

УДК 621.396

РАЗРАБОТКА И НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ
МИКРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ
ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СЪЕЗДА С ДОРОГИ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

А.А. Леонец, В.А. Романовский, Е.А. Бондаренко,
О.Е. Павлюк, С.С. Лысенко

Межотраслевой научно-исследовательский институт проблем механики
«Ритм» при НТУУ «КПИ», Киев, Украина,
Н.В. Лукьяненко

Государственное предприятие «Оризон-навигация», Смела, Украина
D.S. Breed

Automotive Technologies International, Inc, Denville, U.S.A.

Аннотация

В статье описана система для предупреждения съезда с дороги легковых автомобилей, результаты ее лабораторной калибровки и натуральных испытаний. Система состоит из микромеханического инерциального блока CROSSBOW, приемника GPS, двух одометров и процессора с навигационным алгоритмом и фильтром Калмана. Экспериментально подтверждено, что разработанное программное обеспечение совместно с аппаратными средствами имеют необходимую для систем безопасности легковых автомобилей точность и обеспечивают СКО погрешности определения системой относительных координат автомобиля не более (20-30) см при потере видимости спутников GPS в течение 5 сек. и скорости движения автомобиля до 30 м/сек.

Введение

Каждый год более миллиона человек умирают и более 10 миллионов травмируются в дорожных авариях во всем мире. Только в США каждые 13 минут один человек умирает в автомобильной катастрофе. По прогнозам к 2020 году дорожные происшествия займут третье место в статистике причин смерти и травматизма людей. Общий ущерб от автомобильных аварий только в США в 1994 году составил 150.5 миллиардов долларов.

Наиболее часто аварии связаны со съездом автомобиля с дороги и по американской статистике занимают до 41 % всех автотранспортных аварий. Из них около 93 % происходит по вине водителей [1]. Более 30 % этих аварий можно было бы избежать, если бы водитель своевременно был бы предупрежден об опасности системой предотвращения съезда автомобиля с дороги (RDWS – “*Road Departure Warning System*”). Внедрение RDWS позволит согласно данным Американской Национальной Администрации по автоперевозкам ежегодно экономить до 6.4 миллиардов долларов.

Основными проблемами при создании RDWS являются: 1) высокоточное и надежное измерение положения транспортного средства относительно дороги в режиме реального времени; 2) предсказание и идентификация аварийной ситуации в реальном времени; 3) создание и оперативная корректи-

ровка подробной базы сети дорог; 4) снижение стоимости автомобильного комплекта RDWS ниже 500 \$.

В настоящей статье рассматриваются вопросы точности одной из главных подсистем RDWS: системы определения положения автомобиля относительно дороги. При этом основное внимание уделяется погрешностям определения относительных координат автомобиля при потере видимости спутников GPS.

Описание системы

Структура системы представлена на рис.1

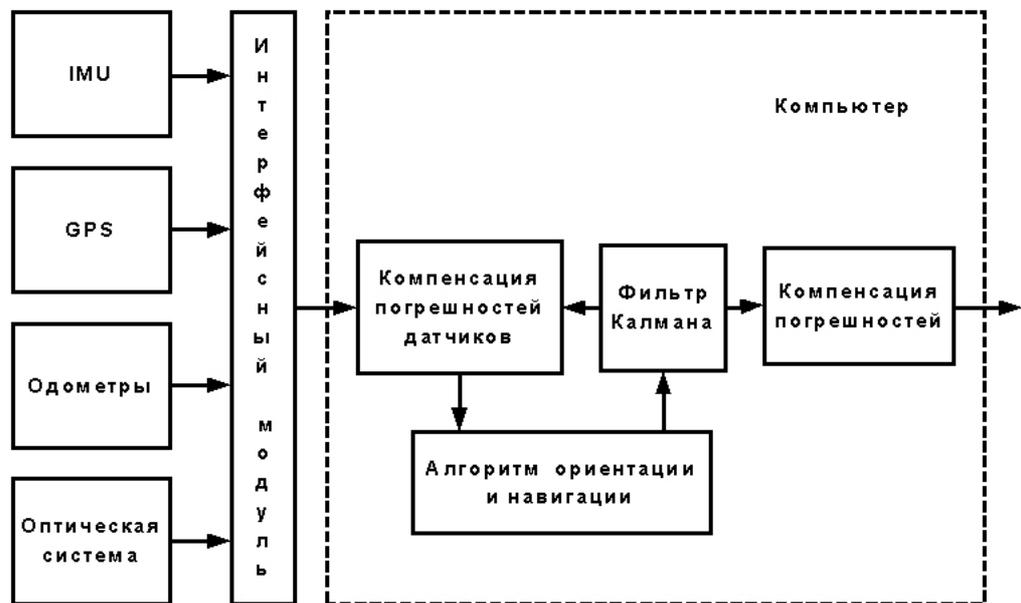


Рис.1. Структура системы определения положения автомобиля

В состав системы входят (рис.1):

