

Метод отслеживания звездной карты датчиком без звездной библиотеки на основе алгоритма цепочки угловых расстояний

Ян Бо, Гао Тяньцы, Жао Шэнжэнь, К.А. Неусытин

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

Аннотация: В данной статье предлагается метод отслеживания звездного датчика без звездной библиотеки на основе алгоритма цепочки угловых расстояний, направленный на решение проблемы, заключающейся в том, что традиционные звездные датчики полагаются на фиксированную звездную библиотеку и должны быть настроены на работу с несколькими устройствами в режиме отслеживания. Этот метод обеспечивает сопоставление звездной карты путем динамической генерации цепочек угловых расстояний, избегая зависимости от глобальной библиотеки звезд. Эксперименты показывают, что время распознавания алгоритма в режиме отслеживания сокращается до миллисекунд, а максимальная ошибка определения углов ориентации не превышает $0,035^\circ$, что подтверждает его эффективность и надежность. Исследование обеспечивает ключевую техническую поддержку для разработки недорогих и легких звездных датчиков, которые подходят для таких сценариев, как исследование дальнего космоса и околоземных спутниковых скоплений.

Ключевые слова: алгоритм цепочки угловых расстояний, звездный датчик без звездной библиотеки, распознавание звездной карты, режим отслеживания, ориентация, динамическое сопоставление, исследование дальнего космоса.

Введение

Управление летательными аппаратами, функционирующими как в космическом пространстве, так и в околоземном осуществляется на основе информации от различных измерительных систем. Одним из наиболее точных датчиков навигационной информации, устанавливаемых на космических летательных аппаратах, в частности возвращающихся в атмосферу космических летательных аппаратах, является астродатчик.

Астрономический метод является единственным стабильным и надежным методом определения положения в пространстве в миссиях по исследованию дальнего космоса, а наиболее важным компонентом является звездный датчик. Идея использования звездных датчиков для измерения угловой скорости вращения космических аппаратов возникла очень давно [1], однако практического применения пока не было. Существует два

типичных режима работы звездных датчиков: режим «Потерян в космосе» и режим слежения, которые соответствуют этапу инициализации и этапу динамического поддержания определения положения соответственно [2]. Обычно на детекторе необходимо установить два разных типа звездных датчиков. Один из них — это фиксированный звездный датчик с большим полем зрения. Алгоритмы распознавания звездной карты для режима «Потерян в космосе» в основном применяются к этому типу устройств. Другой — высокоточный звездный датчик с небольшим полем зрения и вращающимся основанием. Алгоритмы режима слежения в основном применяются к этому типу звездных датчиков.

В режиме «Потерян в космосе» система не имеет предварительной информации [3] о положении и должна определить направление оптической оси звездного датчика путем сопоставления с глобальной звездной картой для дальнейшего достижения абсолютного решения по положению [4]. Рабочий процесс реализуется следующим образом: во-первых, исходное изображение неба получается с помощью КМОП-датчика, а извлечение звездных точек выполняется с помощью гауссовой фильтрации и адаптивной пороговой сегментации; затем алгоритм центроида используется для вычисления субпиксельных координат точек звезды, а двумерные пиксельные координаты преобразуются в трехмерные векторы в небесной системе координат на основе модели проекции угла поля зрения; На этапе генерации признаков используется метод, основанный на теории графов, для построения соответствующих признаков изображения звездного неба, затем применяется технология индексации К-вектора [5] для ускорения процесса сопоставления признаков, и, наконец, алгоритм QUEST [6] применяется для вычисления кватерниона оптимального положения с целью завершения подгонки наименьших квадратов от измеренного вектора к опорному вектору.

В отличие от режима «Потерян в космосе», режим слежения основан на априорной оценке положения [7] и обеспечивает обновление положения с помощью рекурсивного алгоритма. Ключевым моментом этого режима является создание надежной модели ассоциации отслеживания звезд. Обычно используемые методы включают ассоциацию данных ближайшего соседа (NNDA) на основе расстояния Махаланобиса и вероятностный фильтр ассоциации данных (PDAF) [8].

