

Аналогичным образом могут быть получены погрешности воспроизведения размеров по осям Y и Z :

$$\Delta y = \frac{\Delta B_0(x, y, z)}{G_y} + \left(1 - \frac{B_{G_y}(x, y, z)}{G_y y}\right) y;$$

$$\Delta z = \frac{\Delta B_0(x, y, z)}{G_z} + \left(1 - \frac{B_{G_z}(x, y, z)}{G_z z}\right) z.$$

Используя фактические значения индукции основного поля B_{0M} и градиента B_{xM} в исследуемой точке M , получим окончательное выражение для погрешности воспроизведения размера по оси X :

$$\Delta x = (P_{0M} - 1)B_0/G_x + (1 - P_{xM})x,$$

где $P_{0M} = (B_M - B_0)/B_0$ — относительная погрешность воспроизведения основного поля в точке M ; $P_{xM} = (B_{xM} - G_x x)/G_x x$ — относительная погрешность создания градиентного поля по оси X в точке M .

Аналогичным образом могут быть получены погрешности воспроизведения размеров по осям Y и Z :

$$\Delta y = (P_{0M} - 1)B_0/G_y + (1 - P_{yM})y;$$

$$\Delta z = (P_{0M} - 1)B_0/G_z + (1 - P_{zM})z,$$

где коэффициенты P_{yM} и P_{zM} аналогичные погрешности градиентных систем по осям Y и Z .

УДК 623.64:623.74

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА КАРТОГРАФИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ НАВИГАЦИИ ПИЛОТИРУЕМЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

П.П. Парамонов, Ю.А. Ильченко, И.О. Жаринов

Рассматривается одна из насущных проблем навигации пилотируемых летательных аппаратов — навигация по геофизическим картам местности. Приводится сравнительный анализ современных математических методов формирования косвенного описания картографических изображений, их достоинства и недостатки при решении задач авиационной индикации. Изложены подходы к использованию многомерных ортогональных преобразований изображения, аппарат статистической теории распознавания образов. Сформулированы выводы на основе анализа методик обработки изображения по выбранным показателям качества (точности, быстродействию, габаритам и энергопотреблению). Эффективными признаны методы статистической теории распознавания образов.

Сложность задач управления пилотируемыми летательными аппаратами привела к значительному увеличению уровня требований, предъявляемых к современным бортовым средствам навигации. Так, использование астрономических систем нередко ограничивается метеоусловиями и высотой полета, радиотехнические и радиолокационные системы снижают показатели помехозащищенности, скрытности и автономности работы и т.д. Особый интерес в последнее время получили системы навигации по геофизическим полям. Физические поля Земли, используемые в навигации пилотируемых летательных аппаратов (ЛА), подразделяются, как известно [1, 2], на два класса:

Коэффициенты P_{0M} , P_{xM} , P_{yM} и P_{zM} постоянны для стабильных сверхпроводящих магнитных систем и могут быть определены с помощью калибровочных поверочных образцов (деталей из непроводящих материалов). Поправочные коэффициенты должны быть меньше основных параметров: коэффициенты P_{0M} , P_{xM} , P_{yM} и P_{zM} не должны превышать предельных значений, при которых разрушается изображение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. РФ 1404800. Способ измерения геометрических параметров деталей // Изобретения.
2. Иванов В.А., Неронов Ю.И., Вольняк К. К оценке рациональных параметров и времени накопления в ЯМР-томографии // Приборостроение. 1990. Т. 33. № 3.
3. Парамонов П.П., Галайдин П.А., Юраков В.С. Влияние формы вырезающего градиента при селективном выделении слоя в ЯМР-томографе // Научное приборостроение. 1996. Т. 6. № 1.
4. Парамонов П.П., Рахматов М., Юраков В.С. Генератор периодических сигналов специальной формы // Научное приборостроение. 1996. Т. 6. № 2.

Павел Павлович Парамонов — канд. техн. наук, директор—главный конструктор ОКБ «Электроавтоматика».

сотомеров и локаторов, либо пассивное зондирование посредством высотомеров и оптических визиоров. Пространственные поля, определяемые в трехмерном пространстве, измеряются на борту летательного аппарата магнитооптической и гравиметрической аппаратурой.