- **микромеханический инерциальный модуль CROSSBOW IMU400CB1** (Crossbow Technology, Inc., USA, рис.2). Выходными сигналами модуля являются проекции векторов угловой скорости, линейного ускорения, время, температура;
- **приемник и антенна спутниковой навигационной системы СН-3701** («Оризон-Навигация», Украина). Выходные данные приемника передаются по протоколу NMEA и содержат текущее время, три координаты, путевой угол, скорость относительно Земли, оценку погрешностей координат и признак достоверности данных;
- **два одометра** (МНИИ ПМ «Ритм», Украина, рис.3), формирующие за полный оборот колеса автомобиля 1024 импульса;
- **оптическая система для измерения положения автомобиля относительно дороги** (МНИИ ПМ «Ритм», Украина, рис.4), состоящая из двух оптических датчиков и комплекта отражателей. Оптические датчики монтируются на одометре. В каждой контрольной точке на дороге устанавливаются один

или три отражателя на специальных кронштейнах. Геометрическое расположение кронштейнов выбрано таким образом, что они позволяют определять в контрольных точках дороги две координаты автомобиля, его линейную скорость и курсовой угол. Оптическая система выполняет вспомогательную роль и используется для оценки точности инерциальной системы;

- **интерфейсный модуль** (МНИИ ПМ «Ритм», Украина) для ввода результатов измерений в компьютер;
- **компьютер, аккумулятор и источник вторичного питания;**
- **комплект математического обеспечения** для ввода и обработки измерений, калибровки системы и ее моделирования на ЭВМ (МНИИ ПМ «Ритм»).

Схема установки оборудования на автомобиле представлена на рис.5 и рис.6.



Рис.2. Микромеханический инерциальный модуль CROSSBOW IMU 400CB1

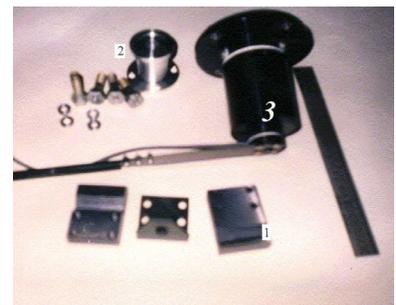


Рис. 3.
Одометр (3), датчик угла (2),
элементы крепления (1)



Рис. 4.
Оптическая система (1 – Оптические датчики,
2 – отражатели на кронштейнах)

Рис.5.
Компоновка аппаратуры в заднем багажнике
автомобиля (1-IMU, 2-источники питания,
3-оптический квадрант, 4-монтажная плата)



Рис. 6. Крепление одометра на колесе

Описание математического обеспечения

Основными компонентами математического обеспечения являются алгоритмы компенсации погрешностей датчиков, ориентации, вычисления линейной скорости и координат, фильтр Калмана и компенсации погрешностей выходных параметров системы.

Для отладки программного обеспечения, выбора численных методов, настройки фильтра Калмана и определения требований к элементам системы был разработан пакет программ LOTUS, состоящий из трех взаимосвязанных программ: LOTUS ROAD (модель автомобиля при движении по дороге заданного профиля), LOTUS SENSOR (модель инерциального модуля, спутниковой навигационной системы, одометров), LOTUS PC (алгоритмы компенсации погрешностей датчиков, ориентации, навигации и фильтр Калмана).

Путем моделирования на персональном компьютере для решения задачи ориентации был выбран одношаговый алгоритм третьего порядка точности, вычисления линейной скорости и координат - одношаговые алгоритмы второго порядка точности, имеющие методические погрешности на несколько порядков меньше инструментальных погрешностей системы.

Фильтр Калмана реализован по замкнутой схеме [2,3]. Фильтр оценивает 24 параметра: погрешности координат (3), погрешности линейной скорости (3), погрешности углов ориентации связанной системы координат (СК) относительно географической СК (3), дрейфы гироскопов (3), погрешности масштабных коэффициентов гироскопов (3), смещения нуля акселерометров (3), погрешности масштабных коэффициентов акселерометров (3), погрешности одометров (2), погрешность вычисления пройденного пути инерциальной системой (1).

Вектор наблюдений состоит из 9 элементов: разность между координатами (3) и линейной скоростью (3), измеряемых датчиками позиционной коррекции (GPS, оптическая система измерения положения автомобиля относительно дороги) и инерциальной системой; разность между пройденным путем (1) и углом поворота (1) вокруг вертикальной оси, измеряемых одометрами и инерциальной системой, нулевая скорость (1) автомобиля вдоль оси заднего моста автомобиля.

Калибровка системы в лаборатории

В лабораторных условиях проверялись и калибровались следующие параметры:

- продолжительность начального прогрева датчиков инерциального модуля после включения питания;
- стабильность внутреннего таймера инерциального модуля;
- спектральные плотности и корреляционные функции гироскопов и акселерометров;
- систематический дрейф гироскопов и смещение нуля акселерометров;
- случайный дрейф гироскопов и акселерометров;

- разрешающая способность гироскопов и акселерометров;
- масштабные коэффициенты гироскопов и акселерометров;
- угловое рассогласование осей чувствительности гироскопов и акселерометров;
- дрейфы гироскопов, зависящие от линейного ускорения;
- асимметрия масштабных коэффициентов гироскопов и акселерометров.