Так как установка двух различных звездных датчиков, особенно подвижного механизма следящего звездного датчика, значительно увеличивает массу летательного аппарата, но сам режим слежения имеет высокое быстродействие и малую ресурсоемкость. Необходимо разработать алгоритм слежения, подходящий для датчиков неподвижных звезд с большим полем зрения, чтобы переключаться между различными режимами работы при условии использования одного устройства и эффективно завершать определение положения летательного аппарата. В настоящее время все алгоритмы режима отслеживания основаны на заранее определенной базе данных объектов звездных точек. В данной статье предлагается алгоритм режима отслеживания, подходящий для датчиков звезд с большим полем зрения и не зависящий от базы данных точечных объектов звезд, основанный на улучшенном методе распознавания звездной карты «цепь угловых расстояний».

Метод распознавания и сопоставления звездных карт на основе «цепи угловых расстояний»

Gottlieb и др. в 1978 году был предложен полигональный алгоритм сопоставления угловых расстояний [9]: из наблюдаемых звезд в качестве опорных выбираются две звезды, а их векторы направления в системе

координат звездного датчика равны s_1 и s_2 соответственно. Рассчитаем его угловое расстояние $d_m^{1,2}$, как:

$$d_m^{1,2} = \arccos(s_1, s_2). \quad (1)$$

Сравним это угловое расстояние с угловыми расстояниями d всех навигационных звезд в библиотеке навигационных звезд. Если в пределах заданного диапазона погрешности ε имеется пара навигационных звезд (i, j) , удовлетворяющая условию:

$$|d^{i,j} - d_m^{1,2}| \leq \varepsilon, \quad (2)$$

тогда (i, j) считается совпадением между этими двумя навигационными звездами. Если результат не является уникальным, то можно выбрать другие пары звезд, чтобы повторить процесс идентификации. Набор навигационной информации о звездных группах, имеющий практическое справочное значение, может быть расширен до набора, состоящего из 3-4 звездных точек, подлежащих идентификации, образующих форму треугольника [10] или пирамиды [11].

В отличие от алгоритма сопоставления полигональных угловых расстояний, который в качестве основного объекта идентификации использует пары звезд, Kosik предложил использовать в качестве объекта идентификации «группу», состоящую из главной звезды и нескольких окружающих ее звезд-компаньонов, что называется алгоритмом сопоставления групп [12]. Этот алгоритм использует наблюдаемые угловые расстояния между главной звездой и несколькими окружающими ее звездами-компаньонами для формирования набора угловых расстояний и использует формулы (1) и (2) для поиска соответствия для каждого углового расстояния в наборе. Навигационная звезда, которая появляется в этом наборе чаще всего, совпадает с главной звездой.

Кроме того, Schiattarella и др. в 2017 году предложили многополюсный алгоритм [13], который расширил объекты идентификации и сопоставления с одной главной звезды до «главной звездной цепочки», состоящей из нескольких звездных точек, то есть путем группового сопоставления нескольких различных главных звезд по отдельности для формирования последовательно связанной цепочки в качестве главной звездной модели. Благодаря введению шаблонов этот алгоритм перешел от алгоритма изоморфизма подграфов к алгоритму распознавания шаблонов.

Учитывая логику трех вышеперечисленных алгоритмов, предлагается новый метод генерации шаблона звездной карты «цепочка угловых расстояний», который реализуется следующим образом:

1. Выполнить базовую обработку изображения звездного датчика для уменьшения шума, извлечения звездных точек, удаления двойных звезд и расчета углового расстояния между звездами;

2. Выбрать самую яркую звездную точку в середине поля зрения звездного датчика в качестве начальной звездной точки s_0 и находить соседнюю звезду s_1 с наименьшим угловым расстоянием в ее окрестности. Угловое расстояние между ними записывается как $d_m^{0,1}$;

3. Взять s_1 в качестве центральной точки, находить ближайшую звездную точку в ее окрестности, за исключением s_0 , записанную как s_2 , а угловое расстояние между ними записывается как $d_m^{1,2}$;

4. Использовать тот же метод, взять s_n в качестве центральной точки, находить ближайшую точку звезды, которая не была пройдена в ее окрестности, запишите ее как s_{n+1} , и запишите значение углового расстояния $d_m^{n-1,n}$.

Если количество идентифицированных звеньев достигнет заданного максимального значения N или в поле зрения не останется

неидентифицированных точек звезды, генерация цепочки угловых расстояний будет прекращена.

