электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 10, октябрь 2015

УДК 629.05

Калибровка наземной навигационной системы

Мкртчян В.И., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»;
главный специалист отдела инерциальных систем и программного обеспечения
Россия, 117246, г. Москва, ООО «ТеКнол»

Научный руководитель: Салычев О.С., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана;
генеральный конструктор
Россия, 117246, г. Москва, ООО «ТеКнол»
bauman@bmstu.ru

Введение

Инерциальная навигационная система (ИНС) определяет в каждый момент времени координаты, скорость и углы ориентации объекта, по отношению к некоторому навигационному трёхграннику. Метод инерциальной навигации основан на измерениях, полностью проводимых на объекте в соответствии с законами движения и гравитации Ньютона. Это главное достоинство инерциального метода, которое позволяет автономно, без приёма/передачи какой-либо информации извне, решать на борту объекта задачу ориентации и навигации.

Классический вариант реализации ИНС подразумевает наличие платформы, стабилизируемой гироскопами, с установленными на ней акселерометрами, показания которых являются входными данными двух последовательных интеграторов, определяющих скорость и координаты объекта по известным начальным условиям. Такие ИНС называются платформенными.

На практике большее распространение получили бесплатформенные ИНС (БИНС), в которых гиростабилизатор отсутствует. БИНС по сравнению с платформенными системами дешевле и проще в производстве, имеют меньшие массу и габариты. В традиционной схеме БИНС чувствительными элементами являются гироскопические датчики угловой скорости (ДУС) и акселерометры, жёстко закрепленные в корпусе прибора. Оси чувствительности датчиков направлены вдоль осей связанного с объектом

трёхгранника. Принцип работы состоит в алгоритмической обработке показаний чувствительных элементов.

Алгоритм БИНС состоит из двух взаимосвязанных блоков:

1) блок вычисления скорости и координат объекта;

2) блок вычисления ориентации осей чувствительности акселерометров с тем, чтобы компенсировать проекции ускорения силы тяжести в значениях кажущихся ускорений, измеряемых бортовыми акселерометрами.

Связующим звеном этих блоков служит преобразование показаний акселерометров из связанного трехгранника в навигационный. Поскольку для алгоритмической обработки используются показания датчиков в цифровом виде, вычисления в блоках 1 и 2 основаны на приближенном численном интегрировании. Из-за погрешностей, в основном, инструментальных, выходные показания БИНС содержит ошибки. Это явление ограничивает время работы БИНС, поскольку ошибки возрастают с течением времени.

Для компенсации ошибок применяют различные схемы интеграции БИНС с внешними источниками навигационной информации. В случае навигации наземных подвижных объектов, таких, как автомобиль, возможна интеграция БИНС с одометром.

БИНС, интегрированную с одометром для определения параметров движения будем называть наземной навигационной системой (ННС). Точность ННС зависит как от погрешностей БИНС, так и погрешностей одометра. В настоящей работе предлагается калибровка погрешностей в некоторой точке маршрута автомобиля, координаты которой определяются по независимому источнику, например, по карте и затем вводятся в вычислитель ННС. Предполагается проводить такую калибровку в каждой поездке ввиду нестабильности погрешностей от запуска к запуску.

Инерциально-одометрическая навигация

Одометр определяет пройденный путь s вдоль продольной оси автомобиля используя датчик оборотов колеса. Однако для навигации на поверхности Земли обычно требуется знать географические широту φ и долготу λ, которые можно вычислить по формулам:

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{\Delta N}{R_\varphi} \tag{1}$$

$$\lambda = \lambda_0 + \frac{\Delta E}{R_\lambda \cos\varphi}, \tag{2}$$

где φ_0 , λ_0 – начальные значения широты и долготы соответственно, вводимые в вычислитель ННС на выставке; ΔE , ΔN – приращения пройденного пути s в восточном и северном направлениях соответственно; R_φ , R_λ – радиусы кривизны эллиптичной модели Земли. На основании одной лишь информации от одометра нельзя определить ΔE и ΔN , поскольку для этого требуется знать угол между направлением на север и проекцией продольной оси автомобиля на плоскость местного горизонта. Таковым углом является географический или истинный курс H , который доступен от БИНС, установленной на автомобиле. В этом случае:

$$\Delta E = \Delta s * \sin H \tag{3}$$

$$\Delta N = \Delta s * \cos H \ . \tag{4}$$

Ошибки БИНС в определении составляющих путевой скорости имеют колебательный характер [1]. Демпфирование ошибок может быть реализовано по известным схемам [2]. В качестве внешних значений, позволяющих выделить ошибки БИНС по скорости можно использовать величины:

$$V_E^{odom} = (ds/dt) * \sin H$$

$$V_N^{odom} = (ds/dt) * \cos H \ ,$$

где V_E^{odom} , V_N^{odom} – соответственно восточная и северная составляющие путевой скорости.