При этом использовалось следующее оборудование и приборы:

- малогабаритная поворотная установка МПУ (рис.7);
- оптическая делительная головка ОДГ-10 (рис.8);
- установка для калибровки одометров и оптических датчиков (рис.9);
- оптический квадрант и установочная плита (рис.10).



Рис. 7.

Малогабаритная поворотная установка МПУ для определения разрешающей способности гироскопов

Оптическая делительная головка для определения разрешающей способности акселерометров



Рис. 8.

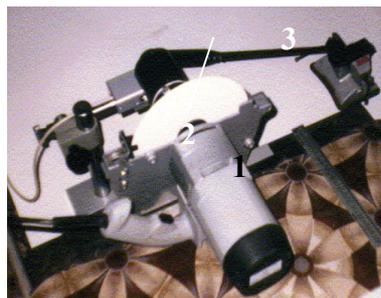
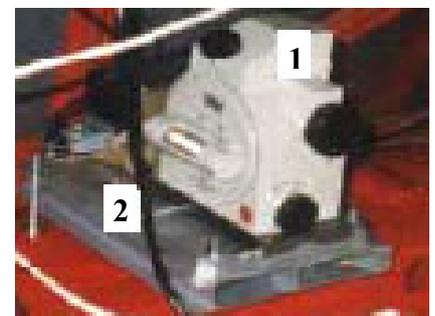


Рис. 9. Установка для калибровки одометров и оптических датчиков (1- двигатель; 2 – одометр; 3 – диск с оптическим отражателем; 4 – оптический излучатель и приемник)

Рис. 10.
Оптический квадрант (1)
и установочная плита (2)



Результаты калибровки гироскопов и акселерометров инерциального модуля CROSSBOW IMU400CB1 представлены в табл. 1.

Таблица 1.

Результаты калибровки гироскопов и акселерометров инерциального модуля

Наименование параметра	Размерность	Действительное значение	«Паспортное» значение
Гироскопы			
Диапазон	°/с	Не определялся	± 100
Дрейф: - в запуске - от запуска к запуску	°/с	X: + 0,22 ± 0,03 Y: + 0,105 ± 0,01 Z: - 0,041 ± 0,01 X: - 0,24 ± 0,04 Y: + 0,14 ± 0,03 Z: - 0,03 ± 0,01	<± 1.0
Масштабный коэффициент: - в запуске - от запуска к запуску	б/р	X: 1,0001 ± 0.00009 Y: 1,0014 ± 0.0002 Z: 1.0010 ± 0.0006 X: 1,00006 ± 0.0001 Y: 1,0012 ± 0.0001 Z: 1.0017 ± 0.0001	Не указано
Разрешающая способность	°/с	< ± 0.001 - 0.004	< 0.025
Случайный дрейф	°/час ^{1/2}	X: 0.69-0.76 Y: 0.58-0.65 Z: 2.24-2.29	< 0.85
Неортогональность осей	угл.мин.	-4,3+ 42,0	< 60
Асимметрия масштабного коэффициента	%	X: - 0,47...+0,34 Y: -0,64...+0,10 Z: -0,94...+0,03	Не указано
Коэффициент чувствительности к линейному ускорению	°/с/м/с ²	Гироскоп X: Вдоль X: (-65...+ 84)*10 ⁻⁵ Вдоль Y: (-15...-5,8)*10 ⁻⁵ Вдоль Z: (+20...+21)*10 ⁻⁴ Гироскоп Y: Вдоль X: (+ 1...+ 6)*10 ⁻⁴ Вдоль Y: (+ 5...+ 11)*10 ⁻⁴ Вдоль Z: (-143...-142)*10 ⁻⁵ Гироскоп Z: Вдоль X: (+14...+14.6)*10 ⁻⁵ Вдоль Y: (+7...+46)*10 ⁻⁵ Вдоль Z: (+139...+146)*10 ⁻⁵	Не указано
Акселерометры			
Диапазон	g	Не определялся	± 2
Смещение: - в запуске - от запуска к запуску	м/с ²	X: + 0,0283 ± 0,0026 Y: - 0,0214 ± 0,0039 Z: - 0,0093 ± 0,0045 X: + 0,025 ± 0,0019 Y: - 0,015 ± 0,0036 Z: - 0,012 ± 0,0022	<± 0,085
Масштабный коэффициент:			

- в запуске		X: 1,0001 ± 0.00009 Y: 1,0014 ± 0.0002 Z: 1.0010 ± 0.0006	Не указано
- от запуска к запуску	б/р	X: 1,00006 ± 0.0001 Y: 1,0012 ± 0.0001 Z: 1.0017 ± 0.0001	
Разрешающая способность	м/с ²	<± 0.0005 m/c ² (±10 ^{''})	< 0.0025
Случайный уход	м/с/час ^{1/2}	X: 0.037-0.074 Y: 0.037-0.062 Z: 0.038-0.061	< 0.1
Неортогональность осей	угл.мин.	-6,5+ 8,3	< 60
Асимметрия масштабного коэффициента	%	X: -0,75...+0,91 Y: -0,64...+1,03 Z: -0,63...+1,65	Не указано
Инерциальный модуль (в целом)			
Нестабильность внутреннего таймера	мкс	± 14	Не указано
Начальный прогрев модуля	мин	20 60	Не указано

Натурные испытания

Целью натурных испытаний являлось получение оценки точности определения координат автомобиля (движущегося со скоростью до 30 м/с) при потере видимости спутников GPS в течение (5 – 10) с.