Поверхностные поля, доступные для контроля с летательных аппаратов, имеют место лишь над сухопутной территорией Земли. Пространственные же поля присутствуют над всей поверхностью Земли. Различные по своей физической природе геофизические поля обладают различной информативностью, помехозащищенностью, стабильностью во времени, зависимостью от метеоусловий [1, 2].

Одним из основных вопросов, определяющих возможность практического использования тех или иных физических полей в целях навигации, являются наличие карт поля и возможность пополнения этой информации. Поле теплового и радиолокационного контрастов допускают составление приближенных карт с помощью синтеза по аэрокосмическим фотоснимкам и заранее подготовленным картам кажущихся температур, а также коэффициентов отражения земных покровов.

Сопоставление поверхностных полей позволяет выделить в качестве основного поля для навигации над участками земной поверхности поля рельефа местности, характеризующиеся высокими значениями всех показателей, определяющих его практическую применимость. Поле рельефа Земли характеризуется взаимным расположением высот (перепадов местности) относительно какого-то начального уровня в выбранной системе координат. Особенности поля рельефа местности как навигационного поля являются [1, 2]:

- высокая стабильность и живучесть;
- относительно хорошая изученность и картографическая обеспеченность в виде топографических карт;
- возможность создания высокопроизводительных систем картообеспечения.

Развивающаяся в настоящее время геометрия рельефа основывается на представлении о земной поверхности как о распределении поля высот. Наиболее распространенным изображением поля высот на плоской поверхности (карте) является изображение в виде изолиний высот, получивших название горизонталей. Этот способ изображения позволяет получить количественную информацию о рельефе, то есть содержит черты образности. Оцифровка горизонталей определяет информацию о величине перепада высот рельефа вдоль любого направления движения.

Бортовой навигационный комплекс современного летательного аппарата весьма сложен. При решении задач индикации текущих значений координат и выработки корректирующих сигналов выполняется большое количество разнородных операций. Режим работы навигационной системы пилотируемого летательного аппарата, когда ее выходные сигналы не используются для управления движением летательного аппарата, получил название индикаторного режима [1, 2]. Индикаторный режим осуществляется в течение более или менее

длительного времени, например, при поисковом облете заданного района. В этом случае нет необходимости точно придерживаться заранее намеченной траектории, и управление летательным аппаратом может осуществляться на основе угловой стабилизации и стабилизации высоты. Отображение картографической информации о земной поверхности в индикаторном режиме полета летательного аппарата производится на экране многофункционального цветного индикатора МФИ, входящего в состав бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО).

К навигационной системе предъявляется большое число разнородных требований [1, 2]:

- большая дальность действия, определяемая величиной радиуса действия ЛА;
- высокая точность определения координат местоположения ЛА и составляющих вектора его скорости;
- возможность автономной работы ЛА (без связи с Землей);
- малые вес, габаритные размеры и энергопотребления;
- высокая надежность работы.

При определении алгоритмов преобразования данных и путей их реализации в вычислительной машине БЦВМ следует, вообще говоря, принимать во внимание все требования. Между некоторыми из них необходимо искать разумный компромисс. В частности, повышение точности обычно приводит к снижению надежности и требует увеличения веса и габаритных размеров. Однако, в дальнейшем основным считается требование возможно большей точности, остальные требования учитываются лишь косвенно: если оптимальные алгоритмы обработки данных оказываются слишком сложными, то определяются их более простые приближенные выражения, при которых облегчается практическая реализация. Повышение точности навигационных систем пилотируемых ЛА в целом может быть реализовано за счет прогресса по двум составляющим:

- совершенствование самих навигационных приборов и расширение состава БРЭО;
- улучшение качества обработки данных.

Первый путь улучшения качества навигационных систем является, как правило, основным, однако не всегда возможным и оптимальным.

В основе современных бортовых систем индикации и навигации ЛА используется принцип отображения картографической информации о рельефе местности земной поверхности на основе статистического кодирования фрагментов изображения. Дело в том, что области земной поверхности со сложным рельефом не поддаются аппроксимации функциональными зависимостями. Методы математического описания таких областей вытекают из представления о рельефе как о случайном распределении поля высот. Часто полагают [1, 2], что поле рельефа, как и любое другое геофизическое поле, имеет случайное распределение в пространстве (на двумерной плоскости). Однако в каждой заданной точке интенсивность стационарного во времени геофизического поля является детерминированной величиной.

