

ПРИМЕНЕНИЕ ОДОМЕТРА В ИНТЕГРИРОВАННОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Новиков П.В., к.т.н. Новиков В.В., д.т.н. Шейпак А.А.

Университет машиностроения

NovikoF_08@mail.ru

В данной работе проанализированы принципы построения интегрированной навигационной системы наземного транспортного средства. Представлены схемные и алгоритмические решения, обеспечивающие комплексирование одометрического датчика с модулями инерциальной и спутниковой навигации интегрированной системы. Приведены результаты натурных испытаний интегрированной системы, предназначенной для установки на автопогрузчик, осуществляющий грузоперевозки на территории морского порта.

Ключевые слова: инерциальная навигация, спутниковая навигация, одометр, транспортное средство

Введение

При реализации современных технологий навигации наземного транспортного средства все большее распространение находят интегрированные инерциальные системы, объединяющие в единый комплекс приемники спутниковой навигации глобальной системы (GPS, GLONASS, Galileo) и инерциальные навигационные системы (ИНС).

Основным достоинством ИНС служит их принципиально возможная автономность: все измерения и вычисления, необходимые для построения навигационного решения, осуществляются на борту подвижного объекта без привлечения каких бы то ни было внешних источников данных. Главным же недостатком таких систем оказывается свойство их погрешностей неограниченно возрастать с течением времени. Интегрирование этих ошибок в рамках навигационного алгоритма [1, 2] приводит к накоплению ошибок, содержащихся в выходных показаниях. Так, для лучших образцов авиационных навигационных систем погрешность определения координат составляет 1...2 км за 1 ч. полета.

Глобальные спутниковые навигационные системы (СНС) реализуют принципиально иной метод навигации [1], что приводит к иному характеру их погрешностей. По сравне-

нию с ИНС спутниковые системы обеспечивают весьма высокую долговременную точность, то есть их погрешностям не свойственно накопление с течением времени.

В основе навигационного алгоритма СНС лежит вычисление координат точки пересечения трех сфер, центр и радиус которых известны. Центрами сфер служат навигационные искусственные спутники Земли. Сами сферы образованы фронтами электромагнитных волн, излучаемых передатчиками на борту спутников. В точке пересечения сфер располагается рассматриваемый подвижный объект, оснащенный приемником сигналов спутников.

На точность определения выходных показаний СНС влияет эквивалентная ошибка определения псевдо расстояний [1, 2] (User Equivalent Range Error, UERE), величина которой составляет 2...3 м, а также геометрический фактор (Dilution of Precision, DOP) – безразмерный множитель, характеризующий конфигурацию созвездия наблюдаемых навигационных спутников. Существенным препятствием на пути повсеместного распространения спутниковых навигационных средств оказывается их неавтономность, ибо приемлемое навигационное решение удастся построить лишь в условиях качественного приема сигналов от достаточного числа спутников. Это возможно

только на открытой местности и только при условии, что орбитальная группировка навигационной системы является достаточно развитой.

Все сказанное о свойствах инерциальных и спутниковых систем навигации указывает на актуальность создания интегрированной системы, которая сочетала бы в себе достоинства различных принципов определения координат. Инерциальная часть системы должна обеспечивать малые погрешности на коротких интервалах времени и высокую частоту обновления выходной информации, а спутниковая коррекция позволяла бы сохранять достаточной долговременную точность всей системы [2].

В рамках решения задачи по оптимизации процесса грузоперевозок на территории морского порта возникает потребность в непрерывном определении местоположения автопогрузчиков транспортирующих контейнеры с грузом. Перемещение транспорта по территории морского порта происходит в узких пространствах (каньонах), ограниченных грузовыми контейнерами, что приводит к частым перебоям в работе приемника GPS. Учет особенностей реальных условий эксплуатации автопогрузчика требует включения в аппаратный состав системы дополнительного источника информации о параметрах движения. В целях обеспечения устойчивости функционирования системы, а также для повышения точности определения скорости и координат в качестве такого дополнительного источника данных может применяться одометр. Одометрический датчик позволяет измерять путь, пройденный транспортным средством, или приращение пути за некоторый интервал времени [3, 4].