Методика натурных испытаний

Натурные испытания проводились на трассе (рис.16) для автомобильных гонок спорткомплекса «Чайка» (г. Киев). На прямолинейном отрезке трассы был предварительно размечен «мерный» участок, вдоль которого на фиксированном расстоянии друг от друга с интервалом от 10 до 150 м ставились оптические отражатели (рис.17). Общая протяженность размеченного участка трассы составляла 550 м. Движение автомобиля вдоль мерного участка приведено на рис.18.

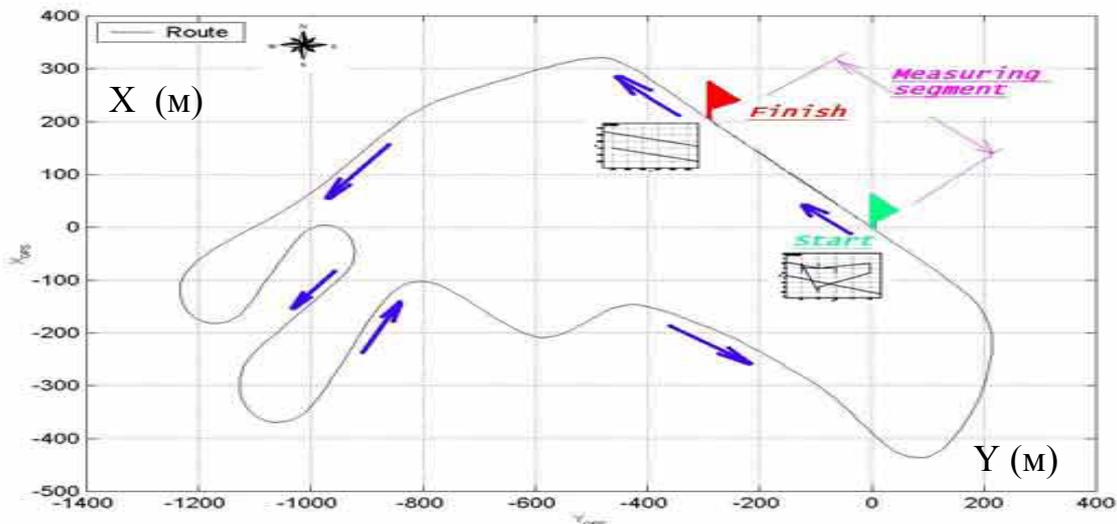


Рис.16. Схема движения автомобиля на полигоне «Чайка»

