

СЕКЦИЯ № 1.
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ
И НАВИГАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Председатели: д.т.н. профессор Ишков С.А.
д.т.н. профессор Старинова О.Л.

УДК 528.837

Овакимян Д.Н., Старостина Т.В.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ
ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ БПЛА ПРИ ОТСУТСТВИИ
СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

В научно-технической литературе все методы и алгоритмы решения задачи, связанной с автоматизированной навигацией БПЛА основываются на технологии одновременной локализации и картографирования (SLAM, Simultaneous Localization and Mapping). SLAM – это вычислительная схема построения или обновления карты неизвестной окружающей среды с одновременным отслеживанием местоположения самого БПЛА.

Целью данной работы является анализ основных подходов к определению текущих координат БПЛА при полном отсутствии сигналов GPS и разработка алгоритма автоматического определения координат БПЛА на основе известных опорных объектов.

Применительно к БПЛА, технология SLAM имеет следующую общую постановку: на основе ряда наблюдений или измерений, полученных от некоторого датчика O_i в дискретные моменты времени t , необходимо вычислить оценку местоположения БПЛА и построить карту окружающей его среды m_t [1].

Задача SLAM состоит в том, чтобы вычислить условную вероятность карты m_t и положения БПЛА x_t при условии имеющегося измерения от соответствующего датчика:

$$P(m_t, x_t | o_{1:t}). \quad (1)$$

Применение правила Байеса дает схему для того, чтобы последовательно обновлять последующие значения местоположения БПЛА, учитывая текущую карту и функцию перехода $P(x_t | x_{t-1})$,

$$P(x_t | o_{1:t}, m_t) = \frac{P(o_t | x_t, m_t) \sum_{x_{t-1}} P(x_t | x_{t-1}) P(x_{t-1} | m_t, o_{1:t-1})}{Z}, \quad (2)$$

где x_t – положение БПЛА в текущий момент времени t , x_{t-1} – положение в предыдущий момент времени; m_t – построенная карта местности; $O_{1:t-1}$ – массив показаний датчиков в течении всего движения БПЛА от начального до текущего момента, Z – соответствующий нормирующий множитель. Выражение (2) описывает условное распределение для оценки текущего положения БПЛА на основании построенной карты, показания датчиков и оценки в предыдущий момент. Приведенная ниже формула аналогично описывает пересчет условного распределения для карты:

$$P(m_t | x_t, o_{1:t}) = \sum_{m_{t-1}} P(m_t | x_t, m_{t-1}, o_t) P(m_{t-1} | o_{1:t-1}, x_t). \quad (3)$$

Совместное определение положения БПЛА и карты может быть найдено на базе некоторого оптимального решения, основанного на стандартных алгоритмах типа максимального правдоподобия [2].

Алгоритмы SLAM используют соответствующие вычислительные схемы для решения проблемы автономной локализации и

картографирования на основе данных, полученных от различных датчиков.

В рамках работ по данной теме был разработан алгоритм автоматического определения координат БПЛА на основе известных координат опорных объектов.

На БПЛА имеются три комплекта видеокамер с лазерными дальномерами (в дальнейшем будем называть их камерами), которые установлены на корпусе аппарата в двухосных карданных подвесах (рис. 1).

С каждой из камер связана ортогональная система координат $z_i x_i y_i$ ($i=1,2,3$). Аналогично, с каждым карданным подвесом связана ортогональная система координат $z_i^G x_i^G y_i^G$ ($i=1,2,3$), где оси z_i^G и y_i^G являются осями вращения.

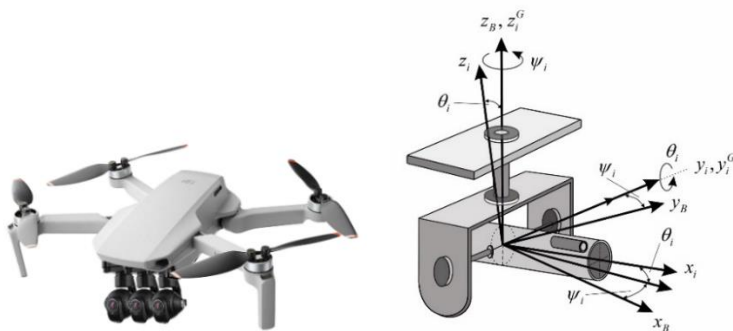


Рис. 1. БПЛА с тремя комплектами видеокамер с лазерными дальномерами и оси координат, связанные с камерами

Первые две камеры предназначены для наведения на опорные объекты с известными координатами. В исходном положении система координат $z_i x_i y_i$ и $z_i^G x_i^G y_i^G$ ($i=1,2,3$) всех трех камер совпадают с жестко связанной с БПЛА системой координат $x_B y_B z_B$

[3]. Третья камера предназначена для непрерывного отслеживания цели, геодезические координаты которой необходимо определить (рис. 2). Наведение на опорные объекты осуществляется последовательными вращениями на углы ψ_i, θ_i вокруг осей кардановых подвесов z_i^G и y_i^G ($i=1,2$) первых двух камер. Когда оба опорных объектов оказываются в центральной области поля зрения соответствующих камер, оси подвесов фиксируются и системы координат $z_i x_i y_i$ ($i=1,2$) оказываются жестко фиксированными по отношению к корпусу БПЛА. Третья камера предназначена для непрерывного отслеживания цели, геодезические координаты которой необходимо определить. Отметим, что по отношению к вектору $\varepsilon(t)$ «малых» углов поворота корпуса БПЛА, оси x_i каждой камеры могут быть рассмотрены как «оптические оси», а оси z_i и y_i , как «оси чувствительности» или «измерительные оси».