Задача исследования

До последнего времени широкое применение интегрированных систем сдерживалось

высокой стоимостью ИНС, а также сложностью развертывания внешних сегментов систем спутниковой навигации. Появление на рынке навигационной техники дешевых микромеханических элементов, обладающих низкой точностью, требует разработки зачастую принципиально новых технических решений. На основе проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ была создана интегрированная навигационная система для наземного транспортного средства [3–5]. Элементный состав, а также особенности конструкторских и схемных решений, положенных в основу концепции построения интегрированной инерциальной системы, изложены в работах [3–5], поэтому эта система является базовой при выполнении данных исследований. Задачами исследования являются:

определение схемных и алгоритмических решений, обеспечивающих комплексирование одометрического датчика с модулями инерциальной и спутниковой навигации;

- представление и анализ результатов натурального эксперимента;
- выработка рекомендаций по дальнейшему совершенствованию системы.

Схема комплексирования одометра, инерциальной системы и приемника GPS

В настоящее время широкое практическое применение нашли различные комбинированные методики коррекции показаний инерциальных систем. Одна из таких методик предусматривает совместное использование показаний инерциальной системы, приемника GPS и одометра (рис. 1).

На схеме \bar{Z} , \bar{Z}^{GPS} , \bar{Z}^{OD} – вектора измерений, формируемых по показаниям инерциальной системы, приемника GPS и одометра, $\delta\bar{Z}^{OD}$ – погрешность вектора измерений,

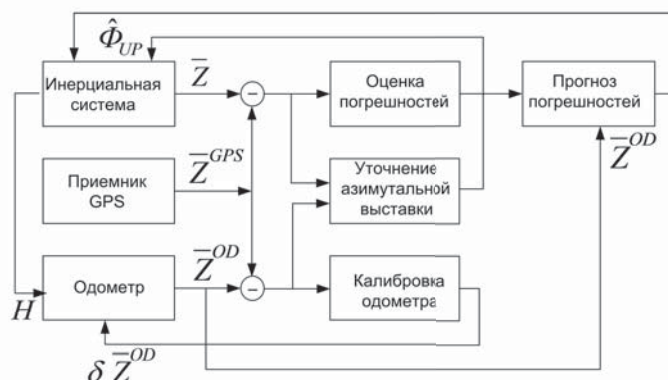


Рис. 1. Схема интеграции инерциальной системы, приемника GPS и одометра

H – курсовой угол, $\hat{\Phi}_{UP}$ – оценка азимутальной выставки.

По своей сути методика повторяет классическую схему интегрированной навигационной системы с той лишь разницей, что схема расширена за счет введения в нее показаний одометра. Измерения, формируемые одометрическим датчиком, позволяют определить и скомпенсировать остаточную ошибку азимутальной выставки, а также осуществлять прогнозирование погрешностей инерциальной части во время отсутствия качественного приема сигналов навигационных спутников, ибо измерения одометра доступны всегда, безотносительно к внешним условиям. В свою очередь, сравнение величин пройденного пути, рассчитанных по данным Глонасс и одометра, дает возможность откалибровать масштабный коэффициент последнего.

Основой цифрового одометра, входящего в состав интегрированной навигационной системы, служит оптический кодový датчик положения, содержащий ротор – прозрачный диск с нанесенными на нем в радиальном направлении непрозрачными полосами (или непрозрачный диск с радиальными прорезями), а также пару из излучателя и фотоприемника, размещенных по противоположные стороны от ротора.

