

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА РЕЛЬЕФОМЕТРИЧЕСКОЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ

Наталья Владимировна ПАВЛОВА родилась в городе Москве. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области проектирования сложных измерительно-вычислительных комплексов на базе методов оптимизации, искусственного интеллекта и компьютерного моделирования. Автор более 130 научных работ.

Natalia V. PAVLOVA, D.Sci., was born in Moscow. She is a Professor at the MAI. Her research interests are in design of complex measuring and computing systems based on optimization, artificial intelligence and computer simulation techniques. She has published over 130 technical papers.

Максим Дмитриевич ФРОЛОВ родился в 1979 г. в городе Москве. Начальник лаборатории ФГУП ЦНИИАГ. Аспирант МАИ. Основные научные интересы — в области проектирования бортовых измерительно-вычислительных комплексов и компьютерного моделирования. Автор 9 научных работ.

Maxim D. FROLOV, was born in 1979, in Moscow. He is the Head of a Laboratory at the Central Research Institute for Automatics and Hydraulics (TsNIIAG). He is working also toward Ph.D. degree at the MAI. His research interests include design techniques for embedded measuring and computing systems and computer simulation. He has published 9 technical papers.

Исследуется возможность применения корреляционно-экстремальных навигационных систем на базе рельефометрической оптико-электронной системы для высокоточного и надежного определения местоположения летательного аппарата. Предложен способ определения местоположения летательного аппарата на основе информации о поле рельефа, формируемой с помощью оптического поля подстилающей поверхности. Приведены результаты моделирования, подтверждающие достаточную надежность предлагаемого способа.

Определение местоположения летательного аппарата (ЛА) — задача, занимающая в современном авиастроении первостепенную позицию. Все более возрастающие требования к скоростям, диапазонам высот, маневренности, предъявляемые к современным и перспективным ЛА, как пилотируемым, так и беспилотным, делают невозможным эксплуатацию ЛА без сверхточной и сверхнадежной навигационной системы [1]. Традиционно на борту ЛА роль такой системы выполняла инерциальная навигационная система (ИНС) на основе гироскопических элементов [2]. Для увеличения точности определения местоположения и устранения

накапливаемой погрешности ИНС необходимо корректировать на всем протяжении движения ЛА. Наиболее перспективными и динамично развивающимися системами для решения задачи корректировки ИНС являются системы спутниковой навигации (СНС) и корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС).

СНС относятся к классу многопозиционных радионавигационных систем и предназначены для определения пространственного местоположения объекта [3]. Определение местоположения ЛА с помощью СНС основано на определении дальности до некоторого количества спутников (3—4) с заранее

известным местоположением на искомый момент времени. Такой способ позволяет достаточно точно и надежно определить координаты ЛА, но обладает рядом существенных недостатков. Внедрение и содержание группировки спутников весьма дорогостояще, а без собственной группировки отсутствует возможность использования такой системы в военной авиации. Еще одним существенным недостатком является невозможность работы на участках с неустойчивой пеленгацией спутников и невозможность заранее определить такие участки.

КЭНС строят свою работу на заранее известной информации об участках маршрута ЛА (эталонная информация) [4–6]. Получая информацию о поле подстилающей поверхности от датчиков (текущая информация), КЭНС при помощи корреляционно-экстремальных методов определяет взаимное положение текущего и эталонного полей. Таким способом КЭНС определяет текущую погрешность ИНС. На сегодняшний день известны КЭНС на основе оптико-электронных (ОЭС) и радиолокационных систем (РЛС) как отечественных, так и зарубежных производителей. К наиболее существенным недостаткам КЭНС на базе ОЭС следует отнести изменчивость поля подстилающей поверхности, связанную с сезонными изменениями оптического поля Земли. Главным недостатком КЭНС на базе РЛС является недостаточная точность и надежность при построении поля текущей подстилающей поверхности.