На этом этапе мы можем получить цепочку угловых расстояний с числом звеньев не более N :

$$D_m = \{d_m^{0,1}, d_m^{1,2}, \dots, d_m^{n-1,n}, \dots, d_m^{n'-1,n'}\}, n' \leq N,$$

и цепочка звездных точек, которая должна быть идентифицирована, состоящая из вовлеченных звездных точек:

$$S_m = s_{m1}, s_{m2}, \dots, s_{mn}, \dots, s_{mn'}, n' \leq N.$$

В отличие от существующих алгоритмов распознавания образов, навигационная библиотека звезд, используемая для сравнения образов цепочек угловых расстояний с образцом звездной карты, представляет собой не заранее сгенерированный образ каждой точки звезды, а ближайшие точки в пределах диапазона, который соответствует условиям, и угловое расстояние между ними. Если соседние звезды точки звезды $\hat{s}$ записаны как точка звезды $j_1, j_2, \dots, j_n$, то данные библиотеки навигационных звезд, соответствующие точке, могут быть записаны, как:

$$\hat{s}, j_n, d_{\hat{s}}^{j_n}, n = 1, 2, \dots, n_{max}.$$

Среди них, $\hat{s}, j_1, j_2, \dots, j_n$, — это номера звездных точек $\hat{s}, j_1, j_2, \dots, j_n$, в звездном каталоге соответственно. Здесь используется звездный каталог BSC5, который полностью отвечает требованиям точности идентификации и сопоставления при условии использования звездных датчиков видимого диапазона света. Соответственно, используемый звездный каталог должен быть загружен в память бортового компьютера летательного аппарата как дополнение к навигационной звездной библиотеке.

Учитывая, что две звездные точки в паре звезд невозможно различить просто используя информацию об угловом расстоянии, и существует несколько групп звездных пар, которые одновременно удовлетворяют

условиям, каждое значение углового расстояния $d_m^{n-1,n}$ может соответствовать нескольким номерам навигационных звезд, и эти навигационные звезды составляют набор кандидатов на звездные точки S_m^n . Набор S_m^n может быть предварительно проверен путем нахождения пересечения значений углового расстояния двух звеньев $d_m^{n-1,n}$ и $d_m^{n,n+1}$, находящихся до и после точки звезды на цепочке углового расстояния s_n и набора потенциальных точек звезды s_n^f .

$$s_n^f = \max(S_m^n \cap S_m^{n+1}). \quad (3)$$

Для дальнейшего определения целостности цепи углового расстояния ее следует проверять, начиная с первой соседней точки в направлении, в котором формируется цепочка углового расстояния. Из нескольких альтернативных цепочек следует выбрать самую длинную.

При оптимальном соответствии всех звеньев в цепочке угловых расстояний формируется набор соответствующих навигационных звезд.

$$\hat{S}^* = \{s_1^*, s_2^*, \dots, s_n^*, \dots, s_{n'}^*\}, n' \leq N.$$

Если в формуле (3) на этапе сопоставления оказывается пустым множеством или на этапе проверки оно оценивается как несоответствующее, то соответствующую звездную точку следует отбросить, а начальную точку выбрать заново для генерации цепочки угловых расстояний.

Улучшенный алгоритм отслеживания рабочего режима

После того, как звездный датчик завершит первоначальную ориентацию, он может перейти в режим слежения. В режиме слежения звездный датчик фотографирует звездное небо через фиксированные интервалы времени, а звездные точки, появляющиеся на фотографиях звездного неба, сделанных в смежные моменты времени, имеют высокую степень повторяемости. В настоящее время, если применять алгоритм распознавания карты звездного неба ко всем фотографиям, это приведет к

большой трате ресурсов, а время, необходимое для процесса распознавания, не будет соответствовать требованиям быстрого распознавания в режиме отслеживания.

В соответствии с описанным выше процессом метода распознавания звездной карты по угловому расстоянию вносятся соответствующие улучшения в режим отслеживания. В частности, временный набор данных цепочки угловых расстояний S' генерируется на основе предыдущей фотографии звездного неба, а затем в соответствии с тем же процессом строится сопоставление между наблюдаемой звездой S и S' на следующей фотографии и, наконец, определяется соответствующая связь $\hat{S}^*$ между S и $\hat{S}$.