Электрическое напряжение на выходе фотоприемника определяется интенсивностью падающего на него излучения. При вращении ротора его непрозрачные участки поочередно затеняют фотоприемник, выходной сигнал которого приобретает вид последовательности импульсов, чье количество зависит от угла поворота ротора.

Электронная схема, смоделированная в составе вычислителя инерциальной системы

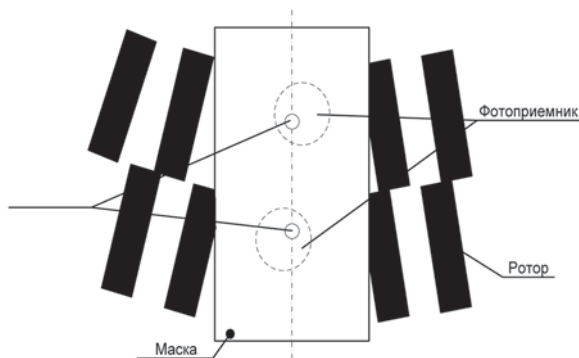


Рис. 2. Схема кодového датчика

[2–5] и специальный алгоритм обработки выходного сигнала позволяют получить длительность интервала времени τ , отделяющего фронты двух подряд идущих импульсов кодového датчика одометра. Величина, обратная этой длительности, служит мерой частоты вращения колес и, следовательно, скорости транспортного средства.

Особую проблему в задаче наземной навигации составляет детектирование движения транспортного средства задним ходом. Удовлетворительно решить эту проблему инерциальными и спутниковыми средствами в рамках существующих ограничений невозможно. Однако навигационная система может быть укомплектована одометром усовершенствованной конструкции, позволяющим определить направление вращения колеса. Кодový датчик такого одометра имеет в своем составе ротор с двумя наборами непрозрачных полос, смещенными по своему угловому положению на $1/4$ периода повторения рисунка на роторе и два фотоприемника, приемные отверстия которых с высокой точностью выровнены относительно вертикальной оси (рис. 2). Данная схема позволяет определять направление вращения ротора.

При вращении ротора последовательности импульсов напряжения U_1 и U_2 на выходах двух фотоприемников будут идентичными по форме, но смещенными во времени одна относительно другой на величину $\Delta\tau$, знак которой несет информацию о направлении вращения (рис. 3).

Как было упомянуто, в условиях движения

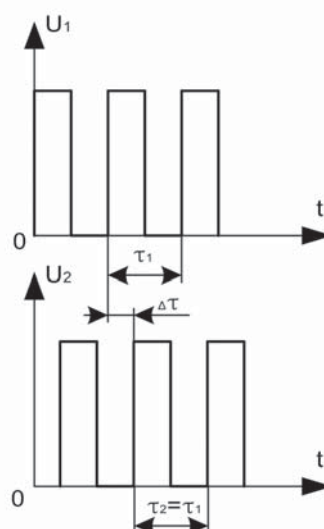


Рис. 3. Сигналы фотоприемника

транспорта по территории морского порта наиболее достоверным источником информации о скорости является одометр.

Действительно, в показаниях инерциальной системы происходит непрерывное накопление погрешностей, достигающих 10 м/с за 1 мин работы; измерения скорости при помощи приемника спутниковой навигационной системы осуществляются с запаздыванием в 2...3 с и не всегда доступны. В то же время одометрическая информация лишена этих недостатков. Более того, конструкция используемого одометра допускает не только определение величины скорости, но и автономное детектирование движения задним ходом за счет наличия фотодатчиков и двух каналов обработки данных.

Пусть фронты подряд идущих импульсов одного из каналов одометра отстают по времени один от другого на τ_1 и τ_2 , а от фронтов соответствующих импульсов второго канала – на $\Delta\tau$. Тогда признаком движения задним ходом считается выполнение условия:

$$\Delta\tau > \frac{\tau_{1,2}}{2}$$

на протяжении 0,3 с или более.

