

2.5-D АВТОМОБИЛЬНАЯ АВТОНОМНАЯ НАВИГАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВЫХ КАРТ МЕСТНОСТИ

Ю.Г. Васин, Л.И. Лебедев

Научно-исследовательский институт прикладной математики и кибернетики

Нижегородского государственного университета,

Нижний Новгород, Россия

Аннотация

В данной работе рассматривается один из вариантов решения задачи неограниченной во времени и пространстве навигации транспортных средств, оснащенных инерциальными системами. Предлагается корреляционно-экстремальный метод коррекции датчиков инерциальной системы на основе информации цифровых карт местности. Предлагаемый метод позволяет осуществлять коррекцию дирекционного угла и местоположения транспортного средства в автоматическом режиме на основе данных о плоскостной траектории движения и пространственных эталонов. Показано, что использование пространственных эталонов увеличивает точность коррекции инерциальной навигационной системы.

Проведенные эксперименты на траекториях, полученных на основе моделирования показаний штатной инерциальной навигационной системы (топопривязчик), подтвердили вывод об увеличении точности коррекции и возможности осуществления ее в реальном масштабе времени с использованием бортовых ЭВМ.

Ключевые слова: *автомобильная навигация, инерциальная система, корреляционно-экстремальный метод, коррекция, траектория движения, цифровая карта.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Инерциальные навигационные системы находят все более широкое применение в авиационной, морской и автомобильной навигации. Связано это с тем, что инерциальные системы навигации имеют ряд преимуществ перед спутниковыми системами. Кроме автономности, что само по себе очень существенно, инерциальные навигационные системы имеют малую временную задержку, высокую скорость выдачи данных (до 100 Гц), возможность параллельного резервирования и ряд других преимуществ. Основным недостатком инерциальных навигационных систем является низкая во времени точность определения координат движения, связанная в основном с дрейфом инерциальных датчиков. Поэтому, там, где нужна высокая точность (например, в авиационной навигации при посадке по приборам, морской навигации при управлении судном на фарватере, а также для военных применений) требуется

коррекция координат движения от внешних источников информации.

В предлагаемых интегрированных навигационных системах таким источником служат спутниковые системы [1, 2]. Очевидным недостатком таких систем является нарушение автономности. Кроме того, для спутниковых навигационных систем характерен крайне низкий уровень целостности и надежности (как для GPS, так и ГЛОНАСС). Например, экспериментально установлено, что для подвижных объектов уровень отказов составляет приблизительно 10^{-2} в час (для сравнения, стандарт системы посадки по приборам ILS составляет 10^{-7} отказов в час. Очевидно, что это негативно отражается и на интегральных системах навигации.

Другое направление повышения точности инерциальных систем навигации связано с использованием информации цифровых карт местности [3, 4]. Типичным для всех методов в решении этой задачи является использование элементов содержания карты, заданных на плоскости или спроецированных на нее. Осуществлению пространственной автономной навигации транспортных средств препятствует отсутствие надежной и приемлемой по точности аппаратуры оперативного измерения высоты. В свою очередь определение местоположения объекта в сильно пересеченной местности без учета изменения высоты приводит к нелинейным искажениям координат движения даже при идеальной работе датчиков измерения курса и длины пройденного пути. Хотя линейная часть искажений может быть скомпенсирована введением масштабирующего множителя на длину пройденного пути, такого рода ошибки в определении координат влияют на точность коррекции.

Существенным недостатком большинства методов и алгоритмов коррекции инерциальных систем заключается в том, что уточнению подвергаются только координаты движения. Коррекция дирекционного угла, как правило, не проводится или ее осуществление сильно затруднено. Это в свою очередь ведет к необходимости постоянного уточнения координат движения, чтобы обеспечить заданную точность измерений.

В данной работе предлагается корреляционно-экстремальный метод коррекции дирекционного угла и координат движения в инерциальных системах навигации с использованием дополнительной информации о рельефе местности, то есть на основе пространственно-го описания эталонной информации.

2. КОНТУРНЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫЙ МЕТОД

Основы контурного корреляционно-экстремального метода и его теоретическое обоснование приведено в работе [4]. Суть метода состоит в следующем. Предположим, что на плоскости последовательностью точек заданы две кривые – объект $O = \{p_1, p_2, \dots, p_l\}$ и эталон

$E = \{p_1^o, p_2^o, \dots, p_m^o\}$, где $p = (x, y)^t$. (рис. 1)

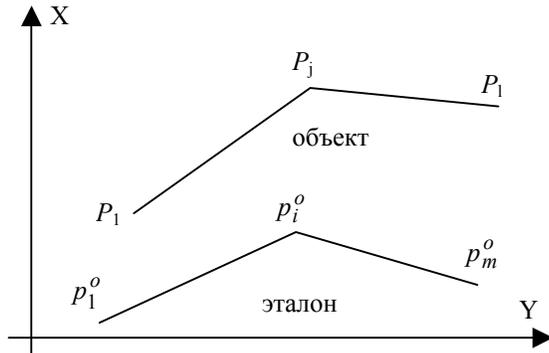


Рис. 1

Допустим, что длины кривых объекта и эталона совпадают, то есть $s = s^o$. Теперь путем перемещения и вращения постараемся совместить эти кривые. Поставим в соответствие степень сходства объекта с эталоном со степенью близости соответствующих точек обоих контуров. Если в качестве меры близости контуров взять невязку, то наилучшее совмещение контуров произойдет при следующих параметрах ортогонального преобразования:

$$\begin{cases} \Delta x = \bar{x}^o - (\bar{x} \cdot \cos \alpha + \bar{y} \cdot \sin \alpha), \\ \Delta x = \bar{y}^o - (\bar{y} \cdot \cos \alpha - \bar{x} \cdot \sin \alpha), \\ \operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{cov}(x^o, y) - \operatorname{cov}(y^o, x)}{\operatorname{cov}(x^o, x) + \operatorname{cov}(y^o, y)} \end{cases}, \quad (1)$$

где $\bar{x} = Mx$, $\operatorname{cov}(x, y) = M(x - \bar{x})(y - \bar{y})$ – выборочные моменты первого и второго порядка соответственно. При этом минимальное значение невязки находится по формуле (2):

$$\varepsilon_m = \operatorname{cov}(x^o, x^o) + \operatorname{cov}(y^o, y^o) + \operatorname{cov}(x, x) + \operatorname{cov}(y, y) - 2\sqrt{[\operatorname{cov}(x^o, y) - \operatorname{cov}(y^o, x)]^2 + [\operatorname{cov}(x^o, x) + \operatorname{cov}(y^o, y)]^2}.$$

Коррекция дирекционного угла и координат движения транспортного средства при использовании корреляционно-экстремального метода теперь представляется следующим образом. В качестве эталона возьмем характерный участок трассы длины s^o (изгиб, поворот и т.д.). На основе текущих координат движения транспортного средства выделим участок на траектории такой же длины, что и эталон. Далее, используя формулы

(1) и (2) вычислим значение невязки и оптимальных параметров совмещения рассматриваемых кривых. В том случае, если выделенный фрагмент траектории движения в точности соответствует показаниям инерциальной системы при прохождении эталонного участка трассы, то сходство кривых будет максимальным и, следовательно, значение невязки в этот момент будет минимальным. Очевидно, что полученные в этот момент времени параметры ортогонального преобразования и будут величинами коррекции дирекционного угла и координат движения. Ясно, что вычислять значение невязки имеет смысл только в определенной зоне коррекции эталона E . Определим зону коррекции эталона как участок трассы включающий эталон и два примыкающих к его концам фрагмента, равноудаленных от начальной и конечной точек эталона на некоторую величину L , зависящую от качественных характеристик инерциальной системы. Тогда вопрос идентификации участка, соответствующего эталонному, осуществляется следующим образом. При входе транспортного средства в зону коррекции эталона, последовательно, в темпе выдачи координат движения формируется текущий участок длины s^o , конечной точкой которого является полученные на данный момент координаты местоположения. Затем для каждого участка вычисляется по формуле (2) значение $\varepsilon_m(j)$, где j – текущий номер участка. При выходе из зоны коррекции определяется номер участка j_o для которого выполняется условие $j_o = \min_j \varepsilon_m(j)$. Преобразование текущих