Статистические характеристики подобных полей могут быть получены, строго говоря, только с привлечением некоторого вероятностного механизма. Таким механизмом, в частности, может быть случайное распределение точек (x, y) в области S на заданной поверхности, характеризующее соответствующей функцией плотности вероятности $p(x, y)$.

Любая система, предназначенная для передачи и (или) воспроизведения изображения, вносит искажения и помехи, так что репродукция всегда отличается от оригинала. Помехи, вносимые системой, накладывают принципиальные ограничения на возможности коррекции воспроизводимых изображений [3]. При проектировании системы задаются тем или иным критерием качества, в рамках которого производится оптимизация параметров. Успешность оптимизации в значительной степени зависит от того, насколько удачно выбраны модели источника передаваемой информации (ансамбля передаваемых изображений) и получателя, которым может быть наблюдатель (особенности навигационных систем беспилотных [1, 2] летательных аппаратов в настоящей работе не рассматриваются). Существенную роль при этом играют принятые допущения и аппроксимации, так как в конечном счете ими определяются точность и трудоемкость расчетов.

Избыточность картографического изображения обусловлена значительной корреляционной связью между яркостями смежных растровых элементов, которая проявляется в том, что основная площадь карты занята полями, имеющими постоянную или мало изменяющуюся яркость, в то время как на мелкие детали и резкие световые переходы приходится лишь незначительная ее часть. В основе первых методов статистического кодирования картографических изображений были положены следующие принципы [3]:

- поэлементное статистическое кодирование, при котором наиболее вероятным значениям яркости приписываются кодовые комбинации наименьшей длины, и наоборот;
- кодирование с учетом значения яркости предшествующего элемента, при реализации которого используется наличие сильных статистических связей между яркостями смежных растровых элементов, что позволяет при передаче наиболее вероятных переходов использовать наиболее короткие кодовые комбинации, а при передаче маловероятных переходов — более длинные;
- кодирование длин серий, при использовании которого передается код яркости растрового элемента, стоящего в начале серии элементов, имеющих одну и ту же яркость, а также код, содержащий информацию о длине этой серии (числе растровых элементов, из которых она состоит).

В качестве кодов переменной длины возможно использование кода Шеннона-Фана или кода Хаффмана.

Существенным недостатком этих методов являются: малая эффективность сжатия, низкая помехоустойчивость и сложность реализации, связанная с необходимостью использования кодов переменной длины, а, следовательно, и буферную память большей емкости. Однако, исследование данных методов

показало потенциальную возможность сжатия картографической информации для БРЭО.

Гораздо более эффективными в настоящее время считаются методы статистического кодирования картографической информации на основе ортогональных преобразований [3]. Отличительная особенность данного класса методов заключается в том, что кодируется и передается по каналу связи не само изображение (то есть последовательность растровых элементов, на которые оно разлагается), а значения коэффициентов, получающихся при ортогональном преобразовании этого изображения, совокупность которых получила название трансформанты изображения.

В случае преобразования Фурье трансформанта изображения представляет собой обычный двумерный спектр изображения. В процессе ортогональных преобразований изображения, имеющего сильные корреляционные связи между соседними элементами, происходит процесс декорреляции, так как значения коэффициентов трансформанты оказываются практически некоррелированными. В отличие от исходного фрагмента картографического изображения, для которого характерно в среднем равномерное распределение энергии между растровыми элементами, распределение энергии между элементами (коэффициентами) трансформанты резко неравномерно. Основная доля энергии приходится на элементы трансформанты с малыми номерами (низкие частоты) и лишь небольшая ее часть — на прочие.

В дальнейшем элементы трансформанты, имеющие малую амплитуду, либо вообще опускаются (усекаются), либо квантуются на малое число уровней, что позволяет использовать малое число разрядов кода для их передачи. Не трудно видеть, что в результате применения ортогонального преобразования картографической информации, цветовое распределение растров карты по полю может быть эквивалентно представлено вектором весовых коэффициентов трансформанты в выбранном базисе функций разложения. Очевидно, что точность передачи фрагмента картографического изображения в этом случае прямо пропорциональна размерности вектора коэффициентов трансформанты.

