

УДК 621.396.96

В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Г. Сидоренко

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ЭТАЛОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ

На основе анализа основ построения и функционирования корреляционно-экстремальных систем навигации и современных подходов к синтезу эталонной информации предлагаются новые принципы формирования сложных эталонных изображений, позволяющие обеспечить потенциально высокую точность определения местоположения летательных аппаратов.

Ключевые слова: корреляционно-экстремальная система навигации, эталонное изображение, летательный аппарат.

Введение

Использование технологий технического (машинного) зрения, включая методы теории обработки изображений и распознавания образов, являются одним из перспективных направлений развития систем навигации (наведения) летательных аппаратов (ЛА), способных определять свое местоположение в пространстве на основе сравнения информации, получаемой от датчиков внешней информации (ДВИ) и эталонной информации. Такие системы определяют облик бортовых высокоточных интегрированных систем навигации (наведения) беспилотных маневренных летательных аппаратов (БЛА).

Реализация требований высокой точности определения местоположения БЛА с корреляционно-экстремальными системами навигации (КЭСН) однозначно связана с качеством и параметрами используемых эталонных изображений (ЭИ).

Постановка проблемы. Рассматриваемая в статье проблема обусловлена существующим противоречием между сложившимися упрощенными подходами к формированию ЭИ и необходимостью обеспечения высокой точности и надежности определения местоположения ЛА посредством использования КЭСН.

Анализ последних достижений и публикаций. Общие требования к созданию ЭИ для КЭСН приведены в [1], рассмотрены особенности идентификации структурных описаний линейных признаков радиолокационных и оптических изображений, изложены основные положения по созданию унифицированного эталона. Рассмотрено влияние различных факторов на точность и вероятность правильной привязки. Задача создания унифицированного эталона рассматривается как задача совмещения признаков, общих для оптического и радиолокационного образов.

Принципы обеспечения высокой точности, помехоустойчивости радиометрических КЭСН рас-

смотрены в [2]. Потенциальная точность таких КЭСН при наличии различного рода искажений оценивается по результатам имитационного моделирования.

В [3] рассмотрены требования к формированию и представлению ЭИ. Предложено формировать ЭИ на основе цифровых моделей местности (ЦММ). Однако это требует использования средств обработки информации и построения ЦММ с достаточно высокой производительностью. Такие средства могут быть основой для построения системы подготовки полетных заданий.

Задача построения ЦММ должна решаться в совокупности с методами структурного анализа изображений, выделения слоев и описания объектов. Методы структурного анализа изображений для создания ЭИ [4–7] также требуют достаточно больших вычислительных ресурсов, что ограничивает их применение участками, на которых необходимо решение задач поиска и идентификации целей.

Использование ЦММ позволяет поднять на качественно новый уровень решение задачи синтеза ЭИ как на этапе заблаговременной подготовки полетных заданий, так и при необходимости изменения маршрута в процессе движения ЛА.

При обосновании требований и формировании ЭИ с использованием различных подходов в основном рассматривается вариант простых эталонов. Не зависимо от источника эталонной информации ЭИ представляется в виде двумерного изображения прямоугольной (квадратной) формы. Это прежде всего обусловлено стремлением максимально упростить практическую реализацию систем сравнения ЭИ с текущими изображениями (ТИ). Однако существующий в настоящее время прорыв в области цифровой обработки изображений и высокой производительности вычислительных систем позволяет рассмотреть возможность использования эталонных изображений с изменяющимися в процессе наблюдения за поверх-

ностью визирования (ПВ) параметрами. Для снятия ограничений в потенциальной точности определения местоположения ЛА с использованием КЭСН необходима разработка современных методов формирования ЭИ и применение высокопроизводительных систем вторичной обработки.

Целью статьи является разработка принципов формирования сложных ЭИ, удовлетворяющих требованиям высокой точности и надежности автономного определения местоположения ЛА.

Основной материал

КЭСН используется для корректировки ошибок инерционной системы навигации. Для обеспечения работы КЭСН производится измерение высоты ЛА $h_{ЛА}$.

Для реализации высокоточных КЭСН в соответствии с предлагаемыми ниже принципами формирования сложных ЭИ предположим, что ЭИ $\rho(x, y)$ и ТИ $s(x, y)$ – это двумерные цифровые изображения участков ПВ и размерами $N_1 \times N_2$ и $M_1 \times M_2$, соответственно. Кроме этого, удобно считать, что $N_1 \leq M_1$, $N_2 \leq M_2$, т.е. $\rho(x, y) \in s(x, y)$. Эталонные изображения формируются на основе предварительного выделения информативных участков изображений поверхности визирования.

