

УДК УДК 519.711

## УПРАВЛЕНИЕ АВТОНОМНЫМИ ПОДВИЖНЫМИ СРЕДСТВАМИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ОКРУЖАЮЩЕГО ЛАНДШАФТА

**А.Б.Миллер**

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН*  
Россия, 127051, Москва, ГСП-4, Большой Каретный переулок, 19, стр.1  
E-mail: amiller@iitp.ru

**Б.М.Миллер**

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН*  
Россия, 127051, Москва, ГСП-4, Большой Каретный переулок, 19, стр.1  
E-mail: bmiller@iitp.ru

**А.К.Попов**

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН*  
Россия, 127051, Москва, ГСП-4, Большой Каретный переулок, 19, стр.1  
E-mail: ap@iitp.ru

**К.В.Степанян**

*Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН*  
Россия, 127051, Москва, ГСП-4, Большой Каретный переулок, 19, стр.1  
E-mail: kvstepanyan@iitp.ru

**Ключевые слова:** беспилотные средства, навигация, оптический поток.

**Аннотация:** Навигация по наблюдениям текущего изображения является одним из наиболее перспективных средств навигации и управления беспилотными аппаратами в условиях ограниченного применения спутниковых средств навигации. В режиме автономного движения простое добавление видеокамеры при отсутствии средств распознавания и интерпретации к системе инерциальной навигации не дает значимого эффекта. Поэтому извлечение навигационной информации из последовательности изображений играет ключевую роль. Важной характеристикой наблюдаемых изображений является эволюция порождаемого информационного потока. Примерами являются оптический поток при видеонаблюдении, доплеровское измерение абсолютной скорости и эволюция рельефа измеренной дальности при использовании многолучевых сонаров. С алгоритмической точки зрения они весьма близки, что позволяет объединить их обсуждение в данном докладе.

# 1. Управление БА

Постоянно растет количество областей использования беспилотных аппаратов (БА) или дронов по западной терминологии. При выполнении миссий используются различные средства навигации, хотя наиболее популярным становится комплексирование бортовых навигационных систем (ИНС) со спутниковыми средствами, такими как GPS или GLONASS. Однако, спутниковые сигналы могут быть недоступными в силу различных причин, таких как естественные и искусственные радиопомехи, вызывающие дополнительные шумы, ослабление, или просто затухание сигнала в силу особенностей рельефа местности. Навигация автономных аппаратов в этих условиях представляет собой сложную задачу, требующую комплексирования бортовой ИНС и датчиков другой природы: радио- и лазерных дальномеров, видеокамер, высотомеров [1]. Видеокамера, как дополнительное средство навигации, кажется весьма обещающим, однако, простое добавление камеры бесполезно без методов извлечения навигационной информации из видеопоследовательности.

## 1.1. От пеленгов к координатам

Для навигации необходимы: текущее положение БА, его ориентация и совокупность его линейных и угловых скоростей, но изображения, получаемые с камеры, позволяют определить только углы пеленга наблюдаемых объектов, но не расстояние до них. Вот почему возникает и вторая проблема: извлечение навигационных параметров именно из эволюции изображений, регистрируемых при движении. В литературе прослеживаются два подхода: с машинным обучением, подразумевающим предварительный сбор информации и без такового, только на основе отслеживания изменений в оперативно поступающем потоке изображений. Причем, изображение может представлять не только оптический, но и ИК-сигнал, акустический сигнал, или растровые данные дальности, полученные с помощью лидаров (Lidar), которые определяют дальности по времени прихода отраженного лазерного импульса.

Основная задача – это сопоставление эталонного и текущего изображений, при этом изображение эталонного объекта, как правило, жестко привязано к координатам на земной поверхности. Проблема ассоциации наблюдаемого и эталонного изображения (она же задача сопоставления) допускает неоднозначное решение.

## 1.2. RANSAC и Калмановская фильтрация

В аэрофотографии и космической съемке для разрешения проблемы ассоциации широко используется метод RANSAC (RANdom SAMple Consensus) [2] и его модификации [3, 4] однако более перспективным, менее ресурсоемким и быстродействующим является использование RANSAC совместно с моделью движения и Калмановской фильтрацией для оценки возможного положения наземных ориентиров [5]. Например, простое добавление дополнительной камеры, естественно помогает оператору, который дистанционно управляет БПЛА (беспилотный летательный аппарат), расширяя его возможности по поиску и

обнаружению наземных ориентиров, но бесполезно с точки зрения навигации автономного аппарата. Для решения навигационных задач в автономном полете важны положение и ориентация БА, выраженные в метрических параметрах, то есть координаты и углы ориентации. Эти параметры скрыты в наблюдаемых изображениях и их изменениях при движении аппарата. Заметим, что этот набор данных есть как минимум шестимерный вектор, в то время позиции наблюдаемых объектов выражаются двумерными векторами в фокальной плоскости камеры. Добавление второй и более камер с использованием стереоскопии улучшает ситуацию, но точность определения координат остается невысокой, поэтому, например, при посадке использование радио или оптических маяков дает значительно более надежные результаты.