Абсолютное значение скорости, вычисленной по показаниям одометра, рассчитывается по формуле:

$$V^{OD} = \frac{K^{OD}}{\tau_{1,2}},$$

где масштабный коэффициент одометра K^{OD} определяется на этапе калибровки одометра и заносится в энергозависимую память вычислителя навигационной системы.

Калибровка осуществляется сравнением величин пройденного пути, вычисленного по значениям скорости данных приемника Глонасс и данных одометра при прямолинейном движении транспортного средства и качественном приеме сигналов навигационных спутников.

При скорости движения меньше 0,1 м/с частота следования импульсов одометра столь мала, что обновление значений τ_1 и τ_2 на каждом шаге навигационного алгоритма оказывается невозможным и в величине V^{OD} появляется ошибка. Для ее компенсации предложен приближенный способ, согласно которому при скорости, близкой к нулю, масштабный коэффициент одометра искусственно завышается:

$$\tilde{K}^{OD} = 1,3K^{OD}.$$

Комплексирование одометра и навигационной системы приводит к необходимости синтезировать специализированный [2–5], алгоритм обработки навигационной информации, поступающей от разнородных источников. Данный алгоритм должен быть максимально адаптирован к имеющемуся аппаратному обеспечению и заданным условиям эксплуатации.

Испытания интегрированной навигационной системы

Испытания интегрированной навигационной системы проводились в реальных условиях эксплуатации на территории морского порта и его окрестностях. Целью испытаний была отладка алгоритмических и схемных решений, заложенных в основу построения системы, а также подтверждение соответствия достигнутых точностных характеристик системы требуемым.

На первом этапе испытаний система устанавливалась на специально оборудованный автомобиль. При этом применялся стандартный одометр с одним цифровым выходным сигналом. Имитация второго (квадратурного) сигнала, необходимого для детектирования движения задним ходом, осуществлялась программно-аппаратными средствами путем введения регулируемой задержки первого сигнала (рис. 4).

Автомобиль перемещался со скоростью не более 15 м/с, что типично для автопогрузчиков, на борту которых предполагается эксплуатация системы. При этом путь автомобиля проходил как по открытому пространству, так и по участкам, где данные приемника Глонасс существенно искажались или оказывались недоступными: переулкам, проездам под мостами и эстакадами, подземным парковкам, «каньонам», образованным грузовыми контейнерами.

Выходные показания системы (рис. 5) сохранялись на жестком диске персонального компьютера и при постобработке использовались для отладки алгоритма. Точность получа-