Ошибки БИНС в определении угла тангажа и угла крена возможно свести к малым значениям (порядка $0{,}5^\circ$) даже для систем низкого класса точности с дрейфом гироскопов более $0{,}5^\circ / час$. Эти ошибки учитываться в дальнейшем рассмотрении не будут ввиду незначительного их влияния на точность определения координат по формулам (1) и (2). Ошибка БИНС в определении истинного курса подлежит рассматриваемой в настоящей работе калибровке.

Постановка задачи

Очевидно, что точность определения координат по формулам (1) – (4) зависит от двух факторов: во-первых, от точности масштабного коэффициента одометра, во-вторых, от точности истинного курса. Действительно, вариации от уравнений (3) и (4) приводят к результатам:

$$\delta E = \delta(\Delta s)\sin H + \Delta s \delta H \cos H = \mu \Delta E + \Delta N \delta H \tag{5}$$

$$\delta N = \delta(\Delta s)\cos H - \Delta s \delta H \sin H = \mu \Delta N - \Delta E \delta H \,, \tag{6}$$

где δE, δN – ошибки определения пройденного пути в направлениях на восток и север соответственно, δH – ошибка угла истинного курса, μ – погрешность масштабного коэффициента одометра.

Задача калибровки ННС сводится к определению и компенсации погрешностей δH и μ с тем, чтобы свести к минимальным значениям ошибки δE и δN.

Принцип калибровки ННС

Для того, чтобы определить ошибки δH и μ необходима внешняя информация о местоположении. Допустим, что верные значения координат φ_{true}, λ_{true} некоторой точки M траектории (не совпадающей с начальной точкой, имеющей координаты φ_0, λ_0) известны. Тогда возможно определить ошибки δE и δN как:

$$\delta E = \Delta E - \Delta E_{true} = \mu \Delta E + \Delta N \delta H \tag{7}$$

$$\delta N = \Delta N - \Delta N_{true} = \mu \Delta N - \Delta E \delta H \,, \tag{8}$$

где $\Delta N_{true} = (\varphi_{true} - \varphi_0) R_\varphi$, $\Delta E_{true} = (\lambda_{true} - \lambda_0) R_\lambda \cos\varphi$. Комбинация уравнений (5) и (6) позволяет оценить погрешности δH и μ как

$$\delta H = \frac{\delta E \Delta N_{true} - \delta N \Delta E_{true}}{(\Delta E_{true})^2 + (\Delta N_{true})^2} \tag{9}$$

$$\mu = \frac{\delta E \Delta E_{true} + \delta N \Delta N_{true}}{(\Delta E_{true})^2 + (\Delta N_{true})^2} \,. \tag{10}$$

Заметим, что ошибка δH складывается из двух составляющих. Первая обусловлена ошибкой установки БИНС на автомобиле или угловым отклонением продольной оси БИНС от продольной оси автомобиля. Другая составляющая представляет собой собственную ошибку БИНС в определении угла истинного курса и обусловлена погрешностями чувствительных элементов и вычислительными ошибками. Компенсация δH позволяет свести к минимуму влияние обеих составляющих на определение координат по формулам (1) – (4).

После определения δH и μ по формулам (9) и (10) их компенсация проводится на этапе вычисления приращений ΔE и ΔN как

$$\Delta E = (1 - \mu)\Delta s * \sin(H - \delta H) \tag{11}$$

$$\Delta N = (1-\mu)\Delta s * \cos(H - \delta H). \quad (12)$$

Испытания

Испытания проводились на автомобиле Mitsubishi Pajero Sport, на котором была установлена БИНС среднего класса точности «БИНС-Тек» (продукт компании ООО «ТеКнол»). В таблице 1 приведены технические характеристики системы «БИНС-Тек», а также её показатели точности для полностью автономного режима работы. В своём составе «БИНС-Тек» имеет приёмник GPS.