Для решения задачи определения положения летательного аппарата можно использовать метод разложения SVD [14]. Например, если исходные координаты сопоставленных звездных точек в системе координат звездного датчика обозначены как P_1 , то:

$$P_1 = \{p_1, p_2, \dots, p_n, \dots\}.$$

Аналогично координаты после перемещения обозначены как P_2 ,

$$P_2 = \{p_1', p_2', \dots, p_n', \dots\}.$$

Матрицу вращения в системе координат звездного датчика H можно получить путем сингулярного разложения:

$$H = P_2 P_1^T.$$

Пусть:

$$(U, V) = \text{svd}(H),$$

где U и V — левый и правый сингулярные векторы матрицы H .

Тогда получим требуемую матрицу вращения летательного аппарата R ,

$$R = UV^T.$$

Этот метод позволяет определить угловую скорость летательного аппарата, используя только звездный датчик, без необходимости использования инерциального навигационного устройства.

Экспериментальная проверка

С помощью платформы моделирования цифровой карты звездного неба проводится проверочное испытание разработанного алгоритма. В качестве аппаратного обеспечения для моделирования используется обычный процессор с тактовой частотой 2,2 ГГц. Положение летательного аппарата в пространстве определяется по заданной траектории полета с высокой маневренностью с использованием метода распознавания звездной карты по цепочке угловых расстояний.

Как показано на рис.1, α , β и γ — это три угла Эйлера летательного аппарата в процессе моделируемого полета, а именно угол тангажа, угол крена и угол рыскания.

Что касается времени отклика, то в режиме «Потерян в космосе» он может выполнить поиск и идентификацию на основе базы данных звездной карты всего неба в течение 0,02 секунды. В режиме отслеживания время распознавания значительно сокращается до уровня миллисекунд.

Согласно предварительным экспериментальным результатам, распределение ошибок, полученных при идентификации, относительно стабильно при различных маневрах летательного аппарата, а максимальная ошибка не превышает $0,035^\circ$. Это предварительно проверяет эффективность алгоритма и имеет возможность дальнейшей оптимизации.

Отклонение углов Эйлера (°)