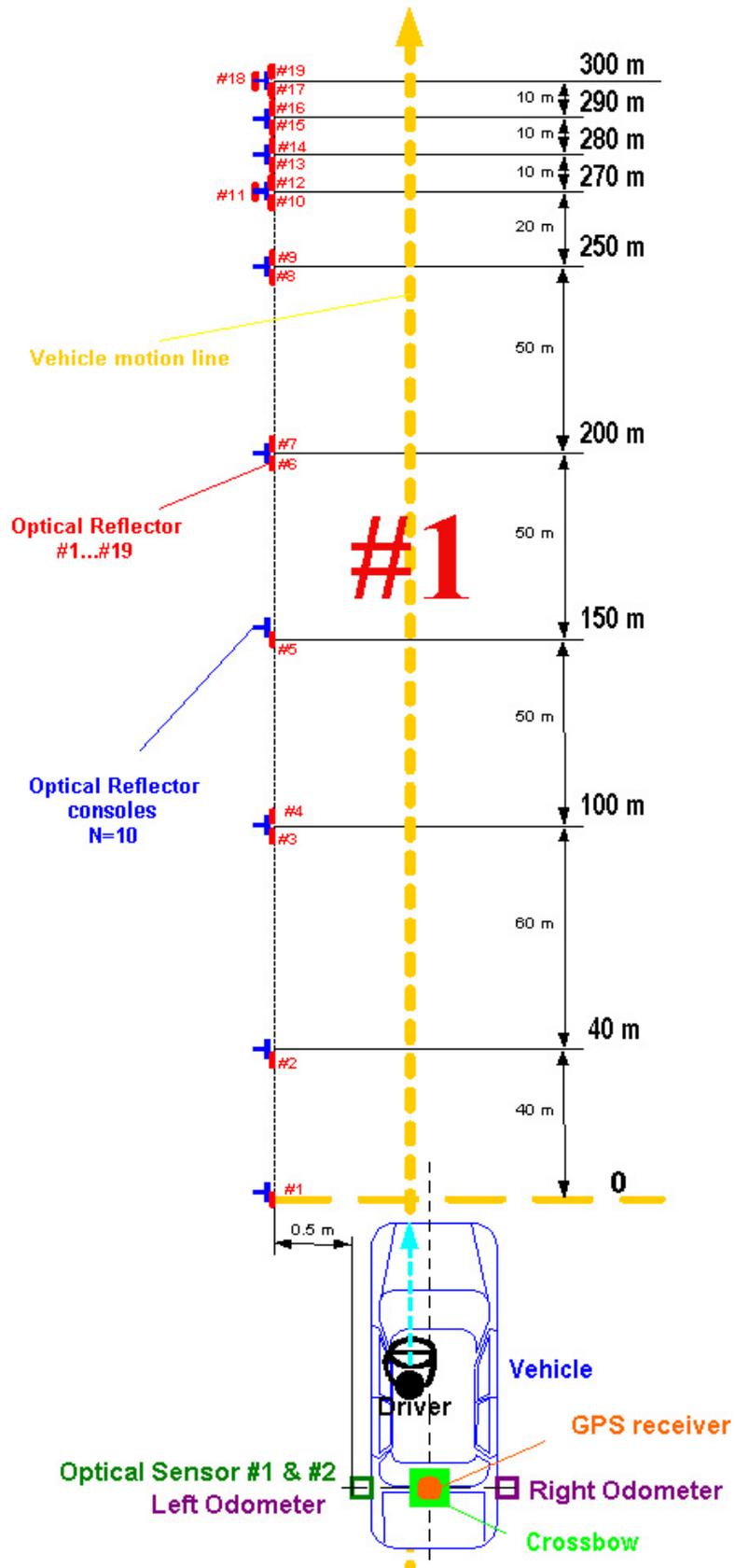


Рис.17. Схема разметки №1 мерного участка

На полигоне «Чайка» было выполнено более 20 экспериментов, в том числе¹:

- «Калибровка одометров» (прямолинейное движение автомобиля вдоль мерного участка на расстоянии 0.55 м между оптическими отражателями и оптическими датчиками);
- «Движение на максимальной скорости» (прямолинейное движение автомобиля на максимально возможной скорости вдоль мерного участка);



Рис. 18.
Движение автомобиля вдоль мерного участка



- «Движение по змейке» (криволинейное движение между оптическими отражателями на мерном участке);
- «Уход от прямой линии»;
- «Замкнутый маршрут по «Малому кругу»;
- «Замкнутый маршрут по «Большому кругу»;

Каждый из перечисленных экспериментов повторялся не менее трех раз и состоял из следующих этапов: 1) выезд автомобиля на исходную позицию

¹ Курсивом отмечено условное наименование экспериментов, которое отражает его суть.

(точка Start); 2) включения питания датчиков²; 3) стоянка с выключенным двигателем (60–100 сек); 4) начало движения; 5) прохождение мерного участка; 6) движение по трассе до точки Finish.

При выполнении экспериментов производилась в реальном времени синхронная запись выходных сигналов:

- инерциального модуля с частотой 134 Гц в шкале времени внутреннего таймера модуля (рис.13);
- двух одометров, установленных на правом и левом колесе автомобиля, с частотой 134 Гц в шкале времени интерфейсного модуля (рис.14);
- сигналов GPS с частотой 1 Гц в шкале времени UTC (рис.15);
- оптической системы измерения положения автомобиля относительно дороги (моменты времени появления выходных импульсов от датчиков оптической системы) в шкале времени интерфейсного модуля.

Результаты натурных испытаний

1. Калибровка одометров

По результатам трех экспериментов «Калибровка одометров» определены численные значения масштабных коэффициентов обоих одометров (таблица 2).

Таблица 2.

Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение масштабных коэффициентов одометров

Левый одометр		Правый одометр	
Математическое ожидание	среднеквадратическое отклонение	Математическое ожидание	среднеквадратическое отклонение
0.0016725040	0.00003498244	0.0016720668	0.00003469998

2. Измерение системой траектории движения автомобиля

На рис. 18 показана траектория движение автомобиля, измеренная GPS (верхний график) и вычисленная по данным инерциального модуля, одометров и оптической системы (нижний график).

3. Погрешности вычисления координат без пропадания сигналов GPS и оптической системы

На рис. 19 представлены типичные зависимости изменения во времени погрешностей вычисления продольной и поперечной координаты точки установки инерциального модуля на автомобиле при комплексировании информации инерциального модуля, одометров, GPS и оптической системы. На этом рисунке хорошо видно, что в течение переходного периода (200-220 сек) фильтр выполняет калибровку и компенсацию ошибок инерциального

² Напряжение питания инерциального модуля включалось перед началом всего дневного экспериментального цикла и выполнялся начальный прогрев его датчиков в течение 1 часа; отключение питания модуля производилось только после окончания дневного цикла испытаний.

модуля, а затем разработанная система позволяет определять координаты с погрешностью (3σ) 10-15 см.