показаний инерциальной системы (x_t, y_t, φ_t) осуществляется по формуле:

$$\begin{cases} x'_t = (x_t - \bar{x}_{j_o}) \cdot \cos \alpha_{j_o} + (y_t - \bar{y}_{j_o}) \cdot \sin \alpha_{j_o} + \bar{x}^o, \\ y'_t = (y_t - \bar{y}_{j_o}) \cdot \cos \alpha_{j_o} - (x_t - \bar{x}_{j_o}) \cdot \sin \alpha_{j_o} + \bar{y}^o, \\ \varphi'_t = \varphi_t - \alpha_{j_o} \end{cases}, \quad (3)$$

В заключение следует отметить, что для того чтобы избежать возможности осуществления ложной коррекции необходимо, чтобы в зоне формируемого эталона не было участков, конгруэнтных ему. Следует также установить некоторый порог на величину $\varepsilon_m(j_o)$, при превышении которого происходит отказ от коррекции параметров инерциальной системы.

Было установлено, что в качестве эталонной информации кроме участков дорожной сети может быть взят характерный участок любого жесткого контура того или иного элемента содержания карты, санирование которого возможно при движении транспортного средства по заданному маршруту.

Для осуществления длительной во времени навигации транспортных средств, оснащенных инерциальными системами с использованием цифровых карт местности и корреляционно-экстремального контурного метода необходимо весь маршрут движения покрыть сетью эталонов. Частота расположения эталонов зависит от

точности коррекции дирекционного угла и координат движения корреляционно-экстремальным контурным методом с одной стороны и точностных характеристик инерциальной системы с другой. Она должна удовлетворять требованию, что максимальная погрешность в определении параметров движения, которая может быть получена между моментами коррекции, не должна превышать заданной пороговой величины.

3. КОРРЕКЦИЯ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ 3-D ЭТАЛОНОВ

Как уже отмечалось выше точность коррекции оказывает влияние на частоту использования эталонов на маршруте для обеспечения движения с заданной погрешностью. Можно отметить два источника, которые влияют на точность коррекции. Во-первых, на точность коррекции оказывают ошибки измерения соответствующих параметров движения и дрейф инерциальных датчиков. Дрейф инерциальных датчиков ведет к изменению формы траектории движения, поэтому при выборе длины эталона следует соблюдать компромисс между ошибками, имеющими случайный и систематический характер и влияющими на точность коррекции. Во-вторых, на точность коррекции влияют ошибки в определении координат движения, связанные с движением транспортного средства по пространственной траектории и использования плоскостной модели вычисления координат местоположения. Это приводит к нелинейным искажениям координат движения особенно в сильно пересеченных местностях (рис. 2).

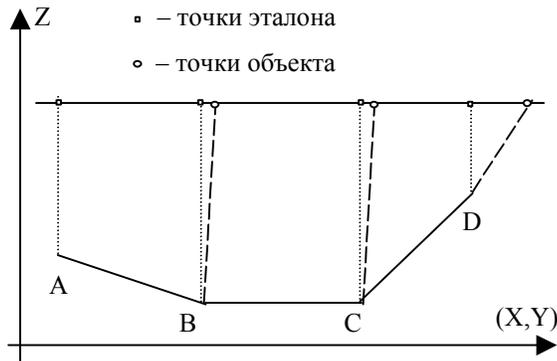


Рис. 2

Из рисунка видно, что при прохождении эталонного участка ABCD ($|AB|=|BC|=|CD|$) координаты точек эталона и траектории движения будут не совпадать, причем отличие будет носить нелинейный характер. Для того, чтобы искажения такого рода не влияли на точность коррекции эталон будем рассматривать заданным точками в трехмерном пространстве.