Таблица 1

Спецификация системы «БИНС-Тек»

Параметр	Единица измерения	Значение
Масса	кг	7
Габаритные размеры	мм	224 x 176 x 135
Напряжение питания	В	9…36
Погрешность определения горизонтальных координат (CEP)	Морских миль за 1 час	1.5…2
Погрешность определения составляющих путевой скорости (1σ)	м/с	4
Погрешность определения углов тангажа и крена (1σ)	град	0,04
Погрешность определения истинного курса (1σ)	град за 1 час	0,15

В процессе испытаний БИНС была подключена к портативному персональному компьютеру и создавала на нём бинарный файл, в котором записывались показания чувствительных элементов и другие параметры движения, в том числе, данные от приёмника GPS и данные от штатного одометра автомобиля. В режиме послемаршрутной обработки было проведено моделирование работы БИНС на основании созданного бинарного файла и проверен алгоритм калибровки ННС. В качестве эталонных координат φ_{true}, λ_{true} использовались GPS-координаты, доступные на протяжении всего маршрута.

Точность оценки погрешностей δH и μ по формулам (9) и (10) тем выше, чем

больше значение $(\Delta E_{true})^2 + (\Delta N_{true})^2$. Поэтому для калибровки этих погрешностей использовались эталонные координаты в момент времени $t_1 = 3431c$. Результаты вычислений: $\delta H = -0{,}177^\circ$, $\mu = 0{,}012$.

На рисунке 1 показана кривая ошибки δN. До момента времени t_1 видно нарастание ошибки, обусловленное погрешностями δH и μ. В момент времени t_1 алгоритм калибровки производит сброс ошибки δN, используя значения ΔN_{true}. На этом же вычислительном такте определяются погрешности δH и μ, а начиная со следующего такта, и до конца моделирования они компенсируются в соответствии с (12). Видно, что после калибровки остались лишь малые девиации ошибки δN, обусловленные остаточными нескомпенсированными погрешностями и их нестабильностью во времени.

Аналогичные рассуждения справедливы и для ошибки δE, кривая которой показана на рисунке 2.

