

УДК 53.083

## МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ВБЛИЗИ ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д.Ю. Крысин

Предложен бесконтактный метод измерения пространственного положения объектов вблизи зеркальной водной поверхности (балльность волнения 0 баллов), основанный на использовании технологий технического зрения. Особенностью метода является возможность одновременного измерения высоты и угловой ориентации объекта. Рассмотрен алгоритм работы измерительной системы. Приведено описание разработанной установки, предназначенной для исследования предложенного метода. При проведении экспериментов достигнутая точность измерения высоты в диапазоне 500–1000 мм составила 2–3%. Погрешность измерения угловой ориентации при этом не превышала 10%. Рассмотрены источники погрешностей и способы повышения точности измерений.

**Ключевые слова:** измерение высоты, водная поверхность, система технического зрения, пространственное положение, экспериментальная установка.

### Введение

Управление гидросамолетами имеет ряд особенностей по сравнению с управлением сухопутными самолетами и требует от пилота особой подготовки и навыков. Одним из специфических и наиболее сложных элементов пилотирования гидросамолетов является посадка на гладкую невзволнованную водную поверхность (балльность волнения 0 баллов). Визуальная оценка истинной высоты полета в таких условиях является крайне проблематичной. При посадке гидросамолета на зеркальную водную поверхность необходимо руководствоваться показаниями приборов, а также надводными и наземными ориентирами.

В соответствии с действующими Федеральными авиационными правилами полетов в воздушном пространстве Российской Федерации (пункт 134 главы XXIII «Полеты гидросамолетов»), «...посадка гидросамолета в штиль при зеркальной поверхности воды производится на гидроаэродром со специально оборудованным стартом. При отсутствии на гидроаэродроме такого старта посадка разрешается гидросамолетам, оснащенным аппаратурой, обеспечивающей посадку на зеркальную поверхность» [1]. Данное правило продиктовано, прежде всего, необходимостью обеспечения безопасности полетов. Очевидно, основным блоком указанной аппаратуры должен быть высотомер малых высот. Однако нужно отметить, что большинство небольших гидросамолетов в базовой комплектации не оснащаются высотомерами малых высот. Это объясняется двумя основными причинами.

Первой и самой важной причиной является отсутствие высотомеров малых высот в списке обязательного авиационного оборудования для данного класса летательных аппаратов. Вторая причина состоит в относительно высокой стоимости данного оборудования. На больших гидросамолетах широко используются радиовысотомеры [2]. Но на малых гидросамолетах их использование в большинстве случаев нецелесообразно с экономической точки зрения. Отсутствие точной приборной информации о высоте полета вблизи зеркальной поверхности может стать (и иногда становится) причиной летных происшеств-

вий. Рассмотренные факты позволяют сделать вывод об актуальности поиска альтернативных способов измерения истинной высоты подвижных объектов вблизи незволнованной водной поверхности.

### **Постановка задачи**

Автором было выполнено исследование особенностей основных методов бесконтактного измерения дальности, используемых в авиации и промышленности. Рассматривались следующие системы: барометрические высотомеры, радиотехнические высотомеры, емкостные высотомеры, измерители пространственного положения на базе приемников сигналов глобальных спутниковых навигационных систем GLONASS и GPS, гамма-лучевые дальномеры, ультразвуковые дальномеры, лазерные дальномеры, системы технического зрения (СТЗ) [3]. В большей части случаев проведенный анализ выявил невозможность прямого использования перечисленных систем для измерения истинной высоты полета малых гидросамолетов вблизи зеркальной водной поверхности. В то же время технологии технического зрения являются более молодой областью и развиваются очень интенсивно. Одной из задач, успешно решаемых с помощью СТЗ, является бесконтактное измерение пространственного положения и формы объектов.

В предлагаемой работе рассматриваются возможности бесконтактной системы измерения истинной высоты объекта вблизи незволнованной водной поверхности на базе технологий технического зрения. Основные требования к системе: диапазон измеряемых высот 0,2–5 м, погрешность измерения – 2–3% от измеряемой высоты, постоянная времени 0,5 с [4–6].