Для улучшения точности и надежности КЭНС на сегодня можно выделить следующие пути развития существующих систем:

- разработка КЭНС на базе ОЭС, работающей по устойчивому полю рельефа подстилающей поверхности;
- разработка КЭНС на базе лазерных локационных станций (ЛЛС).

Разработка КЭНС на базе ЛЛС безусловно является перспективным направлением исследований, но требует больших финансовых затрат и связана с применением сверхсовременной элементной базы и весьма наукоемких технологий. Следует также отметить, что на сегодняшний день известно только об опытных и проектируемых образцах ЛЛС с требуемыми характеристиками.

Разработку КЭНС на основе рельефометрической оптико-электронной системы (РОЭС) возможно выполнить на основе существующих ОЭС и успешно зарекомендовавших себя алгоритмов корреляционно-экстремального поиска.

При создании КЭНС на базе РОЭС необходимо решить следующие основные задачи:

- формирование эталонного поля рельефа подстилающей поверхности;
- формирование текущего поля рельефа подстилающей поверхности;
- определение взаимного положения этих полей.

На сегодняшний день может быть сформирована на оптическая информация о любом участке земной поверхности. Своевременные снимки с различных ракурсов менее чем метрового разрешения интересующего участка предоставляет через Internet система Google Earth [7]. Задача формирования рельефа по перспективным снимкам с использованием стереопары известна и успешно решается как отечественными, так и зарубежными учеными [8]. Аналогичную информацию можно получить с отечественных спутников, ведущих оптическую съемку земной поверхности.

Альтернативным вариантом для формирования эталонного поля рельефа подстилающей поверхности могут послужить высокоточные радиолокационные снимки, полученные по программе SRTM с космического корабля «Shuttle». Запущенный в 2007 г. немецкий спутник TerraSAR-X позволяет получать радиолокационные снимки любого участка земной поверхности с менее чем метровым разрешением [9]. В отличие от оптической съемки, радиолокационная съемка не зависит от погодных условий — срок заказа на получение информации о требуемом участке сокращается до суток. Еще одно преимущество формирования эталонного поля на основе радиолокационных изображений — отсутствие необходимости обработки изображений.

Таким образом, используя оптические снимки и стереопару или радиолокационные изображения, можно сформировать практически для любого заданного участка эталонное поле рельефа подстилающей поверхности.

Рассмотрим задачу формирования текущего поля рельефа подстилающей поверхности. Основным источником информации об истинной высоте полета на борту существующих ЛА является радиовысотомер. Он выдает информацию только о профиле рельефа подстилающей поверхности и для построения высокоточного поля рельефа без существенных доработок использоваться не может. В отличие от радиовысотомера ОЭС предоставляет информацию об оптическом поле, которое можно преобразовать в поле рельефа требуемой точности. Получить поле рельефа подстилающей поверхности позволяет алгоритм определения истинной высоты полета, разработанный авторами [10].

Для реализации данного алгоритма используется ОЭС, в состав которой входят два жесткозакреплен-

ных оптических датчика, направленных под различными углами к земной поверхности. Один из датчиков производит плановую съемку подстилающей поверхности, другой — перспективную. Оба оптических датчика построены на базе ПЗС-матриц. ОЭС непрерывно формирует плановое и перспективное изображение подстилающей поверхности. Оба формируемых изображения используются в качестве входных данных при корреляционно-экстремальном поиске.

Перспективное и плановое изображения подстилающей поверхности, полученные с оптических датчиков, подвержены различным искажениям и помехам [11, 12], которые влияют на точность и надежность корреляционно-экстремального поиска. Для уменьшения негативного влияния искажений необходимо произвести предварительную обработку этих изображений — приведение исходных данных к бинарным векторам [13, 14].

Пусть в некоторый известный момент времени искомым фрагмент местности получен на перспективном изображении (рис. 1).