Одним из традиционных методов работы с пеленгационными измерениями является использование расширенного фильтра Калмана (Extended Kalman Filtering [ЕКФ]), примеры использования ЕКФ при посадке БПЛА даны в работах [6, 7]. Однако, методы, применяемые в навигации подводных аппаратов, такие как метод псевдоизмерений, дают более устойчивые и надежные оценки [8] при работе с пеленгационными измерениями. Принципиальная идея состоит в том, что изначально нелинейные уравнения наблюдений становятся линейными после раскрытия тригонометрических функций углов пеленга в уравнениях наблюдений [9]. Поскольку измерения углов пеленга значительно более точны, особенно при использовании оптоэлектронных устройств, это позволяет записать уравнения фильтрации в стандартном виде и использовать плотный оптический поток (ОП), то есть совокупность скоростей сдвига изображения по всему полю зрения или по значительной его части. В работе [10] рассматривается оценка высоты при снижении по глиссаде, однако для всего полета действительно актуально комплексирование данных видео, бортовой навигационной системы и измерений высоты полета. Эта задача, вообще говоря, нелинейная и требует использования метода псевдоизмерений. Основой здесь является совокупность линейных соотношений, связывающих скорости сдвига изображения с линейными и угловыми скоростями БПЛА. Методика пересчета пеленгов в параметры движения схематически изложена в работах [10, 11]. В основе методики лежит известный еще из аэрофотографии метод оценки сдвига изображения, который дает совокупность соотношений, связывающих линейные и угловые скорости носителя камеры с совокупностью скоростей сдвига изображения в фокальной плоскости камеры [12, 13]. Однако, наблюдение видеопоследовательности, дает возможность вычислить действительный сдвиг изображения (например, с использованием алгоритма Люкаса-Канаде или его модификаций [14, 15] в любой точке поля зрения, при сравнении которого с точными формулами для сдвига получается система линейных уравнений, связывающих измеренные сдвиги с параметрами движения: линейными и угловыми скоростями движения носителя. Далее, полученные оценки скоростей носителя, используются как наблюдения в системе динамических уравнений движения носителя, что в финале дает оценки его положения и скоростей.

### 1.3. Навигация АНПА

Интересный пример использования методологии оптического потока описан в работе [18], где предложен алгоритм оценивания абсолютной скорости движения

АНПА (автономного необитаемого подводного аппарата) относительно дна, который использует измерения профиля дальности и его изменение в процессе движения. Данный подход аналогичен измерению скорости БПЛА относительно земной поверхности, основанному на так называемом плотном ОП, связанному с движением аппарата [19]. Отметим, что важной особенностью этого подхода является работа по всему изображению в целом без выделения т.н. «особых» точек и без выполнения трудоемкой операции совмещения соседних кадров. В работе [19] предложено развитие подхода [20] на случай движущегося аппарата с использованием комплексирования акустического метода, и например, данных от ИНС об ускорениях аппарата, хотя это не единственный путь, и комплексирование с данными о положении акустических маяков, или доплеровскими измерениями скорости также представляет значительный интерес. Вообще задачи управления АНПА порождают множество подходов, родственных использованию методологии оптического потока, наиболее близким является наблюдение последовательности акустических изображений карты дальностей от АНПА до дна водоема, а также доплеровских измерений абсолютной скорости с использованием условно-минимаксной Калмановской фильтрации [21]. Более детально тематика управления подводными дронами представлена в обзоре [22].

#### 1.4. Заключение

В заключение приведем ссылки на некоторые работы, в которых также рассматривается данная тематика [23–27].

### Список литературы

1. Miller M.M., et al., Navigating in Difficult Environments: Alternatives to GPS – 2 // Proceedings of NATO RTO Lecture Series on Low Cost Navigation Sensors and Integration Technology, 2008.
2. Fischler M.A., Bolles R.C. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography // Communications of the ACM. 1981. Vol. 24, No. 6. P. 381–395.
3. Farneback G. Fast and Accurate Motion Estimation using Orientation Tensors and Parametric Motion Models // Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition. Barcelona, Spain, September 3–8, 2000. Vol. 1. P. 135–139.
4. Cheng, H.-W., Chen, T.-L., Tien, C.-H. Motion Estimation by Hybrid Optical Flow Technology for UAV Landing in an Unvisited Area // Sensors. 2019. Vol. 19, No. 6. P. 1380.
5. Borkar A., Hayes M., Smith M. Robust Lane Detection and Tracking with RANSAC and Kalman filter // Proceedings of 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Cairo, Egypt, 2009. P. 3261–3264.
6. Nguyen P.H., Arsalan M., Koo J.H., Naqvi R.A., Truong N.Q., Park K.R. LightDenseYOLO: A Fast and Accurate Marker Tracker for Autonomous UAV Landing by Visible Light Camera Sensor on Drone // Sensors. 2018. Vol. 18, No. 6. P. 1703.
7. Tang D., Shen L., Xiang X., Zhou H., Lai J. N-Cameras-Enabled Joint Pose Estimation for AutoLanding Fixed-Wing UAVs // Drones. 2023. Vol. 7. P. 693.
8. Миллер А.Б. Разработка алгоритмов управления движением объекта на основе калмановской фильтрации пеленгационных измерений // Автоматика и телемеханика. 2015. № 6, С. 91–111.
9. Miller A., Miller B. Stochastic control of light UAV at landing with the aid of bearing-only observations // Proceeding of SPIE 9875, Eighth International Conference on Machine Vision (ICMV 2015). Barcelona, Spain, 8 Dec. 2015. P. 987529.