Необходимо на основе анализа сложившихся принципов формирования ЭИ КЭСН ЛА и существующих ограничений рассмотреть возможные пути формирования ЭИ, позволяющие повысить точность и минимизировать вероятность ложной привязки при определении местоположения ЛА в пространстве.

Общие подходы к формированию ЭИ

При формировании ЭИ используются информативные участки изображений поверхности визирования, обладающие заданным набором характерных признаков и расположенные вблизи траектории движения ЛА. В [8] рассмотрены возможные методы локализации информативных участков ПВ и оценена их эффективность и вычислительная реализуемость. Однако выбор и использование наилучших с точки зрения набора и состава характерных признаков ЭИ определяет только одно из направлений повышения точности определения координат ЛА.

Выбор размеров используемых ЭИ определяется возможным наличием аффинных и масштабных искажений. На рис. 1 и 2 приведены зависимости значений логарифмов нормализованного среднего значения пика корреляционной функции (КФ) r (рис. 1) и вероятности ложной привязки $P_{лп}$ (рис. 2) [1] от размеров изображений при наличии масштабных и аффинных искажений $s(x, y)$. Зависимости $10 \lg r$ и $\lg P_{лп}$ от нормализованного размера изображения p приведены для 4 значений интенсивности искажений

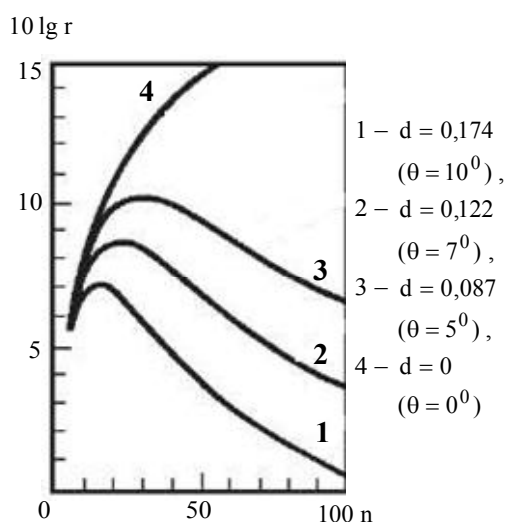


Рис. 1. Зависимость логарифма нормализованного среднего значения пика КФ от размера изображения

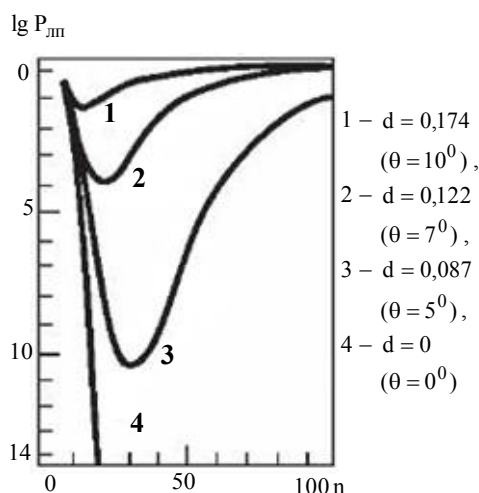


Рис. 2. Зависимость логарифма вероятности ложной привязки от размера изображения

$$d = \sqrt{(1 - \alpha)^2 + \theta^2}, \quad (1)$$

где α – коэффициент изменения масштаба изображения; θ – угол взаимного поворота ЭИ и ТИ.

Из рис 1 и 2 видно, что $10 \lg r$ и $\lg P_{лп}$ улучшаются с увеличением размеров изображений только при отсутствии искажений.

Среднеквадратические ошибки (СКО) совмещения ТИ и ЭИ в точке (x_0, y_0) определяются крутизной пика корреляционной функции $r(x_0, y_0)$ в области максимума, которые при выполнении условия независимости ошибок совмещения ЭИ и ТИ на плоскости xOy описывается выражениями

$$\sigma_x = \sqrt{-1 / \frac{\partial^2 r(x_0, y_0)}{\partial x^2}}, \quad (2)$$

$$\sigma_y = \sqrt{-1 / \frac{\partial^2 r(x_0, y_0)}{\partial y^2}}. \quad (3)$$

Из анализа рис. 1, 2 и выражений для СКО (2) и (3) следует, что обеспечение высокой точности местоопределения требует увеличения размеров ЭИ, однако обеспечение минимальных СКО возможно только в случае отсутствия геометрических искажений (1) в работе КЭСН.

Принципы формирования сложных ЭИ

С учетом введенных ранее положений предлагаются следующие принципы формирования ЭИ:

1. Принцип формирования сосредоточенного сложного ЭИ (ССЭИ).