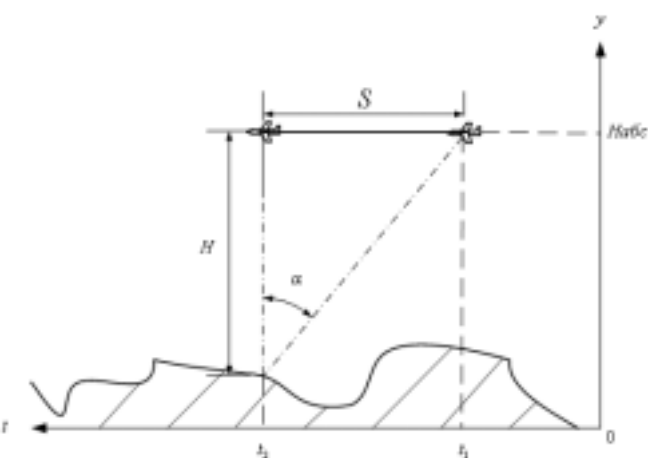


Рис. 1. Определение истинной высоты полета

С помощью корреляционно-экстремального топологического поиска определяется момент времени t_2 — время получения искомого фрагмента местности на плановом изображении. При достаточно малом интервале времени ($t_2 - t_1$) движение ЛА в рамках этого интервала приближается к прямолинейному. Расстояние (S), пройденное ЛА за время ($t_2 - t_1$), рассчитывается с использованием информации о путевой скорости $V(t)$. С допустимой точностью путевая скорость определяется при помощи доплеровского измерителя скорости и угла сноса.

Истинная высота полета H определяется из прямоугольного треугольника, катетами которого являются S и H :

$$H = \int_{t_1}^{t_2} \frac{V(t)}{\operatorname{tg} \alpha} dt,$$

где α — угол закрепления оптического датчика.

Таким способом формируется профиль рельефа подстилающей поверхности. При использовании оптических датчиков на ПЗС-матрице с шириной, превышающей ширину искомого фрагмента, поле рельефа подстилающей поверхности формируется при циклическом перемещении искомого фрагмента вдоль всей ширины ПЗС-матрицы. Современные ПЗС-матрицы обладают достаточно высоким разрешением и позволяют создавать текущее поле рельефа подстилающей поверхности с разрешением, достаточным для высокоточного определения местоположения ЛА.

Сформировав текущее поле рельефа, необходимо определить расположение искомого фрагмента на текущем и эталонном поле, определить реальное местоположение ЛА и произвести коррекцию ИНС. Определение положения искомого фрагмента на сформированных полях производится также на основе корреляционно-экстремального топологического поиска.

Для увеличения устойчивости работы метода корреляционно-экстремального топологического поиска [6] используются сформированные из изображений бинарные векторы.

Идентичность бинарных векторов одного размера оценивается при помощи меры близости Хемминга, формируемой как расстояние между бинарными векторами:

$$d = \sum_{r=0}^M \sum_{c=0}^N |b_1[r, c] - b_2[r, c]|,$$

где $b_1[r, c]$, $b_2[r, c]$ — векторы бинарных признаков; $M \cdot N$ — размер этих векторов.

При минимальном значении ($d = 0$) фрагменты являются идентичными, а при максимальном ($d = M \cdot N$) — полностью инвертированными. Для рассматриваемого случая мера близости Хемминга носит случайный характер, и можно считать, что она подчиняется нормальному закону распределения [15]. Матрица мер близости Хемминга формируется при сравнении искомого фрагмента текущего поля со всеми возможными фрагментами такого же размера на эталонном поле. При сравнении похожими считаются фрагменты изображений, мера близости которых попадает в интервал достоверности нормального закона распределения. Таким образом, определяется взаимное расположение одинаковых фрагментов текущего и эталонного полей.

Так как разрешение элемента поля известно, теперь можно рассчитать отклонения показаний ИНС и сформировать необходимые значения для ее коррекции.

