БПЛА.

В процессе моделирования использовались следующие параметры ОЭС:

- физический размер пикселя модели фотоприемной матрицы: 8,6 мкм;
- разрешение фотоприемной матрицы: 320 x 240;
- координаты принципиальной точки: $S_x = 160,0$, $S_y = 120,0$;
- коррекция дисторсии оптической системы не производится [7];
- частота кадров: 30 к/с.
- фокусное расстояние: 15 мм (поле зрения – 45°).

Движение камеры – равномерное, прямолинейное, вектор полной скорости совпадает по направлению с линией визирования ОЭС. Скорость движения – 30 м/с. Время проведения эксперимента – 5 с.

В связи с тем, что для построения относительной карты дальности необходимы данные лишь об относительном изменении положения центра масс и ориентации модели летательного аппарата между двумя полученными кадрами было проведено моделирование влияния шума датчиков угловой скорости на счисление углов ориентации летательного аппарата.

Современные микромеханические датчики угловой скорости, входящие в состав системы определения ориентации БПЛА, позволяют обеспечить стабильность смещения нуля порядка 0,001 °/с, величину случайного дрейфа в пределах 0,15 °/√ч при малой чувствительности к внешним ускорениям.

Использована модель счисления углов ориентации с моделью шума, характерной для современных предварительно откалиброванных микромеханических гироскопов [8] (постоянная компонента смещение нуля не более 0,05 °/с, случайная составляющая дрейфа не более 0,01 °/с) при неизменной температуре проведения эксперимента и компенсации вибраций. На рис. 6 представлены результаты моделирования для наихудшего случая серии из 50 проведенных численных экспериментов. Как видно, погрешность по углам за 1,7 с (50 кадров) не превышает 0,2 градуса, что при указанных параметрах разрешения фотоприемной матрицы и поля зрения оптической системы соответствует порядку 1 пикселя.

Таким образом, влияние погрешности датчиков угловой скорости и счисления углов ориентации БПЛА оказывает незначительное влияние на оценку дальности. В рамках численного эксперимента особое внимание было уделено моделированию погрешности сопоставления проекции характерных точек для пары изображений.

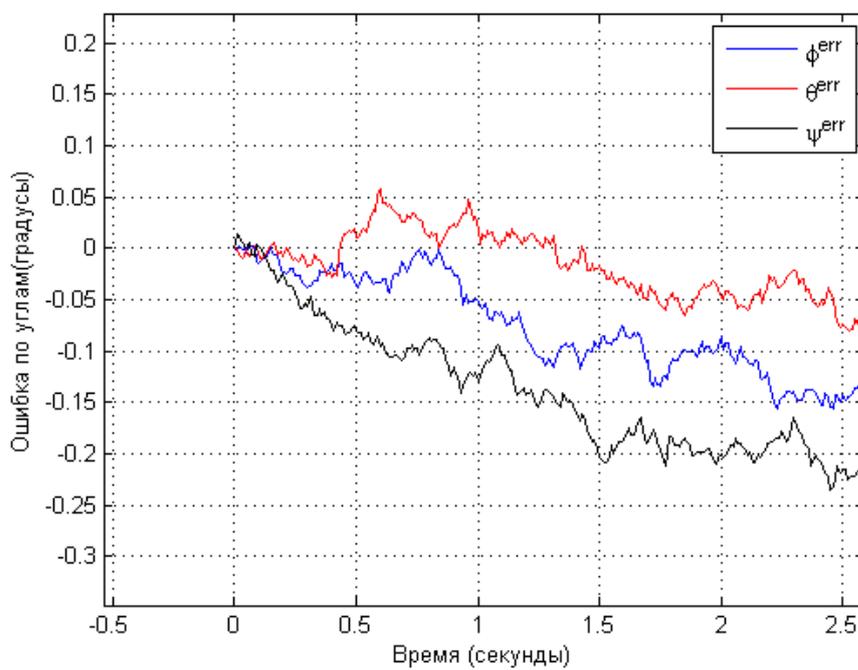


Рис 6. Ошибка счисления углов БИНС в зависимости от времени

Для сравнения описанных ранее методов была использована модель фоно-целевой обстановки, представляющая собой набор контрастных точек в пространстве.

В рамках численного эксперимента использовалась перспективная модель камеры.

При исходных заданных координатах точек и траектории движения летательного аппарата было произведено моделирование в соответствии с описанными ранее методами оценки дальности до наблюдаемой точки.

На первом этапе моделировалось поступательное движение летательного аппарата. В соответствии с моделью камеры рассчитывались координаты проекций характерных точек на плоскость получаемого ОЭС изображения. Проводилась оценка точности по среднему и максимальному отклонению рассчитанных координат наблюдаемой точки от исходно заданной.