Анализ результатов экспериментов «Движение на максимальной скорости» (рис.20) показывает, что разработанная система при движении автомобиля со скоростью до 30 м/с в условиях нормальной видимости спутников GPS обеспечивает максимальную погрешность (3σ) вычисления продольной координаты не более 1,0 м, а поперечной - не более 0,15 м.

4. Погрешности вычисления координат при условии пропадания сигналов GPS и оптической системы

На рис. 20 показаны типичные зависимости от времени погрешностей вычисления продольной и поперечной координаты автомобиле при имитации кратковременного (до 5-7 секунд) пропадания видимости спутников GPS и отсутствии информации от оптической системы³.

Анализ результатов всех выполненных экспериментов показывает, что на интервалах времени, когда кратковременно (5-7 сек) не видны спутники GPS, разработанная система обеспечивает погрешность вычисления продольной координаты не более 0.65 м (3σ), а поперечной - не более 0,90 м (3σ) при движении автомобиля со скоростью до 30 м/с.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что разработанное программное обеспечение и аппаратные средства на базе микромеханических инерциальных датчиков обеспечивают необходимую для систем безопасности легковых автомобилей погрешность (СКО 20...30см) измерения относительных координат автомобиля при потере видимости спутников в течение (5-7) секунд и скорости автомобиля (20-30) м/сек. На следующих этапах работ целесообразно провести исследования по созданию более дешевых вариантов инерциальных модулей, используя специфические условия их работы и решаемые задачи в системах безопасности автомобилей.

Благодарности

Авторы доклада выражают благодарность компаниям Automotive Technologies International (США) и ГП «Оризон-навигация» (Украина) за предоставленные аппаратные средства для проведения экспериментов и научно-технические консультации по связанным с ними вопросам, а также администрации спорткомплекса «Чайка» за содействие в проведении натуральных экспериментов.

³ На рис.20 и рис.21 представлены результаты послемаршрутной обработки одного и того же эксперимента, но при различных условиях видимости спутников GPS и оптической системы.

Список используемой литературы:

1. Run-Off-Road Collision Avoidance Using IVHS Countermeasures. DOT HS 809 170 December 1999.
2. Сэйдж Э., Мэлс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М., 1976.
3. С.С. Ривкин., Р.И. Ивановский, А.И. Костров. Статистическая оптимизация навигационных систем. Л., 1976.