Современные бортовые вычислительные мощности способны в реальном времени проводить обработку изображений, формировать текущее поле рельефа и осуществлять корреляционно-экстремальный топологический поиск, что в сочетании с новейшими оптическими датчиками на основе ПЗС-матриц делает возможным создание РОЭСК и применение их на ЛА последнего поколения.

Проведено моделирование на типовых участках местности работы КЭНС, использующих результаты измерения различных систем, а именно КЭНС на базе РЛС, КЭНС на базе ОЭС и КЭНС на базе РОЭС. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

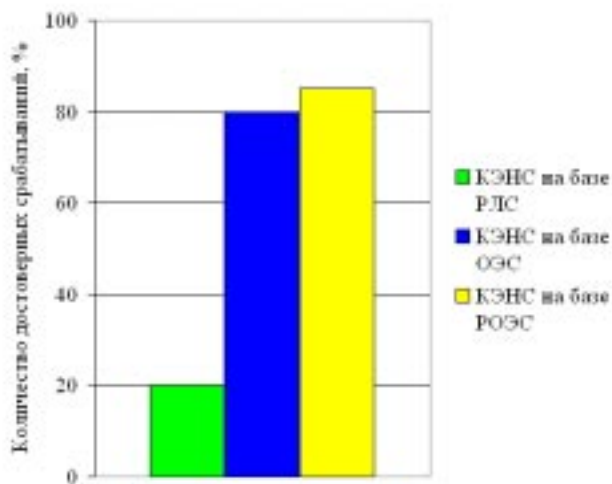


Рис. 2. Диаграмма надежности работы КЭНС

Выводы

Полученные результаты показывают целесообразность использования КЭНС на базе РОЭС для увеличения надежности срабатывания за счет использования поля рельефа подстилающей поверхности.

Summary

A possibility is studied to use an extreme-correlation navigation system basing on relief-metric optoelectronic system for high-precision and robust aircraft positioning. A technique is suggested to evaluate aircraft position using relief information retrieved from optical characteristics of underlying terrain. Simulation data confirm sufficient reliability of the technique.

Библиографический список

1. Машиностроение. Энциклопедия / Ред. совет: Фролов К.В. и др. Самолеты и вертолеты. Т. IV. Проектирование, конструкции и системы самолетов и вертолетов. — М.: Машиностроение, 2004.
2. Воздушная навигация и аэронавигационное обеспечение полетов / Под ред. Н.Ф. Миронова. — М.: Транспорт, 1992.
3. Глобальные радионавигационные системы / ТИИЭР. Тематический выпуск №10. 1983.
4. Белоглазов И.Н., Джанджева Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. — М.: Наука, 1985.
5. Баклицкий В.К., Юрьев А.Н. Корреляционно-экстремальные методы навигации. — М.: Радио и связь, 1982.
6. Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П. Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. — М.: Наука, 1979.
7. <http://www.google.com>.
8. Белоглазов И. Н., Казарин С. Н. Стереоскопическая навигационная система // Известия РАН: Теория и системы управления. 1997. № 6. С. 9—32.
9. <http://www.sovzond.ru>.
10. Метод определения высоты с помощью оптикоэлектронной системы / В.В. Костюков, А.Х. Кутаранов, Н.В. Павлова, М.Д. Фролов // Труды XIII международного научно-технического семинара «Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации». Часть III. — М.: Издательство МГУ, 2004. С. 429-431.
11. Фортсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2004.
12. Шапиро Л., Стокман Д. Компьютерное зрение. — М.: Бином, 2006.
13. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2005.
14. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В.А. Соифера. — М.: Физматлит, 2003.
15. Костюков В.В. Электронная стабилизация изображений в оптических экстремальных системах // Сборник докладов VI-й всероссийской конференции «Проблемы совершенствования робототехнических и интеллектуальных систем летательных аппаратов» / МАИ. Москва. 2002.

Московский авиационный институт
Статья поступила в редакцию 10.10.2007