

УДК 681.586.325

Малогабаритная комплексная навигационная система на микромеханических датчиках

Мишин А.Ю.*, Кирюшин Е.Ю., Обухов А.И.., Гурлов Д.В.****

Арзамасское научно производственное объединение (Темп-Авиа),

ул. Кирова, 26; Арзамас, 607220, Россия

*e-mail: andrew_mishin@mail.ru

**e-mail: mysterio7@rambler.ru

***e-mail: sinner2382@mail.ru

Аннотация

Представлена малогабаритная комплексная навигационная система, выполненная на базе микромеханических датчиков первичной информации и приемника GPS, разработанная ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», описаны способы повышения точностных характеристик системы за счет компенсации инструментальных погрешностей, приведены результаты испытаний в составе комплекса наземной обработки на автономном транспортном средстве.

Ключевые слова: навигационная система, датчик угловой скорости, акселерометр, комплексирование информации

Введение

В последние несколько лет стали доступны инерциальные устройства нового типа с компактными чувствительными элементами - датчики угловых скоростей и акселерометры на основе микроэлектромеханической технологии (MEMS) с низкой стоимостью и малыми габаритами.

Микромеханические датчики, серийно производимые иностранными компаниями, имеют сравнительно низкую точность. Поэтому при применении в составе инерциальных систем необходимо осуществлять коррекцию информации. Успехи, достигнутые в области спутниковой навигации, широкое распространение систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, привели к появлению значительной номенклатуры приемников спутниковой навигации, имеющих малые габариты и низкую стоимость. При этом, такие приемники обеспечивают достаточную точность определения координат и скорости.

В случае кратковременного отсутствия сигналов приемника спутниковой навигации, может быть использована другая корректирующая информация, например, о магнитном поле Земли, получаемая от микромеханических трехкомпонентных магнитометров, а в вертикальном канале – от датчика давления.

Тем не менее, основным режимом работы комплексной навигационной системы является режим интеграции инерциальной и спутниковой системы. Необходимость интеграции двух столь непохожих систем навигации обусловлена принципиально различным характером ошибок, присущих каждой из них. Справедливо ожидать, что две системы при совместном их применении будут дополнять и корректировать одна другую, повышая надежность и точность работы навигационного комплекса.

Совместное применение инерциальной навигационной системы (ИНС) и GPS позволяет решать ряд задач прикладной навигации, в которых требуется непрерывная выдача информации. Причем, под перерывом здесь следует понимать как вызванный пропаданием спутников (в условиях городской застройки, под мостами и т.д.), так и интервал между двумя измерениями GPS. Другой проблемой использования GPS в реальном времени являются скачкообразные изменения показаний, вызванные изменением состава созвездия спутников. В зависимости от количества и положения спутников эти скачки могут достигать десятков метров. Использование ИНС позволяет

эффективно фильтровать эти скачки и сглаживать навигационные данные, а использование методов траекторией обработки позволит построить высокоточную сглаженную траекторию транспортного средства.

Целью работы является исследование характеристик малогабаритной комплексной навигационной системы (БИНС-ММГ), построенной на базе микромеханических датчиков, и оценка возможности повышения точностных характеристик системы за счет компенсации инструментальных погрешностей.

Задачи:

- исследование характеристик микромеханических датчиков первичной информации (ДПИ) и системы в целом;
- оценка возможности повышения точности навигационной системы в автономном режиме работы (при отсутствии корректирующей информации), за счет компенсации ошибок в процессе калибровки системы;
- проведение лабораторных испытаний системы на температурных воздействиях, а так же испытаний на комплексе наземной отработки (в составе движущегося транспортного средства) с имитацией отказа GPS-приемника.

1 Формирование облика БИНС-ММГ

1.1 Требования к функциональности и технические характеристики

Бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) в составе изделия БИНС-ММГ является корректируемой инерциальной навигационной системой, имеющей собственный вычислительный модуль TMS320.

Используя алгоритм интегрирования данных GPS с измерениями инерциальных, магнитометрических датчиков и датчика давления, комплексная навигационная система выдает в цифровой форме полный набор параметров линейного и углового движения:

- координаты местоположения и высота;
- углы ориентации: курс, крен, тангаж;
- скорость в земной системе координат (СК);
- вертикальная скорость;
- ускорения, угловые скорости.

Технические характеристики БИНС-ММГ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики БИНС-ММГ

Выходные данные	Частота выдачи Протокол передачи Время готовности Формат данных	100 Гц RS-422 45сек бинарный
Окружающая среда	Диапазон рабочих температур Температура хранения Влажность	-40...+70°C -50...+85°C 5%...95%
Физические воздействия	Удар Синусоидальная вибрация	40g (5 мс) 2g (20..2000 Гц)
Электрические параметры	Напряжение питания Потребляемая мощность	9...36 В 1,2 Вт
Массогабаритные параметры	Размеры Объем Вес	60x50x22 мм 0,065 дм ³ < 0,095 кг
Надежность	Ресурс	5000 ч
Рабочие диапазоны	Крен Тангаж Курс Ускорение Угловая скорость	±180° ±90° ±180° ±2 ÷ ±16g ±300°/с

1.2 Требования к аппаратному составу и особенности функционирования

Рассматриваемая комплексная навигационная система включает в свой состав БИНС на основе трех микромеханических гироскопов (ММГ) ADIS16100 и трехосного микромеханического акселерометра (ММА) ADXL345, и информационную поддержку аппаратуры потребителей спутниковых навигационных систем (далее по тексту модуль GPS), микромеханических магнетометров и датчика давления.