Преобразование Фурье, как известно, не лучшее и уж тем более не единственное ортогональное преобразование, которое может быть применено в бортовых системах сжатия и передачи картографической информации в БРЭО. Наиболее исследованными [3] ортогональными преобразованиями являются:

- дискретное косинусное преобразование;
- дискретное синусное преобразование;
- преобразование Адамара;
- преобразование Хаара;
- преобразование Карунена-Лозва.

Несмотря на то, что все эти преобразования отличаются друг от друга только пространством базисных функций разложения, коэффициент сжатия картографического растра достигает 30 раз.

Методы ортогонального преобразования дискретных растров картографического изображения используются в настоящее время в бортовых системах навигации [1, 2].

В процессе предполетной подготовки ЛА производится формирование вектора коэффициентов трансформанты по известному фрагменту изображения, определяющего распределение высот по полю траектории полета. Далее, вектор коэффициентов трансформанты заносится в память БЦВМ или МФИ.

В процессе полета ЛА процессор, находящийся в БЦВМ или МФИ, производит в реальном масштабе времени обратное ортогональное преобразование с использованием вектора коэффициентов трансформанты, в результате которого восстанавливается исходный фрагмент раstra картографического изображения и его вывод на экран МФИ. Существенным недостатком такого подхода является обязательное использование процессорной платформы, так как процедура обратного ортогонального преобразования требует осуществления значительного количества математических операций умножения реальных чисел. Процессор в этом случае оказывается задействованным в прежде несвойственной ему функции — разрисовке изображения. Большинство индикаторов МФИ на ЖК-панелях, осуществляющих формирование и вывод картографической информации, как правило, выполнены на базе платформы РС104, так как являясь полностью IBM-совместимой, платформа РС104 позволяет взаимоднозначно производить как прямое, так и обратное ортогональное преобразование.

Следует констатировать, что использование методов ортогонального преобразования для решения задач передачи и хранения картографического изображения имеет ряд существенных особенностей: достоинств и недостатков.

Достоинства методов ортогонального преобразования:

- достаточная простота в понимании и алгоритмическом обеспечении на этапе предполетной подготовки ЛА;
- возможность использования процессорных платформ со сравнительно невысоким быстродействием для создания начальной кодовой посылки фрагмента изображения;
- гибкость в выборе пространства базисных функций разложения;
- соответствие исходного и синтезированного изображения из-за однозначности прямого и обратного преобразования.

Недостатки методов ортогонального преобразования:

- зависимость количества передаваемой картографической информации от размерности пространства коэффициентов трансформанты. Появление ложных составляющих изображения вследствие усечения размерности пространства коэффициентов;
- зависимость объема банка памяти для хранения значений коэффициентов трансформанты от разрешающей способности сканирующего устройства;
- обязательное использование процессорной платформы на борту ЛА для выполнения процедуры обратного многомерного ортогонального преобразования;

- причастность процессорной платформы к формированию и выводу картографического изображения;

- невозможность изменения структуры или цветового наполнения картографического изображения математическими методами обработки вследствие однозначности прямого и обратного многомерного ортогонального преобразования;

- влияние качества первичной информации на бумажном носителе на качество формируемой на борту информации;

- масштабирование цифрового картографического изображения возможно лишь с созданием предварительной (возможно избыточной) кодовой посылки, описывающей изображение с более высокой точностью (разрешающей способностью).

Существенно повысить как скорость разрисовки на экране МФИ, так и эффективность сжатия картографической информации представляется возможным с переходом на специализированные сигнальные процессоры и математический аппарат статистической теории распознавания образов [4, 5] при формировании косвенного описания раstra на этапе предполетной подготовки. Использование статистической теории распознавания образов в анализе фрагментов картографических изображений предполагает наличие некоторого алфавита эталонов, формируемого на основе изучения стандартизованного пространства классов конечной размерности, допустимого для описания карт земной поверхности.

В результате такого анализа формируется лингвистическое косвенное описание раstra, как взаимного двумерного пространственного расположения реализаций каждого класса. Гибкость в описании каждого класса и минимизация размерности пространства классов позволит производить эффективное сжатие картографического изображения. Кроме того, согласованность форм каждого из классов изображения с формами зрительного восприятия пилотом картографической информации на экране МФИ оказывается оптимальной при решении задач эргономической безопасности как пилотов, так и полетов в целом.