### **Особенности применения СТЗ**

В настоящий момент нет готовых решений задачи измерения высоты объекта вблизи водной поверхности с использованием технологий технического зрения. Существующие пассивные стереоскопические СТЗ, 3D-сканеры на базе структурированного света, времяпролетные камеры (tof-камеры) имеют общую особенность, существенно ограничивающую их функциональность. Она состоит в том, что для их нормальной работы желательно, чтобы объекты, попадающие в поле зрения камер, отражали свет диффузно. Без существенного изменения программно-алгоритмического и аппаратного обеспечения данные системы не позволяют корректно проводить измерения в случаях, когда объекты сцены имеют зеркальные поверхности относительно большой площади. Этот факт объясняется тем, что при съемке зеркальных поверхностей на снимках фиксируются не только объекты, но и зеркальные изображения объектов, попадающие в поле зрения этих камер [7]. Фотоснимки являются двумерными изображениями трехмерной сцены. Зеркала же позволяют наблюдать зеркальные изображения объектов (мнимые или действительные в зависимости от формы зеркала). При фотографировании зеркал на снимки попадают изображения объектов, которых на самом деле может не быть в поле зрения камер. По этой причине можно утверждать, что при фотографировании зеркал фиксируются фотоизображения зеркальных изображений объектов. Рассмотренное явление при определенных обстоятельствах может привести к невозможности функционирования СТЗ. Наличие прозрачных и частично прозрачных поверхностей в поле зрения камер также может оказывать негативное влияние на работоспособность и функциональность СТЗ. Использование рассмотренных СТЗ для измерения относительного пространственного положения водной поверхности также сопряжено с описанными сложностями. Это объясняется тем, что водная поверхность является частично прозрачной для световых лучей, а при отсутствии сильных возмущений обладает свойством зеркального отражения [8].

В результате экспериментальных и теоретических исследований автором был предложен метод определения пространственного положения объекта вблизи зеркальной водной поверхности, в основе которого лежит использование теории технического зрения и свойства зеркального отражения водной поверхности.

### **Структурная схема СТЗ**

Структурная схема предложенной СТЗ представлена на рис. 1. СТЗ устанавливается на объект, пространственное положение которого необходимо контролировать. Блок подсветки 1 в общем случае состоит из массива опорных световых элементов, излучающих рассеянный свет в направлении зеркальной водной поверхности. Отразившись от поверхности, часть света попадает в объективы системы цифровых камер 4. Камеры фиксируют стереоскопические изображения зеркальной водной поверхности. Одновременно на снимках фиксируется зеркальное отражение объекта вместе с опорными световыми элементами СТЗ. Блок сопряжения 3 необходим для организации обмена информацией с вычислительным блоком 2. Вычислительный блок выполняет обработку полученных цифровых стереоскопических снимков, распознавание опорных световых элементов СТЗ и вычисление пространственного положения объекта относительно зеркальной водной поверхности. Здесь и далее под пространственным положением объекта понимается его высота и угловая ориентация относительно водной поверхности. Возможность настройки камер и блока подсветки придает измерительной системе свойство адаптивности. Адаптивность необходима для реакции на изменяющиеся внешние условия и положение объекта в пространстве.



Рис. 1. Структурная схема СТЗ

#### Описание метода измерения

Иллюстрация метода измерения представлена на рис. 2. Рисунок содержит три ряда изображений.

В верхнем ряду показано вертикальное перемещение некоторого объекта относительно невзволнованной водной поверхности (истинная высота увеличивается слева направо). На нижней плоскости объекта установлена стереоскопическая СТЗ, структурная схема которой приведена на рис. 1. Для наглядности блок подсветки представляет собой единственный световой элемент, расположенный между двумя камерами. Световой элемент представляет собой источник рассеянного света со сферической линзой. Было теоретически и экспериментально доказано, что минимальное количество световых элементов, необходимое для получения оценок высоты и угловой ориентации объекта, равно одному.

В среднем ряду рисунка представлены фотоизображения водной поверхности, фиксируемые левой от наблюдателя камерой СТЗ. На снимках за счет свойства зеркального отражения света, которым обладает водная поверхность, фиксируется зеркальное отражение нижней поверхности объекта. При этом фиксируются и видимые элементы СТЗ – световой элемент и две камеры. Изображение нижней плоскости объекта имеет форму прямоугольника. Изображение светового элемента находится в центре и имеет форму светлого круга. Радиально от него расположены две камеры, имеющие форму черных квадратов.

В нижнем ряду рисунка представлены изображения, попадающие в поле зрения и зафиксированные правой камерой. Изображения подобны тем, что были зафиксированы левой камерой.

В качестве дополнительной иллюстрации на рис. 3 приведена упрощенная схема съемки, поясняющая работу СТЗ. Она содержит следующие элементы:  $S_L$  и  $S_R$  – центры фотографирования левой и правой камер соответственно;  $S_L, X_L, Y_L, Z_L$  и  $S_R, X_R, Y_R, Z_R$  – прямоугольные фотограмметрические системы координат (ФСК) камер;  $L$  – точечный световой элемент;  $W$  – плоская поверхность, зеркально отражающая свет;  $I$  – мнимое изображение светового элемента  $L$ ;  $H$  – высота светового элемента относительно зеркальной поверхности; 1 и 2 – световые лучи;  $R_L$  и  $R_R$  – точки отражения лучей 1 и 2 от зеркальной поверхности  $W$ ;  $F_L$  и  $F_R$  – плоскости снимков камер;  $P_L$  и  $P_R$  – фотоизображения светового элемента на снимках, фиксируемых камерами.