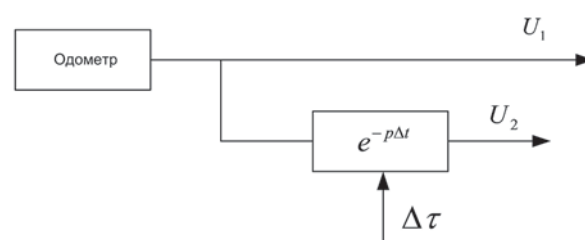


Рис. 4. Имитация квадратурного сигнала одометра

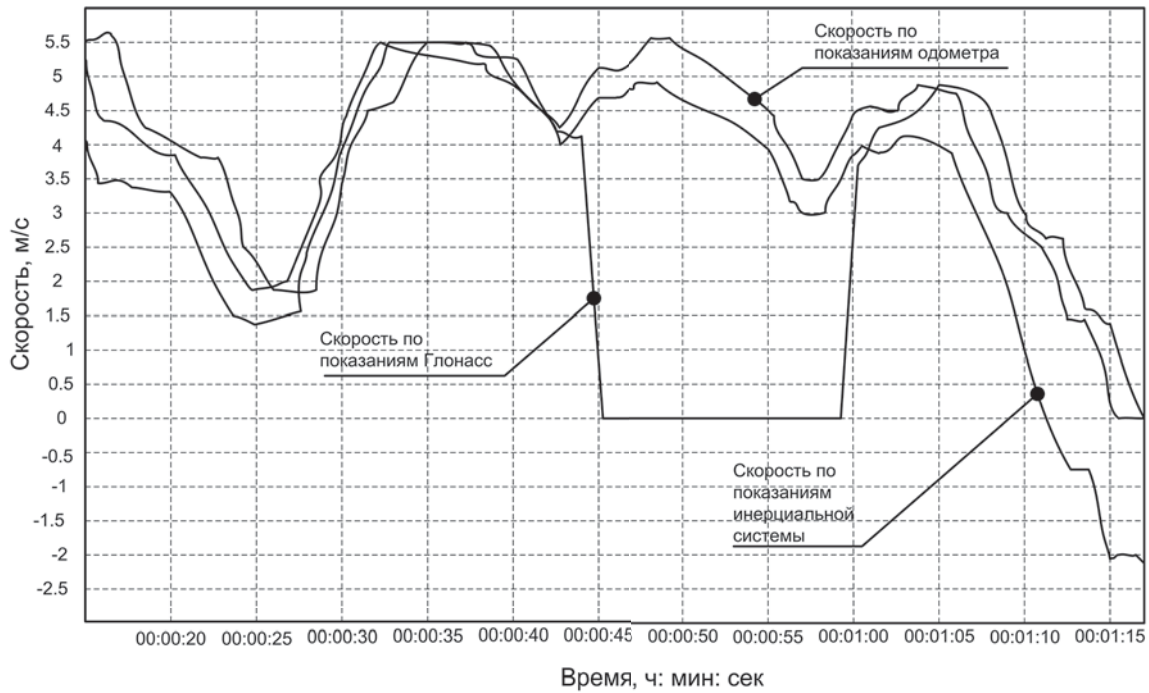


Рис. 5. Скорость транспортно средства, рассчитанная по показаниям различных датчиков

смого таким образом навигационного решения контролировалась путем сопоставления построенной траектории автомобиля со спутниковым снимком местности.

Второй этап испытаний предполагает установку навигационной системы на автопогрузчик и включение ее в единый информационный комплекс диспетчерской службы грузоперевозок на территории порта. В этом случае к навигационной системе подключается специализированный внешний двухканальный одометр, а антенна приемника Глонасс закрепляется на погрузчике на вершине мачты высотой около 2 м для улучшения качества приема сигналов навигационных спутников.

Результаты испытаний

По итогам первого этапа испытаний системы были выделены факторы, в наибольшей мере влияющие на точность навигационного решения. Во-первых, обнаружены погрешности приемников Глонасс, которые не могут быть выявлены в режиме реального времени на основании формальных критериев. К таким погрешностям относится, в частности, многократное отражение сигналов передатчиков навигационных спутников от предметов, окружающих приемник. Ошибка вычисления координат при этом достигает 20 м и более, и по этим неверным данным возможна ложная коррекция показаний интегрированной навигационной системы.

Во-вторых, при автономном определении местоположения транспортного средства точность измерения величины пройденного пути оказывается достаточной, однако нестабильность смещения нуля гироскопа оси Z_B вносит погрешность, квадратично возрастающую со временем. Действительно, пусть автопогрузчик движется строго на север со скоростью $V = 10$ м/с в течение времени t , а нестабильность смещения нуля датчика угловой скорости на этом интервале постоянна и равна $\delta\omega_{ZB} = 0,02$ °/с. Тогда накопившаяся ошибка расчета местоположения в восточном направлении при курсовой ошибке δH составит:

$$\delta E = \int_0^t V \delta H dt = -V \delta\omega_{ZB} \int_0^t t dt = -\frac{V \delta\omega_{ZB} t^2}{2}$$

График зависимости $\delta E(t)$ приведен на рис. 6.