На втором этапе в координаты проекции наблюдаемых точек вносилась ошибка, моделирующая погрешность их сопоставления, а также влияния погрешностей измерительных систем в определении ориентации и положения центра масс модели

летательного аппарата. Ошибка представляет аддитивную погрешность, величина которой подчиняется нормальному закону распределения с нулевым матожиданием и дисперсией 2 и 4 пикселя.

На рис. 7 представлена геометрическая конфигурация наблюдаемых характерных точек сцены и траектория движения модели летательного аппарата в рамках эксперимента. Истинные координаты точек в неподвижной системе координат: $P_1 (-75, 0, 300)$, $P_2 (-45, 0, 300)$, $P_3 (-15, 0, 300)$; $P_4 (15, 0, 300)$; $P_5 (45, 0, 300)$; $P_6 (75, 0, 300)$.

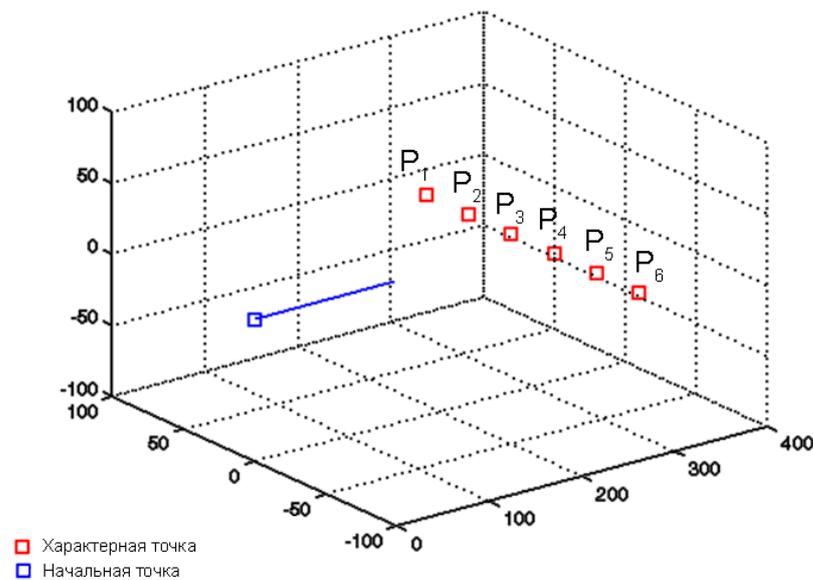


Рис 7. Схема эксперимента

В соответствии со схемой эксперимента (рис. 7) и алгоритмами (рис. 3, 4), на каждом шаге моделирования оценивались пространственные координаты наблюдаемых точек. Сводной характеристикой, позволяющей оценить качество работы исследуемых алгоритмов, является усредненная абсолютная погрешность оценки по дальности:

$$dr_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \sqrt{(X_c - X_i)^2 + (Y_c - Y_i)^2 + (Z_c - Z_i)^2} - \sqrt{(X_c - \hat{X}_i)^2 + (Y_c - \hat{Y}_i)^2 + (Z_c - \hat{Z}_i)^2} \right|}{n}, \quad (15)$$

где (X_c, Y_c, Z_c) – координаты оптического центра камеры;

(X_i, Y_i, Z_i) – действительные координаты i -той наблюдаемой характерной точки сцены;

$(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i, \tilde{Z}_i)$ – оценка координат i -той наблюдаемой характерной точки сцены;

n – общее количество наблюдаемых точек.

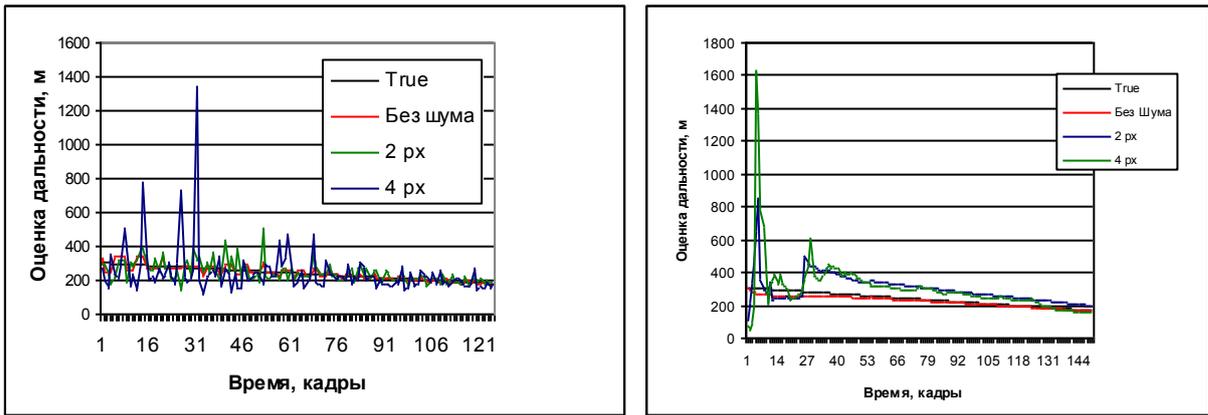


Рис. 8. Оценка дальности без учета параметров движения БПЛА (слева) и с ее учетом (справа) на примере оценки расстояния до характерной точки P_2 .