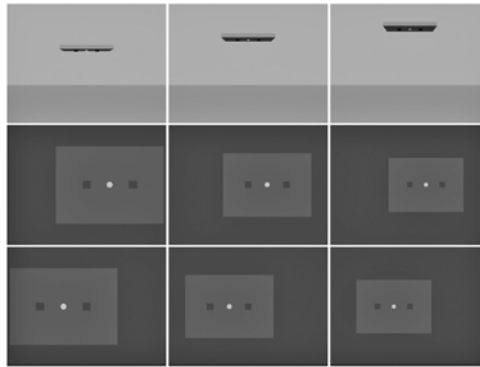


Рис. 2. Перемещение объекта и соответствующие стереоизображения: верхний ряд – положение объекта относительно зеркальной поверхности; средний ряд – соответствующие снимки левой камеры стереосистемы; нижний ряд – соответствующие снимки правой камеры стереосистемы

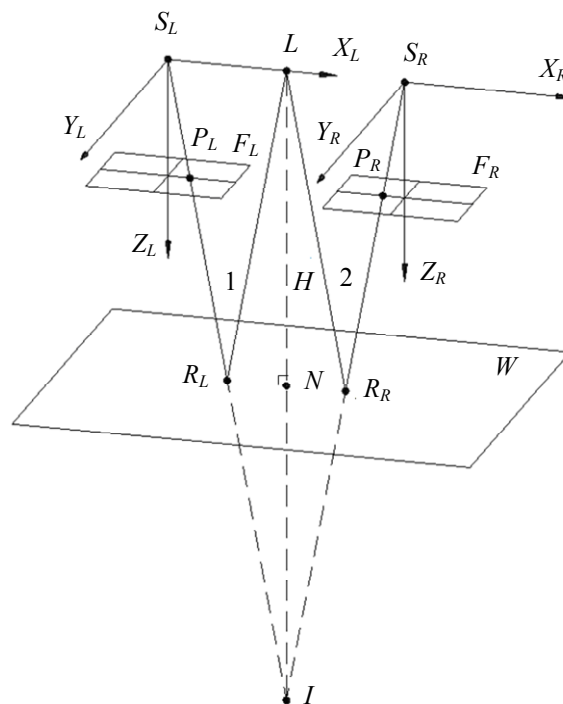


Рис. 3. Упрощенная схема съемки

Рис. 2, 3 показывают, что масштаб изображений, фиксируемых стереоскопическими камерами, изменяется в зависимости от высоты. При изменении угловой ориентации объекта изображения также будут изменяться. Суть предложенного метода измерения заключается в том, что с помощью обработки стереоскопических изображений можно вычислить пространственное положение объекта относительно зеркальной поверхности. Отдельно следует отметить, что предложенный метод обеспечивает измерение не только истинной высоты, но и угловой ориентации объекта относительно водной поверхности. Априорными данными при этом являются элементы внутреннего и внешнего ориентирования камер стереосистемы и их пространственное расположение относительно световых элементов.

Задача измерения положения объекта в пространстве сводится к задаче измерения положения СТЗ, точнее, к задаче измерения положения ФСК камер СТЗ. Зная положение ФСК относительно зеркальной поверхности и способ установки СТЗ на объекте, можно вычислить искомое пространственное положение объекта относительно водной поверхности.

В соответствии с предложенным методом пространственное положение объекта относительно невозмущенной водной поверхности может быть определено, если выполняются следующие условия:

- мнимое зеркальное изображение, по крайней мере, одного светового элемента блока подсветки попадает в область перекрытия камер системы;
- фотограмметрические координаты светового элемента известны;
- фотоизображение светового элемента на стереоскопических снимках поддается распознаванию.

### Алгоритмическое обеспечение

Обобщенная блок-схема предложенного алгоритма вычисления пространственного положения объекта представлена на рис. 4. В соответствии с приведенной блок-схемой алгоритм разбивается на 6 основных этапов.