Таким образом, используя заранее разработанный алфавит пространства классов, исходной информацией для отображения картографической информации оказывается лишь взаимное пространственное расположение реализаций каждого из классов. Процессорная платформа в данном случае выполняет свойственные ей расчетные функции по организации заданного протокола взаимодействия на борту ЛА и не принимает никакого участия в формировании и выводе графического изображения на экран МФИ.

Сравнительный анализ статистических методов кодирования изображения на основе математического аппарата на основе многомерного ортогонального преобразования и методов статистической теории распознавания образов позволяет определить следующие особенности (достоинства и недостатки) методов статистической теории распознавания образов.

Достоинства:

- инвариантность заполнения синтезированного изображения по отношению к исходному дискретному растру;
- возможность создания определенного стандарта в отображении картографической информации на борту ЛА;
- возможность подготовки и вывода на экран МФИ картографического изображения без участия процессорной платформы;
- инвариантность заполнения синтезированного изображения от разрешающей способности сканирующего устройства;
- статистический учет шума пространственной дискретизации изображения сканирующим устройством;
- минимальное количество информации для кодирования, передачи и хранения картографической информации;
- возможность регулирования объема картографической информации в зависимости от особенностей полета, режима работы индикаторных систем и физического состояния пилотов экипажа ЛА;
- масштабирование цифрового изображения инвариантно к объему кодовой посылки, описывающей фрагмент изображения.

Недостатки:

- высокая алгоритмическая сложность математического аппарата на этапе предполетного формирования косвенного описания картографического изображения;
- возможное частичное несоответствие исходного варианта картографического изображения и синтезированного фрагмента вследствие замены реального участка карты его описательным пространственным эталоном;
- необходимость хранения в памяти индикатора МФИ разработанных кодовых посылок, описывающих классы эталонов картографического изображения в полной размерности, оказывается зачастую избыточной, так как не каждый фрагмент изображения содержит распределение всех элементов пространства классов.

Подводя итоги проведенных рассуждений по особенностям навигации пилотируемых ЛА по геофизическим картам земной поверхности можно сформулировать следующие выводы:

√ интенсивное развитие номенклатуры радиоэлектронной элементной базы в настоящее время привело к возможности эффективного решения насущной проблемы пилотирования ЛА — навигации по геофизическим картам земной поверхности;

√ погрешности отображения картографической информации на экране МФИ целиком определяются масштабом представления карты на бумажном носителе, шумом пространственной дискретизации изображения карты сканирующим устройством и эффективностью применяемых методов статистического анализа;

√ теория и практика статистической обработки изображения позволяет формировать косвенное описание картографического изображения на основе дискретных ортогональных преобразований. Эффективность сжатия изображения достигает 30 раз;

√ поворот картографического изображения производится в целом в полярной системе координат.

Процессорная платформа задействована в разрисовке изображения;

√ вероятностный математический аппарат статистической теории распознавания образов позволяет формировать лингвистическое косвенное описание картографического изображения. Эффективность сжатия отдельных растров изображения достигает 100 раз;

√ объем выводимой на экран индикатора МФИ информации может регулироваться функциональными кнопками. Поворот картографического изображения производится поэлементно и в целом в полярной системе координат;

√ процессорная платформа не задействована в разрисовке изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985.
2. Челпанов И.Б. Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. — М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1967. — 392с.
3. Красильников Н.Н. Теория передачи и восприятия изображения. Теория передачи изображения и ее приложения. — М.: Радио и связь, 1986. — 248с., ил.
4. Елисеев А.А., Шенета А.П., Изранцев В.В. Управление движущимися объектами: Учеб. пособие / Под ред. А.А. Елисеева, А.А. Оводенко — М.: Издательство МГАП «Мир книги», 1994. — 427с.: ил.
5. Барабаш Ю.Л., Варский Б.В., Зиновьев В.Т. и др. Вопросы статистической теории распознавания образов. — М.: Советское радио, 1967. — 400с.

Работа представлена ГУП ОКБ «Электроавтоматика», Санкт-Петербург.

Павел Павлович Парамонов – канд. техн. наук, доц., директор ГУП ОКБ;

Юрий Алексеевич Ильченко – нач. отд. систем индикации ГУП ОКБ;

Игорь Олегович Жаринов – асп. каф. прикладной математики ГУАП, ст. инж. отд. систем индикации ГУП ОКБ.