Пусть эталон задан последовательностью точек $E = (w_1^o, w_2^o, \dots, w_m^o)^t$, где точки $w^o = (x^o, y^o, z^o)^t$ заданы в декартовой системе координат, причем коорди-

ната z^o является абсолютной высотой точки на местности с координатами (x^o, y^o) . Значение z^o может быть получено на основании данных о рельефе местности и отметках высот. Обозначим через r^o длину эталона E , а r_i^o - расстояние между точками w_i^o и w_{i+1}^o , то есть $r_i^o = \|r_{i+1}^o - r_i^o\|$. Расстояние между точками

p_i^o и p_{i+1}^o на плоскости этого же эталона обозначим s_i^o , $s_i^o = \|p_{i+1}^o - p_i^o\| = \|(x_{i+1}^o, y_{i+1}^o) - (x_i^o, y_i^o)\|$. Допус-

тим, что транспортное средство находится в зоне коррекции эталона E . Рассмотрим текущий участок этой зоны, траектория движения по которому описывается последовательностью точек $O = \{p_1, p_2, \dots, p_l\}$, где

$p = (x, y)^t$. Длина этого фрагмента кривой выбирается из условия $s = q \cdot r^o$, где q - компенсационный мно-

житель на длину пройденного пути. Произведем пересчет точек кривой с учетом компенсационного множителя по формуле:

$$p'_1 = p_1, p'_i = p'_1 + (p_i - p_1)/q \quad (4)$$

В результате получим кривую $O' = (p'_1, p'_2, \dots, p'_l)^t$, длина которой соответствует длине эталона E .

Теперь предположим, что траектория O' в точности соответствует показаниям инерциальной системы при движении по трассе, описываемой эталоном E . В таком случае изменения высот равноудаленных от начала точек у эталона и траектории движения будут одинаковыми. Построим вспомогательные описания эталона и траектории O' . Для этого, последовательно, для каждой точки p'_i траектории O' находится расстояние вдоль кривой до точки p'_1 и, используя линейную интерполяцию, на таком же расстоянии от начальной точки на кривой эталона E вставляется дополнительная точка. Аналогичным образом преобразуется и описание траектории O' . Следует отметить, что размерности представления точек эталона и траектории O' здесь по-прежнему различны. В результате получим два

вспомогательных описания $\hat{E} = (\hat{w}_1^o, \hat{w}_2^o, \dots, \hat{w}_n^o)^t$ и

$O'' = (p''_1, p''_2, \dots, p''_n)^t$, где $n = m + l$ и у которых

$\hat{r}_i^o = \|\hat{w}_{i+1}^o - \hat{w}_i^o\| = \|p''_{i+1} - p''_i\| = s_i''$. Далее, по описани-

ям траектории O'' и эталона \hat{E} формируется описание траектории \hat{O} на основе трехмерных точек \hat{w}_i $i = 1, 2, \dots, n$. Восстановление трехмерных точек

$\hat{w}_i = (\hat{x}_i, \hat{y}_i, \hat{z}_i)^t$ по их двухмерному представлению осуществляется по следующей формуле:

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{w}_1 = (x_1'', y_1'', \hat{z}_1^o)^T, \\ \cos \eta_i^o = (\hat{z}_{i+1}^o - \hat{z}_i^o) / \|\hat{w}_{i+1}^o - \hat{w}_i^o\|, \\ \hat{x}_{i+1} = \hat{x}_i + (x_{i+1}'' - x_i'') \cdot \cos \eta_i^o, \\ \hat{y}_{i+1} = \hat{y}_i + (y_{i+1}'' - y_i'') \cdot \cos \eta_i^o, \\ \hat{z}_{i+1} = \hat{z}_{i+1}^o \end{array} \right. , \quad (5)$$

где $i = 1, 2, \dots, n-1$. Так как значения третьих координат точек в описаниях эталона \hat{E} и траектории \hat{O} совпадают, то коэффициент сходства и параметры коррекции можно определить, используя только две первых координаты точек. Это можно осуществить корреляционно-экстремальным методом. Таким образом, трехмерное задание эталонных участков позволяет осуществить преобразование координат текущего участка, выдаваемых инерциальной системой, в соответствии с изменением высот. Это позволяет добиться большего подобия в описаниях эталона и соответствующей ему траектории и, следовательно, увеличить точность коррекции, применяя корреляционно-экстремальный метод.