**Этап 1.** Получение стереоскопических изображений водной поверхности с помощью цифровых камер СТЗ.

**Этап 2.** Предварительная обработка изображений, сегментация изображений, распознавание и определение плоских координат фотоизображений опорных элементов объекта. Сегментация является наиболее ответственной процедурой. При проведении экспериментов положительные результаты были получены с помощью цветовой сегментации в векторном пространстве RGB на базе вычисления расстояния Махаланобиса [9]

$$D_M(z, m) = \sqrt{(z - m)^T C^{-1} (z - m)},$$

где  $C^{-1}$  – матрица, обратная к ковариационной матрице репрезентативной выборки векторов RGB;  $m$  – математическое ожидание репрезентативной выборки векторов RGB;  $z$  – координаты произвольной точки пространства RGB.



Рис. 4. Обобщенная блок-схема алгоритма вычисления пространственного положения объекта

**Этап 3.** Ассоциирование фотоизображений световых элементов с их оригиналами. В качестве опорных могут быть использованы любые контрастные элементы объекта, попадающие на стереоизображения. Источники света имеют преимущество по причине простоты распознавания и обеспечения работы системы в условиях недостаточного естественного освещения.

**Этап 4.** Вычисление фотограмметрических координат мнимых зеркальных изображений световых элементов. Данная задача сводится к определению пространственных координат точки по координатам ее фотоизображений на стереоснимках [10]. В теории фотограмметрии эта операция называется прямой пространственной фотограмметрической засечкой. Исходными данными являются координаты световых элементов на полученных снимках, а также элементы внутреннего и внешнего ориентирования стереосистемы камер.

**Этап 5.** Вычисление пространственного положения объекта относительно водной поверхности. Если предположить, что  $L_X, L_Y, L_Z$  – координаты светового элемента в ФСК одной из камер (рис. 3), а  $I_X, I_Y, I_Z$  – координаты его мнимого изображения в той же системе координат, полученные на этапе 4, то высота  $H$  СТЗ, равная половине длины перпендикуляра, проведенного из центра светового элемента к зеркальной поверхности, может быть вычислена по формуле [7, 11]

$$H = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{(I_X - L_X)^2 + (I_Y - L_Y)^2 + (I_Z - L_Z)^2}.$$

Угловая ориентация ФСК относительно зеркальной поверхности вычисляется с использованием свойств скалярного произведения векторов. Выражение для вычисления угла наклона одной из осей ФСК относительно зеркальной плоскости имеет вид

$$\alpha = \arccos \frac{(I_X - L_X)}{\sqrt{(I_X - L_X)^2 + (I_Y - L_Y)^2 + (I_Z - L_Z)^2}} - \frac{\pi}{2}.$$

Для остальных осей углы наклона вычисляются аналогично. Углы крена и тангажа могут быть вычислены с использованием элементов матрицы направляющих косинусов.

**Этап 6.** Визуальный вывод информации о высоте и угловой ориентации объекта. При необходимости возможно формирование оповещений о незапланированном режиме движения объекта.

#### Экспериментальная установка

Для проверки алгоритмического и программного обеспечения была разработана и изготовлена экспериментальная установка (рис. 5). Установка включает следующие основные части: СТЗ (две цифровые USB-камеры, блок подсветки и источник питания); персональный компьютер, используемый в качестве вычислительного блока; штатив; резервуар с водой. В качестве световых элементов блока подсветки используются полупроводниковые светоизлучающие диоды со сферической линзой и матовой рассеивающей поверхностью. Большая часть опытов проводилась при использовании одного светодиода, расположенного между камерами. Как было сказано выше, одного светового элемента и системы из двух камер достаточно для измерения и высоты, и угловой ориентации объекта относительно зеркальной водной поверхности.

Программно-алгоритмическое обеспечение было реализовано в средах MATLAB и Simulink. Его тестирование проводилось на стереоизображениях, полученных экспериментально с помощью разработанной установки.