10. Миллер Б.М., Степанян К.В., Попов А.К., Миллер А.Б. Навигация БПЛА на основе последовательностей изображений, регистрируемых бортовой видеокамерой // Автоматика и телемеханика. 2017. № 12, С. 141–153.
11. Степанян К.В., Попов А.К., Миллер А.Б., Миллер Б.М. Оптический поток в задачах навигации и управления беспилотными автономными средствами // Информационные процессы. 2023. Т. 23, № 4. С. 526–544.
12. Миллер Б.М., Федченко Г.И., Морскова М.Н. Расчет сдвига изображения при панорамном фотографировании // Известия ВУЗов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 1984. № 4. С. 81–89.
13. Миллер Б.М., Федченко Г.И. Влияние ошибок ориентации носителя на сдвиг изображения при фотографировании с движущегося объекта // Известия ВУЗов. Геодезия и Аэрофотосъемка. 1984. № 5. С. 75–80.
14. Lucas B., Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision // Proceedings of 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence IJCAI'81. Vancouver, Canada, 1981. Vol. 2. P. 674–679.
15. Baker S., Matthews, I. Lucas-Kanade 20 Years On: A Unifying Framework // International Journal of Computer Vision. 2004. Vol. 56. P. 221–255.
16. Konovalenko I., Kuznetsova E., Miller A., Miller B., Popov A., Shepelev D., Stepanyan K. New Approaches to the Integration of Navigation Systems for Autonomous Unmanned Vehicles (UAV) // Sensors. 2018. Vol. 18, No. 9. P. 3010.
17. Попов А., Миллер В., Миллер А., Степанян К. Optical Flow as a Navigation Means for UAVs with Optoelectronic Cameras // Proceedings of 56 Israel Annual Conf. Aerospace Sciences. Tel-Aviv and Haifa, Israel, March 9-10, 2016. ThL2T5.2.
18. Миллер А., Миллер Б. Определение скорости АНПА при помощи акустического зондирования профиля дна. // Информационные процессы. 2017. Т. 17, № 3. С. 165–171.
19. Миллер А.Б., Миллер Б.М., Попов А.К., Степанян К.В. Навигация БПЛА на основе последовательностей изображений, регистрируемых бортовой видеокамерой // Автоматика и телемеханика. 2017. № 12. С. 141–153.
20. Folkesson J., Leonard J., Leederkerken J., Williams R. Feature Tracking For Underwater Navigation using Sonar // Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, CA, USA, Oct 29-Nov 2, 2007. P. 3678–3684.
21. Borisov A., Bosov A., Miller B. Miller G. Passive Underwater Target Tracking: Conditionally Minimax Nonlinear Filtering with Bearing-Doppler Observations // Sensors. 2020. Vol. 20. P. 2257.
22. Miller A., Miller B., Miller G. Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System // Drones. 2021. Vol. 5. P. 83.
23. Arafat M. Y. e.a. Vision-Based Navigation Techniques for Unmanned Aerial Vehicles: Review and Challenges // Drones. 2023. Vol. 7. P. 89.
24. Costanzi R. e. a. An Attitude Estimation Algorithm for Mobile Robots Under Unknown Magnetic Disturbances // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2016. Vol. 21, No. 4. P. 1900–1911.
25. Lu Y., Xue X., Gui-Song Xia, Liangpei Z. A survey on vision-based UAV navigation // Geospatial Information Science. 2018. Vol. 21, No. 1. P. 21–32.
26. Regina B. Hull and Aerial Holonomic Propulsion System Design for Optimal Underwater Sensor Positioning in Autonomous Surface Vessels // Sensors. 2021. Vol. 21, No. 2. P. 571.
27. Vaton e.a. Joint Minimization of Monitoring Cost and Delay in Overlay Networks: Optimal Policies with a Markovian Approach // Journal of Network and Systems Management. 2019. Vol. 27. P. 188–232.