Рис. 2. Наведение первых двух камер на опорные объекты с известными координатами и третьей камеры на наземный объект (цель)

Нумеруя камеры индексами 1, 2, 3, получим следующие выражения для соответствующих матриц вращения R_i ($i=1,2,3$), описывающих повороты ортогональных систем координат, жестко связанных с камерами, по отношению к базовой системе координат $x_B y_B z_B$:

$$R_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \psi_1 & -\sin \psi_1 & \cos \psi_1 \sin \mathcal{G}_1 \\ \cos \theta_1 \sin \psi_1 & \cos \psi_1 & \sin \psi_1 \sin \mathcal{G}_1 \\ -\sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \psi_2 & -\sin \psi_2 & \cos \psi_2 \sin \mathcal{G}_2 \\ \cos \theta_2 \sin \psi_2 & \cos \psi_2 & \sin \psi_2 \sin \mathcal{G}_2 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 \cos \psi_3 & -\sin \psi_3 & \cos \psi_3 \sin \mathcal{G}_3 \\ \cos \theta_3 \sin \psi_3 & \cos \psi_3 & \sin \psi_3 \sin \mathcal{G}_3 \\ -\sin \theta_3 & 0 & \cos \theta_3 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Наведение третьей камеры на наземную цель с неизвестными координатами и последующее слежение за целью осуществляется при помощи специальной автоматической системы с двумя степенями свободы, которая сканирует территорию, обнаруживает и идентифицирует цель, а также осуществляет последующее слежение за ней [3]. Матрица R_3^T , связывающая вектор ошибок $\varepsilon(t)$ с угловыми отклонениями третьей камеры по отношению к СК $x_B y_B z_B$ с имеет вид

$$R_3^T(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta_3(t) \cos \psi_3(t) & \cos \theta_3(t) \sin \psi_3(t) & -\sin \theta_3(t) \\ -\sin \psi_3(t) & \cos \psi_3(t) & 0 \\ \cos \psi_3(t) \sin \mathcal{G}_3(t) & \sin \psi_3(t) \sin \mathcal{G}_3(t) & \cos \theta_3(t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где углы $\theta_3(t)$ и $\psi_3(t)$ являются функциями времени, в отличие от углов ψ_1 , ψ_2 и θ_1 в R_s , которые являются постоянными.

В частном случае, когда наземный объект неподвижен, оптические оси всех трех камер направлены на объекты, получаем значения углов между оптическими осями каждой пары камер:

$$\Phi(x_1, x_2) = \arccos(\cos \theta_1 \cos \psi_1 \cos \theta_2 \sin \psi_2 - \cos \theta_1 \sin \psi_1 \cos \theta_2 \cos \psi_2 + \sin \theta_1 \sin \theta_2), \quad (8)$$

$$\Phi(x_1, x_3) = \arccos(\cos \theta_1 \cos \psi_1 \cos \theta_3 \cos \psi_3 + \cos \theta_1 \sin \psi_1 \cos \theta_3 \sin \psi_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_3) \quad (9)$$

$$\Phi(x_2, x_3) = \arccos(\cos \theta_2 \sin \psi_2 \cos \theta_3 \cos \psi_3 - \cos \theta_2 \cos \psi_2 \cos \theta_3 \sin \psi_3 + \sin \theta_2 \sin \theta_3) \quad (10)$$

Выражения (8–10) используются в алгоритме определения геодезических координат БПЛА и наземных объектов по известным координатам опорных объектов в случае отсутствия сигналов GPS.

Рассмотренный алгоритм подразумевает определение координат БПЛА по известным координатам двух опорных объектов на поверхности Земли при отсутствии сигналов GPS, используя (первые) два комплекта из установленных на БПЛА в двухосных карданных подвесах трех комплектов видеокамер с лазерными дальномерами. В отличие от методов определения координат БПЛА при отсутствии спутниковых навигационных сигналов на основе технологии одновременной локализации и картографирования SLAM, рассмотренный метод не требует высоких вычислительных мощностей на борту БПЛА.

Таким образом, выполненный анализ основных подходов к определению текущих координат БПЛА при полном отсутствии сигналов GPS показывает, что разработанный алгоритм автоматического определения координат БПЛА на основе известных опорных объектов является более оптимальным для применения.

Библиографический список

1. Павловский, В.Е. Технологии SLAM для подвижных роботов: состояние и перспективы / В.Е. Павловский, В.В. Пав-

ловский // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2016. – Том 17. – № 6. – С. 384–394.

2. Kovalev, M.A. UAV's autonomous navigation principle based on Earth remote sensing data / M.A. Kovalev, V.A. Zelenskiy, D.N. Ovaki-myan, T.V. Starostina // 2022 8th International Conference on Infor-mation Technology and Nanotechnology, ITNT 2022. – 2022. – P. 149–155.

3. Танченко, А.П. Алгоритм автономной коррекции навига-онной системы беспилотного летательного аппарата на основе рас-познавания дорожной и речной сети / А.П. Танченко, А.М. Феду-лин, Р.Р. Бикмаев, Р.Н. Садеков // Гироскопия и навигация. – 2020. – Том 28. – №3. – С. 32–42.

УДК 629.782

Акалу Й.А.

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДВИЖЕНИЯ ТРОСОВЫХ СИСТЕМ

Введение. В работе рассматривается влияние атмосферы и аэродинамической силы на движение двух тел связанной с невесо-мым и нерастяжимым тросом. Проводится анализ развёртывания системы спутниковой связи, состоящей из двух объектов в атмо-сфере.

Математическая модель движения космических тросов, методы управления тросом и влияние возмущающей факторов на космиче-ской тросовой системы (КТС) рассматриваются в работе [1]. В работе [3] производится моделирование движения космического аппарата (КА) с тросовым аэродинамическим стабилизатором и показывается применение аэродинамического стабилизатора в атмосфере.