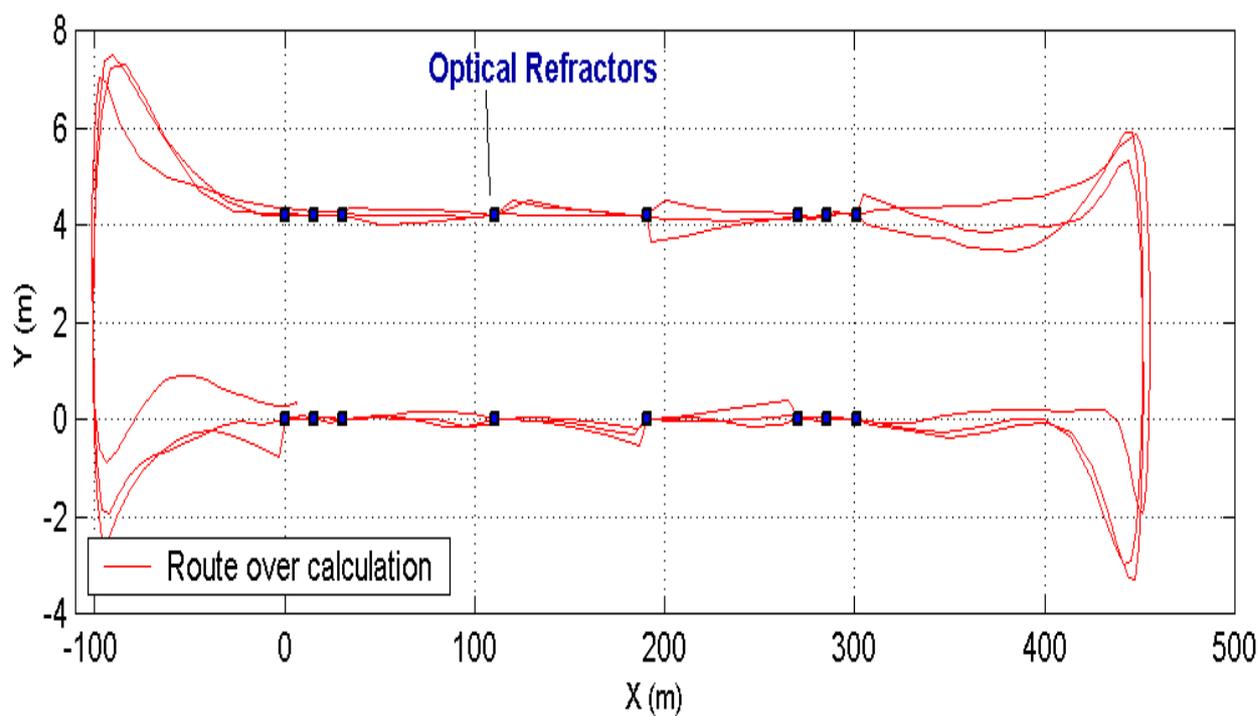
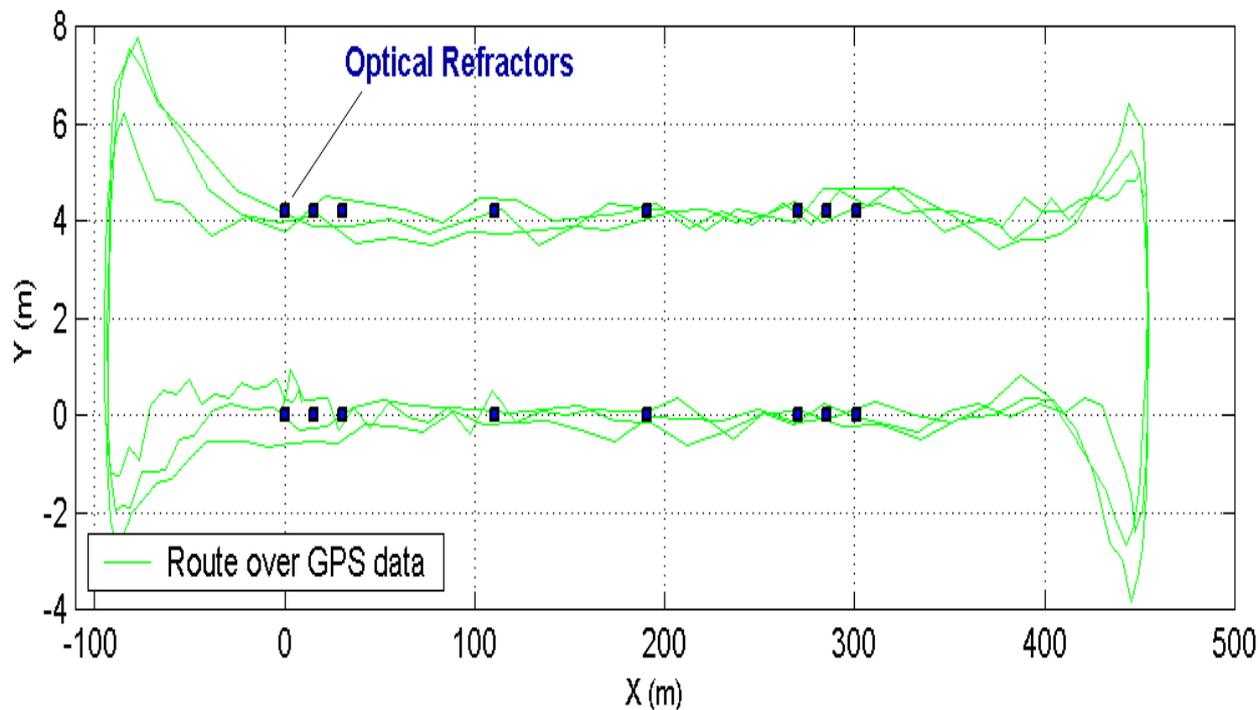


Рис.18. Траектория движения, измеренная GPS и инерциальной системой определения положения автомобиля (эксперимент «Калибровка одометров»)

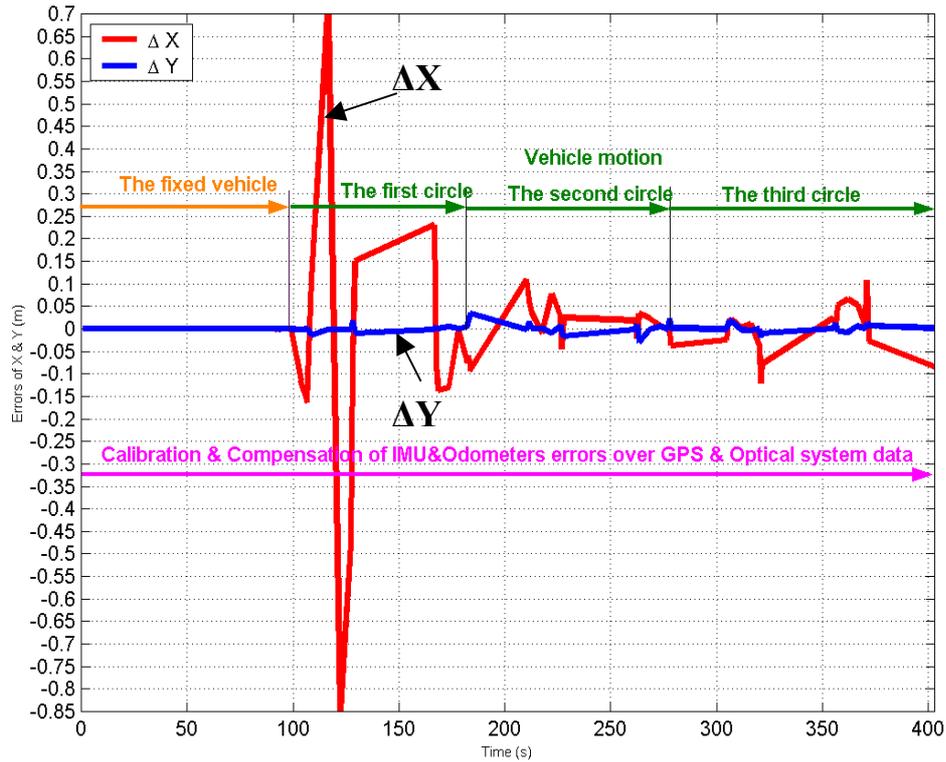


Рис.19. Погрешности вычисления продольной (ΔX) и поперечной (ΔY) координаты автомобиля при комплексировании информации инерциального модуля, одометров и GPS (по результатам эксперимента «Калибровка одометров»)