Формирование ССЭИ предлагается для обеспечения высокоточного определения пространственного ЛА над слабоконтрастными участками ПВ, имеющими одну (возможно достаточно большую) локальную информативную область на исходном изображении. Сущность предлагаемого принципа ССЭИ состоит в поэтапном последовательном изменении (как правило, увеличении) размеров ЭИ и иллюстрируется рис. 3. При отсутствии (плохом качестве) априорной информации о пространственном положении и ориентации ЛА том, для устранения геометрических искажений на первом этапе привязки используется ЭИ малых размеров (ЭИ 1), что в соответствии с рис. 1 и 2 обеспечивает минимальные ошибки измерения пространственного положения ЛА и вероятность ложного местоопределения. После уточнения ориентации ЛА в пространстве по ЭИ1 и устранения геометрических искажений размер ЭИ, на последующих этапах привязки увеличивается до размеров ЭИ 2, либо ЭИ 3.

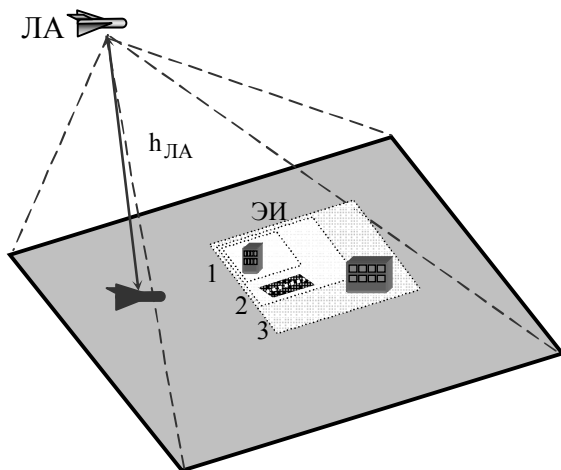


Рис. 3. Принцип формирования сосредоточенного сложного ЭИ

Теоретически максимальный размер ЭИ ($N_1 \times N_2$) после достаточно большого количества привязок может достигать размеров ТИ ($M_1 \times M_2$), однако в случае навигации подвижных объектов ограничения размера ЭИ будут обусловлены:

- временем нахождения информативного участка ПВ в зоне визирования датчиков ЛА;

- размерами информативного участка ПВ;
- мощностью бортовых вычислительных средств;
- накоплением ошибок определения местоположения ЛА инерциальной системой навигации.

Такой принцип формирования ССЭИ может быть рекомендован для определения пространственного положения малоскоростных ЛА, в том числе беспилотных вертолетов, а также баллистических высокотраекторных объектов.

2. Метод формирования многоэлементного распределенного ЭИ (МРЭИ).

Такой принцип формирования ЭИ предлагается применять в случае наблюдения ПВ с изменчивым ландшафтом, либо высокой объектовой насыщенностью, когда в зоне визирования датчиков внешней информации может наблюдаться несколько информативных областей (рис. 4).

Преимуществом МРЭИ, по сравнению с предыдущим, является более высокая устойчивость к искажениям, применению помех и маскировке информативных участков поверхности визирования.

Как и рассмотренный ранее, принцип формирования МРЭИ предполагает предварительное устранение искажений по ЭИ небольшого размера. После устранения искажений и совмещения (пересчета) корреляционных пиков, полученных для каждого по отдельности ЭИ, результирующая точность совмещения элементов МРЭИ и ТИ по любой из координат определяется выражением

$$\frac{1}{\sigma_{\Sigma}^2} = \sum_i \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (4)$$

где σ_i^2 – дисперсии совмещения элементов ЭИ и ТИ по одной из координат на плоскости, i – количество используемых информативных областей исходного изображения.

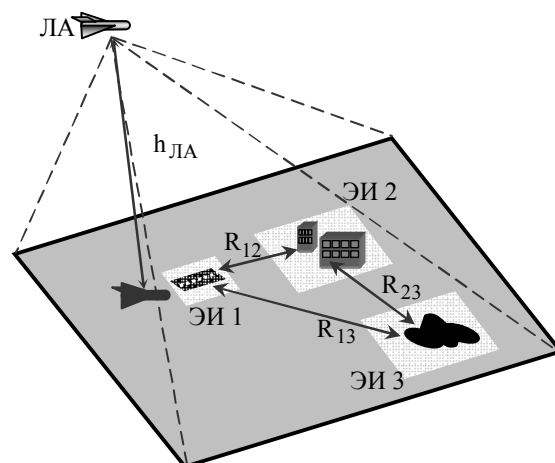


Рис. 4. Принцип формирования многоэлементного распределенного ЭИ

Количество и состав формируемых элементов ЭИ определяется: скоростными и маневренными характеристиками ЛА, возможностями бортовой

вычислительной системы, особенностями полетного задания, характеристиками и расположением информативных областей на ПВ, возможностями применения средств маскировки объектов и постановки помех.