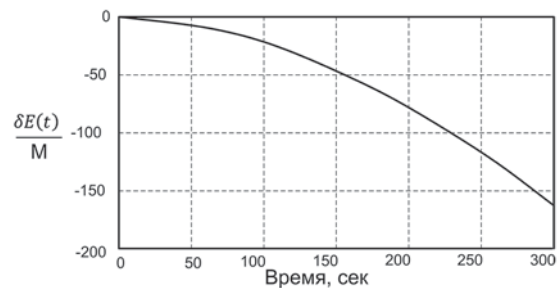


Рис. 6. Ошибка координаты, обусловленная погрешностью гироскопа

Таблица 1

Параметр	Корректируемый режим	Автономный режим (5 мин.)
Погрешности координат (м, 1 σ)		
Широта, долгота	0,6	50
Высота	2,0	6,0
Погрешности скорости (м/с, 1 σ)		
Горизонтальная скорость	0,1	0,1
Вертикальная скорость	0,3	0,5
Погрешности углов ориентации (град., 1 σ)		
Крен, тангаж	0,5	1,5
Курс	2,0	6,0

Таким образом, возможное время автономной работы ограничено 3...5 мин.

В-третьих, ущерб точности наносит процесс перехода из корректируемого в автономный режим счисления координат. Неточности, содержащиеся в показаниях приемника Глонасс в момент потери сигналов спутников, играют роль ошибок начальных условий для последующего определения местоположения инерциальными и одометрическими средствами. Если этот процесс происходит чаще, чем удается устранять ошибки, то результирующая погрешность может приобрести нарастающий характер.

Тем не менее, при испытаниях навигационной системы были достигнуты точностные показатели, которые следует признать высокими для данного класса приборов. Результаты испытаний сведены в таблицу 1. Полученные результаты подтвердили правильность принципов построения навигационного решения и эффективность включения одометра в качестве дополнительно источника информации.

Заключение

Проведенный в работе анализ принципов комплексирования одометра с модулями инерциальной и спутниковой навигации позволят обеспечить устойчивый режим работы интегрированной навигационной системы. Испытания интегрированной навигационной системы в реальных условиях эксплуатации продемонстрировали ее высокие точностные характеристики, подтвердив тем самым справедливость заложенных в ее основу концепций.

Дальнейшее совершенствование системы может вестись по следующим направлениям:

- переход к использованию более точных датчиков угловой скорости;

- разработка варианта системы усеченного состава (гироскоп вертикальной оси, приемник системы Глонасс, одометр, вычислитель);
- поиск более надежных алгоритмических критериев качества спутникового навигационного решения, на основе которых осуществляется коррекция показаний системы;
- освоение технологий крупносерийного и мелкосерийного производства.

Решение этих задач позволит создать интегрированную наземную навигационную систему, отвечающую требованиям широкого круга потенциальных заказчиков и обладающую значительными конкурентными преимуществами в сегменте рынка навигационной техники для специальных транспортных средств.

Литература

1. Salychev O.S. Applied Inertial Navigation: Problems and Solutions. – М.: BMSTU Press. – 2004. – 302 p.
2. Salychev O.S. MEMS-based Inertial Navigation: Expectations and Reality. – М.: BMSTU Press. – 2012. – 208 p.
3. Novikov V.V., Novikov P.V. & Gerdy V.N. The hardware structure of the navigation system. Proceeding of the 13th International Conference on Advanced Engineering, Computer Aided Design and Manufacturing CADAM 2015, Croatia, September 15th – 19th. – 2015, pp. 39–43.
4. Новиков П.В., Новиков В.В., Шейпак А.А. Интегрированная навигационная система наземного транспортного средства // Известия МГТУ «МАМИ». – 2015. - № 4(26), т.1. – 126 с.
5. Sheipak Anatoly, Novikov Pavel. The satellite-based algorithm for determining the location of hydraulic lift. Design of machines and structures. A publication of the university of Miskolc – Vol. 4, №2 (2014) pp. 45–53.