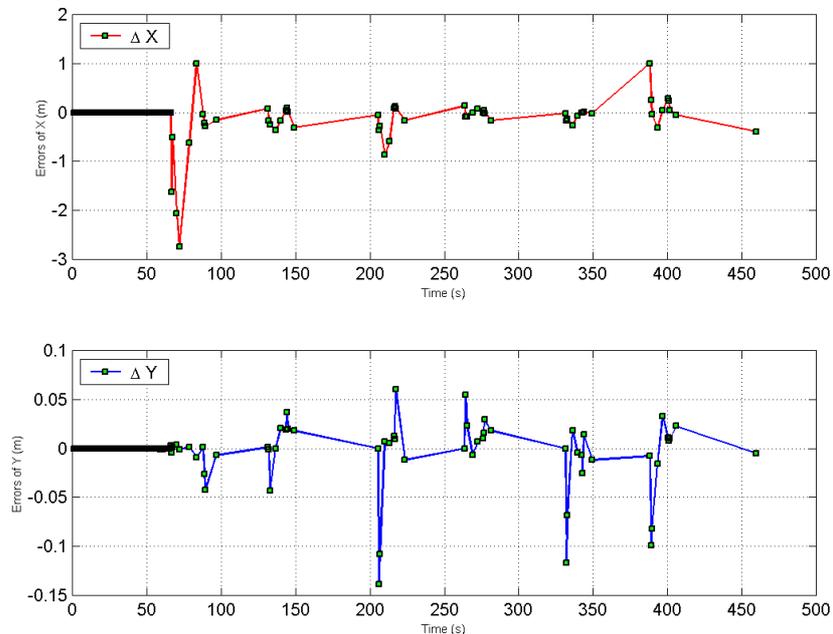


Рис.20. Погрешности вычисления продольной (ΔX) и поперечной (ΔY) координаты при скорости движения автомобиля до 30 м/с (результатам эксперимента «Движение на максимальной скорости»)

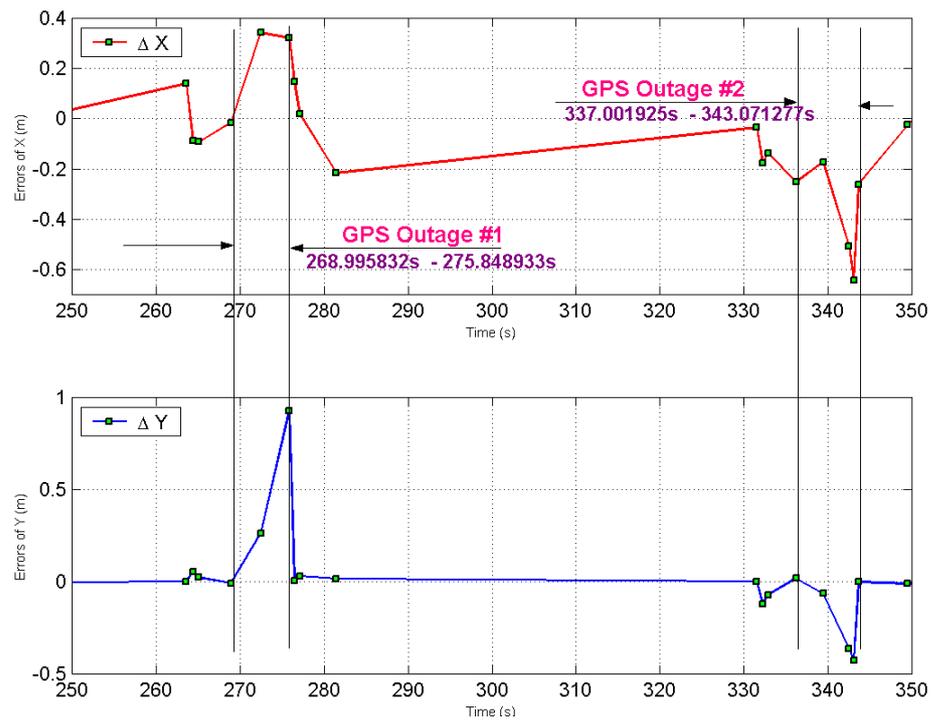


Рис.21. Погрешности продольной (ΔX) и поперечной (ΔY) координат при отсутствии сигналов GPS и оптической системы (эксперимент «Движение на максимальной скорости»)