При использовании многоэлементного ЭИ точность измерения местоположения ЛА зависит от геометрии системы ЛА – совокупности ЭИ, что повышает достоверность и точность определения местоположения ЛА. Этому также способствует тот факт, что при создании системы ЭИ взаимные расстояния между ее элементами (R_{12}, R_{13}, R_{23}) известны.

Таким образом, корреляционно-экстремальным системам навигации (наведения), использующим многоэлементные распределенные ЭИ, присущ дополнительный информативный геометрический признак. Учет геометрических свойств системы ЭИ позволяет реализовать потенциально высокую точность определения местоположения ЛА по аналогии с многопозиционными системами радиолокации [9]. Повышение точности обеспечивается определением подобия геометрии системы ЭИ и геометрии расположения корреляционных пиков, полученных в результате поэлементного сравнения ЭИ и ТИ. По результатам геометрического подобия ЭИ и ТИ может быть произведено уточнение как высоты так и пространственных координат ЛА.

Реализация принципов формирования сложных ЭИ в КЭСН предполагает использование систем вторичной обработки, к функциям которой может быть отнесено формирование совокупности ЭИ с заданным набором характерных признаков непосредственно на борту ЛА, в соответствии с его пространственным положением и параметрами движения.

Выводы

Предлагаемые принципы формирования ЭИ, в отличие от одноэлементных ЭИ, позволяют обеспечить улучшение показателей качества определения положения ЛА в пространстве за счет использования сложных эталонных изображений, более качественного учета фоновно-объектового состава поверхности

визирования и использования дополнительного геометрического признака «система ЭИ – ЛА». Для практической реализации методов формирования эталонных изображений необходимо применение высокопроизводительных бортовых вычислительных комплексов, реализующих операции сравнения текущих и сложных эталонных изображений, а также вторичную обработку полученной навигационной информации.

Список литературы

1. Баклицкий В.К. Корреляционно-экстремальные методы навигации и наведения / В.К. Баклицкий. – Тверь: ТО «Книжный клуб», 2009. – 360 с.
2. Антюфеев В.И. Сравнительный анализ алгоритмов совмещения изображений в корреляционно-экстремальных системах навигации летательных аппаратов / В.И. Антюфеев, В.Н. Быков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – №1(48). – С. 70-74.
3. Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных летательных аппаратов / К.К. Веремеенко, С.Ю. Желтов, Н.В. Ким и др.; под. ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.
4. Пытьев Ю.П. Морфологические методы анализа изображений / Ю.П. Пытьев, А.И. Чуличков. – М.: Физматлит, 2010. – 336 с.
5. Serra J. *Image Analysis and Mathematical Morphology* / J. Serra. – L.: Academic Press, 1982. – 621 p.
6. Serra J. *Introduction to mathematical morphology* / J. Serra // *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. – 1986. – V. 35, no. 3. – P. 283-305.
7. Визильтер Ю.В. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко и др. – М.: Физматкнига, 2010. – 672 с.
8. Таршин В.А. Обоснование применения методов фрактального анализа для оперативной подготовки эталонных изображений / В.А. Таршин, А.М. Сотников, Р.Э. Пащенко // *Системы обробки інформації*. – X. : ХУПС, 2014. – № 1 (117). – С. 62–66.
9. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ Под ред. Я. Д. Ширмана.-М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.

Поступила в редколлегию 14.05.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Д. Карлов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ПРИНЦИПИ ФОРМУВАННЯ СКЛАДНИХ ЕТАЛОННИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ВИСОКОТОЧНИХ КОРЕЛЯЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИСТЕМ НАВІГАЦІЇ

В.А. Таршин, О.М. Сотников, Р.Г. Сидоренко

На основі аналізу основ побудови та функціонування кореляційно-екстремальних систем навігації й сучасних підходів к синтезу еталонної інформації пропонуються нові принципи формування складних еталонних зображень, які дозволять забезпечити потенціально високу точність визначення місцезнаходження літальних апаратів.

Ключові слова: кореляційно-екстремальна система наведення, еталонне зображення, літальний апарат.

THERE ARE FORMATION PRINCIPLES OF COMPLEX IMAGES REFERENCE FOR PRECISION CORRELATION-EXTREME NAVIGATION SYSTEMS

V.A. Tarshyn, A.M. Sotnikov, R.G. Sydorenko

The article suggests new principles for forming complex images reference which is based on analysis of the basics building and operation of correlation-extreme navigation systems and modern approaches to the synthesis of reference information. It is will be able to provide potentially high precision positioning of aircraft.

Keywords: correlation-extreme navigation system, the reference image, the aircraft.