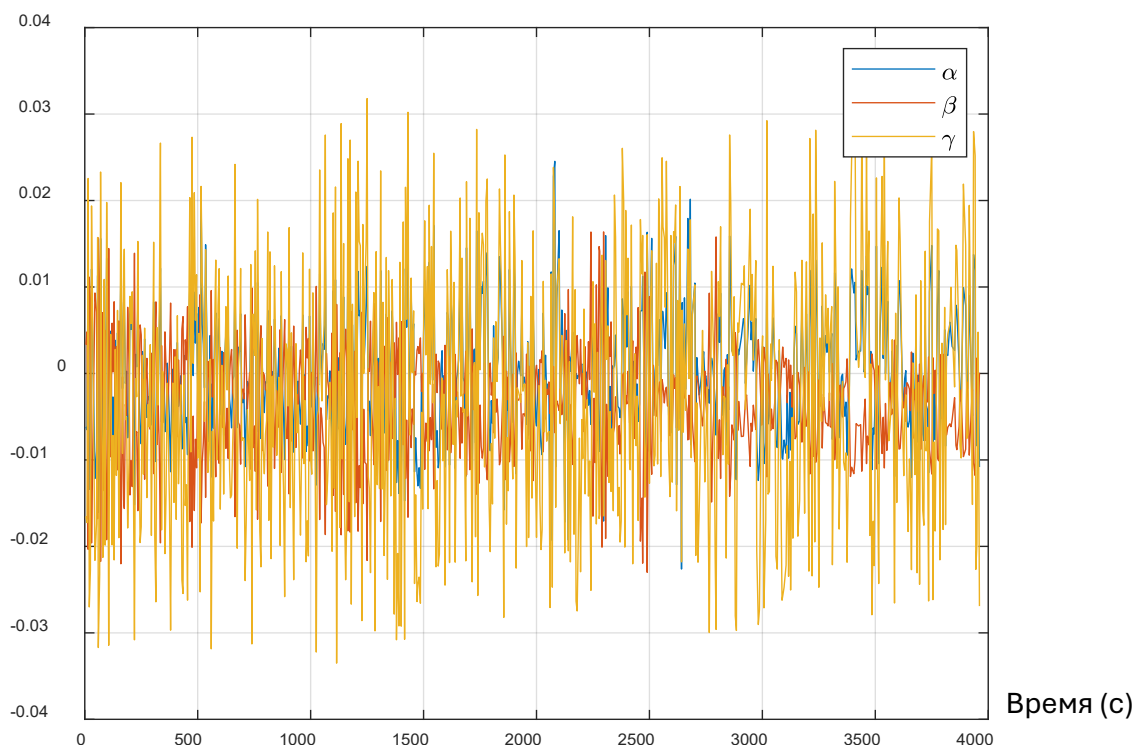


Рис. 1. – Значения отклонения по углам Эйлера

Заключение

Предложенный алгоритм отслеживания цепочки угловых расстояний без использования звездной библиотеки демонстрирует значительную эффективность и меньшие вычислительные затраты по сравнению с аналогами. Его основное отличие от традиционных алгоритмов заключается в том, что он не требует информации от фиксированной библиотеки звезд, а реализуется с помощью механизма динамического сопоставления цепей, обеспечивая ключевую техническую поддержку для проектирования следующего поколения недорогих и легких звездных датчиков. Возможно, что в будущем, при реализации технологии комплексирования данных от нескольких источников, эта технология станет одним из решений для

исследования дальнего космоса, околоземных спутниковых кластеров и вспомогательных систем определения ориентации космических станций.

Литература (References)

1. Gai, E., Daly, K., Harrison, J. et al. Star-sensor-based satellite attitude/attitude rate estimator // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 1985. – V. 8. – №. 5. – pp. 560-565.
2. Liang B., Zhu H., Zhang T. et al. Current situation and development trends of star sensor technology // Chinese Optics. – 2016. – V. 9. – №. 1. – pp. 16-29.
3. Ketchum E. A., Tolson R. H. Onboard star identification without a priori attitude information // Journal of Guidance, Control, and Dynamics. – 1995. – V. 18. – №. 2. – pp. 242-246.
4. Zhang G. Star identification // National Defense Industry Press: Beijing, China. – 2011. – P. 109.
5. Mortari D., Neta B. K-vector range searching techniques // Spaceflight mechanics 2000. – 2000. – pp. 449-463.
6. Shuster M. D., Oh S. D. Three-axis attitude determination from vector observations // Journal of guidance and Control. – 1981. – V. 4. – №. 1. – pp. 70-77.
7. Jiang, J., Zhang, G. J., Wei, X. et al. Rapid star tracking algorithm for star sensor // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. – 2009. – V. 24. – №. 9. – pp. 23-33.
8. Kim K. An Improved Angular Rate Estimation using Only Star Sensor Measurement // IEEE Sensors Journal. – 2024. – V. 24. – №. 10. – pp. 16440 - 16449
9. Gottlieb D. M. Star identification techniques // Spacecraft Attitude Determination and Control. – 1978. – pp. 259-266.

10. Cole C. L., Crassidis J. L. Fast star-pattern recognition using planar triangles //Journal of guidance, control, and dynamics. – 2006. – V. 29. – №. 1. – pp. 64-71.
11. Mortari, D., Samaan, M. A., Bruccoleri, C. et al. The pyramid star identification technique //Navigation. – 2004. – V. 51. – №. 3. – pp. 171-183.
12. Kosik J. C. Star pattern identification aboard an inertially stabilized aircraft //Journal of guidance, control, and dynamics. – 1991. – V. 14. – №. 2. – pp. 230-235.
13. Schiattarella V., Spiller D., Curti F. A novel star identification technique robust to high presence of false objects: The multi-poles algorithm //Advances in space research. – 2017. – V. 59. – №. 8. – pp. 2133-2147.
14. Liu, Y., Yu, R., Xiong, Z. et al. Research on Algorithms for Multi-Vector Attitude Determination //Mathematical Problems in Engineering. – 2022. – V. 2022. – №. 1. – pp. 6137308.

Дата поступления: 23.04.2025

Дата публикации: 29.05.2025