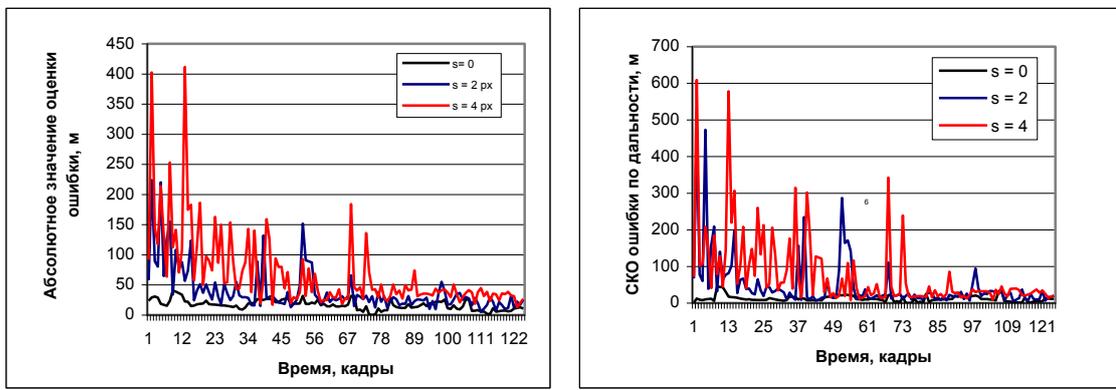


Рис 9. Среднее значение и среднее квадратичное отклонение ошибки при использовании прямого геометрического метода оценки дальности

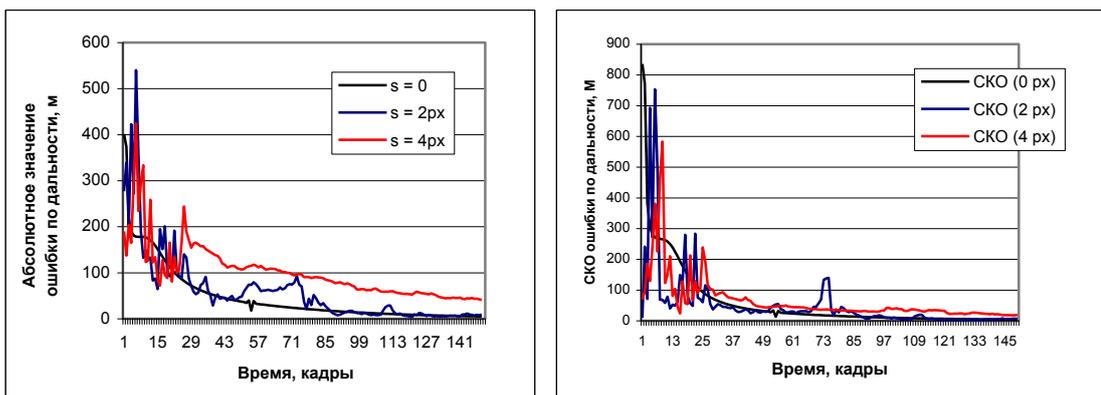


Рис 10. Среднее значение и среднее квадратичное отклонение ошибки при использовании метода, учитывающего параметры движения и шум измерения

На рис. 8-10 представлен результат серии тестовых испытаний метода оценки дальности без учета параметров движения БПЛА и с её учетом.

Ошибка оценки по дальности прямого геометрического метода восстановления сцены в рамках эксперимента оставалась околопостоянной и зависела лишь от шума координат проекции наблюдаемой характерной точки сцены, составляя 68, 40 и 18 м для дисперсии шума 4 пикселя, 2 пикселя и без шума соответственно.

Геометрический подход характеризуется отсутствием зависимости погрешности оценки дальности от времени и зависимостью данной оценки лишь от дальности до наблюдаемых точек и статистических параметров модели шума модели измерения.

Метод, учитывающий параметры движения и модель шума, может быть охарактеризован большей начальной ошибкой в оценке по дальности, что связано с ошибкой в начальной оценке по дальности. Как видно из рис. 9 при отсутствии шума в сопоставлении проекций характерных точек сцены, оценка по дальности алгоритма достаточно быстро (менее, чем за 15 кадров, что соответствует 0,5 с) сходится к действительному пространственному положению точки (конечная средняя ошибка в оценке дальности составляет менее, чем 5 м).