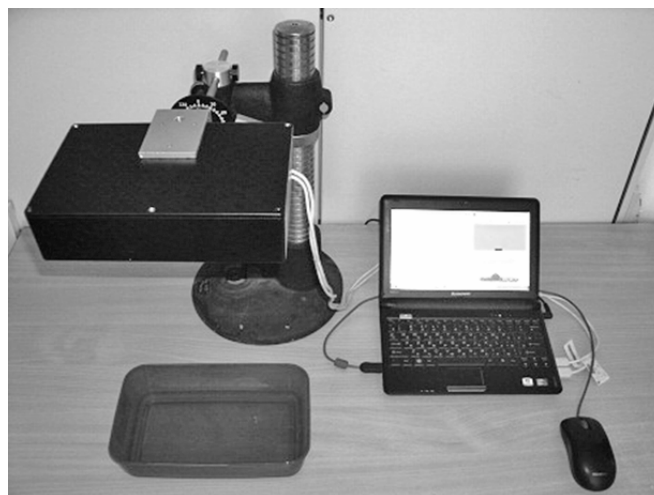


Рис. 5. Экспериментальная установка

#### Экспериментальные результаты

#### Заключение

Эксперименты по оценке точности измерений проводились в диапазоне высот 300–1000 мм. Углы наклона СТЗ относительно плоскости горизонта находились в пределах  $\pm 10^\circ$ . Достигнутая точность измерения высоты относительно зеркальной водной поверхности составила 8–15 мм (2–3% от измеряемой величины). Погрешность измерения углов наклона не превышала  $1^\circ$ . Период дискретизации измерений составлял 600–700 мс.

Проанализированы факторы, влияющие на точность измерений. Выявлена значительная зависимость погрешности от точности определения пространственного положения опорных световых элементов в ФСК. После монтажа СТЗ необходимые координаты известны только приблизительно, что обусловлено производственной неточностью установки световых элементов и камер относительно несущей конструкции СТЗ, а также отсутствием точной информации о положении оптических центров фотографирования камер. По этой причине была разработана процедура калибровки, предназначенная для определения фотограмметрических координат световых элементов. При калибровке вместо водной поверхности в качестве вспомогательного элемента используется плоское зеркало. Оно устанавливается в заранее известные пространственные положения, в которых фиксируются стереоснимки. С помощью обработки полученных стереоснимков вычисляются искомые координаты световых элементов. По существу, разработанная процедура является способом определения пространственного положения объектов, находящихся вне поля зрения стереосистемы камер. После ее выполнения точность вычисления высоты относительно зеркальной поверхности была повышена на 3–5%. Предполагается, что данный результат может быть улучшен с помощью решения задач оптимизации процесса калибровки.

Дальнейшее повышение точности измерений возможно за счет использования камер с лучшими техническими характеристиками, повышения точности калибровки камер, увеличения числа камер и световых элементов, повышения точности определения фотограмметрических координат световых элементов, применения теории фильтрации при обработке снимков и вычислении пространственного положения, использования дополнительной информации о динамике объекта.

Результаты исследования предложенного в работе метода позволяют сделать вывод о возможности применения технологий технического зрения для измерения пространственного положения объектов вблизи зеркальной водной поверхности. Особенностью метода является то, что он обеспечивает измерение не только истинной высоты, но и угловой ориентации объекта. Предложено алгоритмическое обеспечение. Рассмотрена экспериментальная установка, разработанная для исследования предложенного метода. Приводятся полученные результаты оценки его эффективности. Проанализированы источники погрешностей и способы повышения точности измерений. Планируется, что дальнейшее исследование будет направлено на расширение диапазона условий эксплуатации измерительной системы путем оптимизации ее конструкции и программно-алгоритмического обеспечения.

### Литература

1. Приложение 6 к конвенции о международной гражданской авиации. Эксплуатация воздушных судов. Часть I. Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолеты. – 9-е изд. – Международная организация гражданской авиации, 2010. – 258 с.
2. Радиовысотомер А-037. Руководство по технической эксплуатации. – ГУ1.000.051 РЭ, 1983. – 287 с.
3. Клюев Г.И. и др. Авиационные приборы и системы: Учебное пособие. – Ульяновск: УЛГТУ, 2010. – 343 с.
4. Nebylov A.V. et al. Sea Wave Parameters, Small Altitudes and Distances Measurers Design for Motion Control Systems of Ships, Wing-in-Surface Effect Craft and Seaplanes // AGARD-NATO Conference Proceedings NO 556. Dual Usage of Military and Commercial Technology on Guidance and Control. – AGARD-NATO, Neuilly-sur-Seine, France, 1995. – 12 p.
5. Nebylov A.V., Wilson P. Ekranoplane – Controlled Flight close to the Sea. Monograph. – WIT-Press, Southampton, UK, 2002. – 312 p.
6. Небылов А.В. Измерение параметров полета вблизи морской поверхности. – СПб: СПбГААП, 1994. – 308 с.
7. Шрёдер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. – М.: Техносфера, 2006. – 423 с.
8. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 280 с.
9. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
10. Назаров А.С. Фотограмметрия. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
11. Немченко К.Э. Аналитическая геометрия. – М.: Эксмо, 2007. – 352 с.
12. George M., Sukkarieh S. Tightly Coupled INS/GPS with Bias Estimation for UAV Applications // Proceedings of Australian Conference on Robotics and Automation. – 2005. – 7 p.

*Крысин Дмитрий Юрьевич*

– Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, аспирант, wtxt@ya.ru