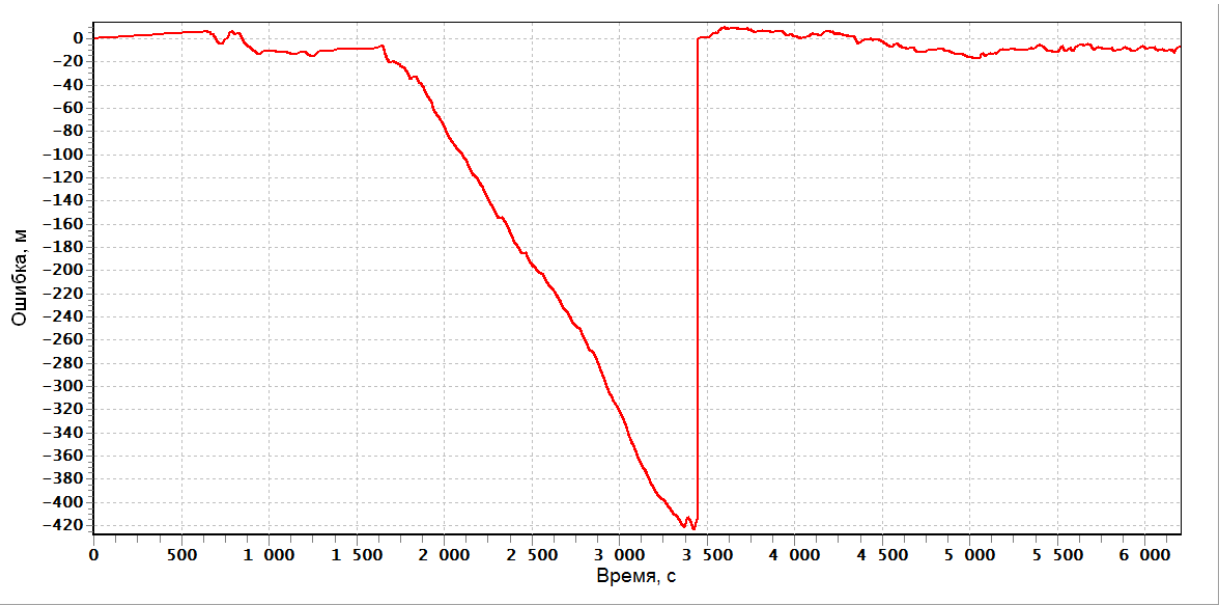

Рис. 1. Ошибки пройденного пути в северном направлении

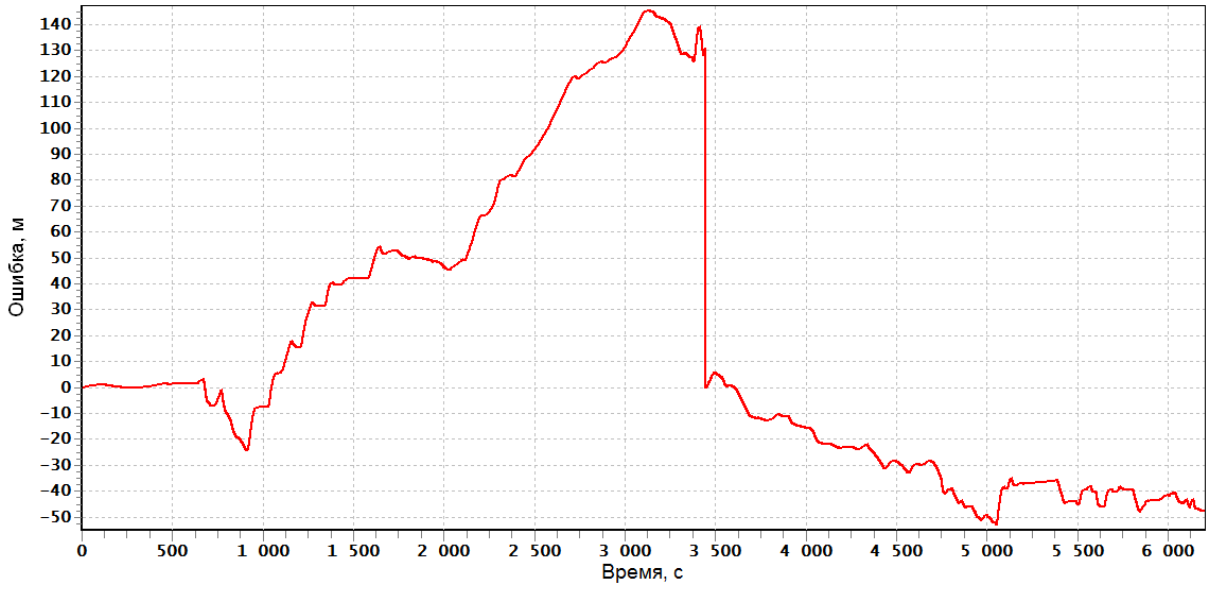

Рис. 2. Ошибки пройденного пути в восточном направлении

К моменту времени t_1, то есть до калибровки, ошибка определения с помощью ННС горизонтальных координат составляла 1,05% от пройденного пути. После калибровки этот показатель составил 0,12% от пройденного пути.

Заключение

Рассмотренный алгоритм калибровки ННС позволяет значительно увеличить точность определения горизонтальных координат – основных параметров движения при наземной навигации. Точность калибровки зависит от того, насколько далеко объект удалился относительно начального положения. Этот факт нужно учитывать при выборе точки маршрута, в которой будет проводиться калибровка.

Для калибровки требуется получить извне точные координаты лишь одной точки маршрута автомобиля. Нарушение автономности навигации происходит лишь в этой точке и только в том случае, если получение координат основано на приёме/передаче сигналов извне (как в случае с GPS). Если же эти координаты определяются по карте, реализуется автономная навигация, осуществляемая по измерениям, проводимым только на объекте.

Список литературы

1. Salychev O.S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. Moscow: Bauman MSTU Press, 2004. 304 p.
2. Salychev O.S. MEMS-based Inertial Navigation: Expectations and Reality. Moscow: Bauman MSTU Press, 2012. 208 p.

3. Терешков В.М. Методика полунатурных испытаний корректируемых бесплатформенных инерциальных навигационных систем: дисс. … канд. техн. наук. М., 2011. 133 с.
4. Солодовников В.В., Плотников В.Н., Яковлев А.В. Теория автоматического управления техническими системами. М.: Изд-во МГТУ, 1993. 492 с.
5. Titterton D.H., Weston J.L. Strapdown Inertial Navigation Technology. 2nd ed. Stevenage: The Institution of Electrical Engineers, 2004. 581 p.
6. Броксмейер Ч.Ф. Системы инерциальной навигации (пер. с англ.). Судостроение, 1967. 278 с.
7. Фридлендер Г.О., Инерциальные системы навигации. Физматгиз, 1961. 153 с.
8. Инерциальные системы управления. Под ред. Питтмана Д. М.: Военное изд-во министерства обороны СССР, 1964. 453 с.