Введение шума (с нормальным математическим ожиданием и дисперсией 2 и 4 пикселя соответственно) приводит к увеличению начальной ошибки в оценке дальности до наблюдаемой характерной точки сцены и времени схождения оценки до действительного значения. Конечная ошибка (на момент времени, соответствующему 150 кадру) в оценке дальности до наблюдаемой точки составляет 10 и 25 м (для дисперсии 2 и 4 пикселя соответственно).

Подход, учитывающий параметры движения БПЛА и модель шума, характеризуется большей средней ошибкой в оценке дальности до наблюдаемых точек в начальный момент времени наблюдения, однако после нескольких итераций (30–90 для наблюдаемого эксперимента) позволяет добиться меньшей погрешности в оценке дальности наблюдаемых характерных точек сцены.

Перспективной возможностью является объединение метода оценки дальности с учетом шумовых характеристик модели движения и измерения как имеющего меньшую ошибку в оценке дальности и прямого геометрического восстановления, как менее требовательного к вычислительным ресурсам. Данный подход позволит построить карту относительных дальностей с хорошим разрешением по углу места и азимуту в системе координат камеры (что связано с вычислительной эффективностью геометрического метода оценки дальности) при хорошей устойчивости к шуму и высокой точности оценок по дальности вероятностного метода.

Моделирование выполнялось в среде MATLAB на компьютере с процессором Intel^R CoreTM 2 Quad с тактовой частотой 2,66 ГГц и 2 ГБ ОЗУ. Среднее время обнаружения характерных точек – 0.2 мс, извлечения их дескрипторов и сравнения – 0,531 мс, триангуляции одной характерной точки – < 0.1 мс, одной итерации работы расширенного фильтра Калмана (для 6 точек) – 3.1 мс. Следует заметить, что вычислительные затраты на обнаружение характерных точек при неизменном размере кадра остаются неизменными, вычислительные затраты на сопоставление и триангуляцию растут линейно от числа наблюдаемых точек, потребные вычислительные затраты на реализацию фильтра Калмана растут квадратично в зависимости от количества наблюдаемых точек.

Заключение

В работе исследованы особенности реализации геометрического и вероятностного метода оценки дальности до наблюдаемых неподвижных точек сцены.

В рамках проведения численного эксперимента было оценено влияние погрешности определения координат точки в системе координат изображения на оценку расстояния до наблюдаемого объекта.

Численное моделирование подтверждает возможность использования геометрического и вероятностного метода оценки расстояния до наблюдаемой точки на подвижных платформах, таких как беспилотные летательные аппараты, при этом средняя ошибка для типовых режимов полета не превышает 10% от дальности до наблюдаемой точки.

На основе анализа результатов численного моделирования авторы пришли к выводу о потенциальной эффективности комбинированного метода, основным способом получения оценки по дальности для которого является геометрическая триангуляция (как значительно менее требовательная к вычислительным затратам БЦВМ). Результат работы алгоритма триангуляции может быть скорректирован на основании оценок, полученных методом, учитывающим динамику движения БПЛА.

Список используемой литературы

- [1] *Лунев Е.М., Павлова Н.В.* Программно-алгоритмическое обеспечение для определения навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения // Вестник МАИ. – 2009. – т. 16, №6. – с. 111–119.

- [2] Красильщиков М.Н., Серебряков Г.Г. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий – М.: ФИЗМАТЛИТ – 2003.
- [3] Д. А. Форсайт, Д. Понс. Компьютерное зрение. Современный подход. – М. «Вильямс», 2004. – с. 126.
- [4] J. Civera, A. J. Davison, J. M. M. Montiel. Inverse Depth to Depth Conversion for Monocular SLAM. – In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007, p. 2778–2783, April 2007.
- [5] R. I. Hartley and A. Zisserman. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, 2004.
- [6] A. J. Davison, N. D. Molton, I. D. Reid and O. Stasse. MonoSLAM: Real-Time Single Camera SLAM. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. June, pages 1052–1067, 2007.
- [7] Кирилловский В. К. Оптические измерения. Часть 3. Функциональная схема прибора оптических измерений. Типовые узлы. Оптические измерения геометрических параметров. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ). – 2002.
- [8] С.А. Бобков, А.В. Бурага, А.В. Сахаров. «Трехосевой микроэлектромеханический гироскоп в составе инерциальной навигационной системы. Оценка параметров и методика калибровки». Труды 53-й научной конференции Московского Физико-Технического Института.

Сведения об авторах

Бурага Александр Владимирович, аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета), тел.: +7-903-543-62-35, E-mail: dtp-avb@yandex.ru

Костюков Вячеслав Михайлович, профессор, заведующий кафедрой Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., тел.: +7-910-477-30-11, E-mail: kost_slv@mail.ru