Таким образом, модификация корреляционно-экстремального метода по описанной выше схеме позволяет осуществлять коррекцию дирекционного угла и плоскостных координат движения на основе пространственного описания эталонов, то есть осуществлять 2.5-D автономную навигацию транспортных средств.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как непосредственно следует из изложения метода 2.5-D автономной навигации его применение более эффективно в плане увеличения точности коррекции инерциальных навигационных систем. Этот факт подтвердили и результаты испытаний на траекториях, полученных на основе моделирования показаний штатной инерциальной навигационной системы (топопривязчик). Безусловно, также и то, что предлагаемый метод в вычислительном плане является более сложным, так как отпадает возможность рекурсивного вычисления корреляционных моментов для текущих участков. Это связано с тем, что одни и те же точки соседних текущих участков могут трансформироваться по-разному, так как в общем случае заимствованные с эталона значения высот для этих точек будут различны. Однако, увеличение вычислительной сложности метода при использовании трехмерных эталонов с учетом быстродействия современных бортовых ЭВМ не сказывается на решении задачи коррекции в реальном масштабе времени.

Примечание

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 00-15-96108) и ФЦП «Интеграция» (проект K0392).

5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шенцер Г. Высокоточная интегрированная навигационная система для подвижных объектов. //Гирроскопия и навигация, 1999, № 3(26).-С.53-68.
- [2] Бешнид Й., Бартель Р., Гиллес Е. Практическое применение интегрированной навигационно- управляющей системы на речных судах. //Гирроскопия и навигация, 2001, № 1(32).-С.101-114.
- [3] Дмитриев С.П., Степанов О.А., Ривкин Б.С., Кошаев Д.А., Чанг Д. Оптимальное решение задачи автомобильной навигации с использованием карты дорог. //Гирроскопия и навигация, 2000, № 2(29).-С.57-69.
- [4] Васин Ю.Г., Лебедев Л.И., Пучкова О.В. Корреляционно-экстремальный метод в задачах навигации роботов и ввода дискретных объектов.//Методы и средства обработки сложной графической информации: 3-я Всесоюз. конф.: Тез.докл./Горький, Горьков.гос. ун-т, 1988, ч.1. С.61-62.

Об авторах

Васин Юрий Григорьевич - директор НИИ Прикладной Математики и Кибернетики ННГУ, д.т.н., профессор, член-корр. АТН РФ.

E-mail: vasin@focus.nnov.su

Лебедев Леонид Иванович – зав. сектором НИИ ПМК ННГУ, к.ф.-м.н., с.н.с.

E-mail: lebedev@pmk.unn.runnet.ru

Научно-исследовательский институт прикладной математики и кибернетики
Нижегородского государственного университета,
Нижний Новгород, Россия

The 2.5-d autonomous navigation of vehicles with a use of terrain digital maps

Juri.G. Vasin and Leonid.I. Lebedev
Research Institute for Applied
Mathematics and Cybernetics
of Nizhny Novgorod State University
(NII PMK NNGU),
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

In this paper there is discussed one of the solutions for performing time- and space-unlimited navigation of transport vehicles equipped with inertial systems. There has been suggested the correlative extreme method of correcting the inertial system sensors through a use of terrain digital maps. The method proposed makes it possible to automatically correct a directional angle and location coordinates of a vehicle with a use of the data describing the vehicle plane path and spatial standards. It is also shown that using the spatial standards will increase the correcting accuracy of the inertial navigational system.

The experiments performed on the paths obtained through modelling the indications of the authorized inertial navigational system (a topographical receiver) have confirmed a conclusion on increasing the correcting accuracy and the possibility to implement it on a real time basis with a use of on-board computers..