Инерциальные датчики (ММА, ММГ). Измеряют линейное ускорение, угловую скорость по трем ортогональным осям чувствительности. Особенности: высокий уровень смещения нулевого сигнала, шума, нестабильность нулевого сигнала, погрешности масштабного коэффициента, неортогональности осей, влияние ускорения по прямым и перекрестным осям, влияние температуры, вибрации. Применение: используются для формирования инерциального решения – координат, проекций скорости, углов ориентации (курс, тангаж, крен).

GPS-приемник с антенным блоком. Измеряет координаты (широта, долгота, высота), проекции вектора скорости, путевой угол. Возможно отсутствие данных вследствие потери сигнала. Применение: используется для коррекции инерциального решения, оценки инструментальных погрешностей инерциальных датчиков.

Трехкомпонентный магнетометр. Измеряет проекции вектора напряженности магнитного поля Земли на оси чувствительности. Особенности: высокий уровень смещения нулевого сигнала, шума, неортогональности осей, магнитные девиации. Применение: используется для расчета начального угла курса, коррекции текущего угла инерциального курса.

Датчик давления. Измеряет абсолютное давление. Особенности: зависит от текущего состояния атмосферы. Применение: используется для коррекции высоты и скорости ее изменения при отсутствии данных GPS.

1.3 Требования к точности

Разработка БИНС-ММГ проводится в рамках составной части научно-технической работы СЧ НИР «Статуэтка – 1 – ТЕМП-АВИА», выполняемой в рамках Федеральной целевой программы №1 по развитию оборонно-промышленного комплекса Российской Федерации.

В процессе разработки БИНС-ММГ требования к точности были

сформированы с учетом возможной специфики применения системы в качестве резервного поставщика навигационной информации (табл. 2).

Таблица 2

Модифицированные требования к макетам БИНС низкой точности

	ИНС/GPS Интегрированный режим	Автономное инерциальное решение
Параметры линейного движения		
Координаты (комплексированное решение)	6 м	300 м (3 мин. после пропадания GPS)
Путевая скорость	0,2 м/с	5 м/с (3 мин. после пропадания GPS)
Вертикальная скорость	0,25 м/с	0,5 м/с
Углы ориентации (крен, тангаж)		
Прямолинейный полет*	0,1°...0,2°	0,2°...0,4°
Маневрирование**	0,2°...0,4°	0,4°...0,7°
Курс		
	Путевой угол	Магнитный курс***
Произвольный полет	0,4°	1°

1.4 Состав и структура аппаратуры БИНС-ММГ

Аппаратура БИНС-ММГ состоит из вычислительного блока (в негерметичном корпусе) и антенны GPS. Внешний вид аппаратуры БИНС-ММГ с описанием назначения разъемов представлен на рисунках 1, 2.

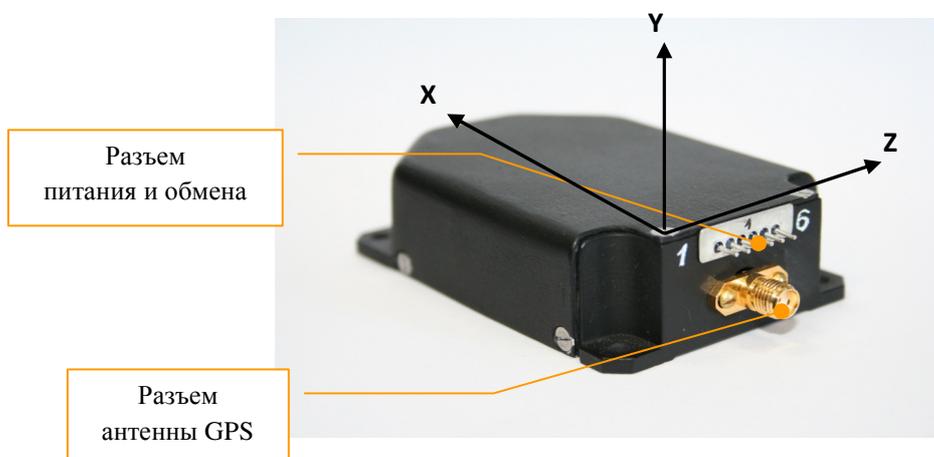


Рисунок 1

Антенный кабель



Рисунок 2

В состав блока БИНС-ММГ входят следующие компоненты:

- сигнальный процессор TMS320F28335;
- микромеханические акселерометры ADXL345;
- микромеханические гироскопы ADIS16100;
- приемник GPS LR9102;
- датчик давления STD60-030 0 10;
- трехкомпонентный магнетометр HMC 1053;
- датчик температуры.

2 Испытания

2.1 Лабораторные испытания

Для оценки возможности применения БИНС-ММГ в качестве БИНС низкой точности проведены исследования характеристик трехосного блока акселерометров (ADXL345) и ДУС (ADIS16100).

Для предварительной оценки влияния температуры на характеристики датчиков осуществлён прогрев системы в течение 15 мин со съёмом данных, осредненных на интервале времени 10 сек.

Результаты приведены на рисунках 3, 4. Осредненные показания акселерометров по трем каналам (A_x , A_y , A_z) приведены в импульсах, при этом

1g соответствует 2048 импульсов. Цена импульса ДУС (F_{ix}, F_{iy}, F_{iz}) соответствует 1/8192 рад/с. На графиках по оси абсцисс – время, сек. Таким образом, 1 импульс показаний акселерометров соответствует $4.9 \cdot 10^{-4}$ g, 1 импульс показаний ДУС соответствует 25.2 град/ч.

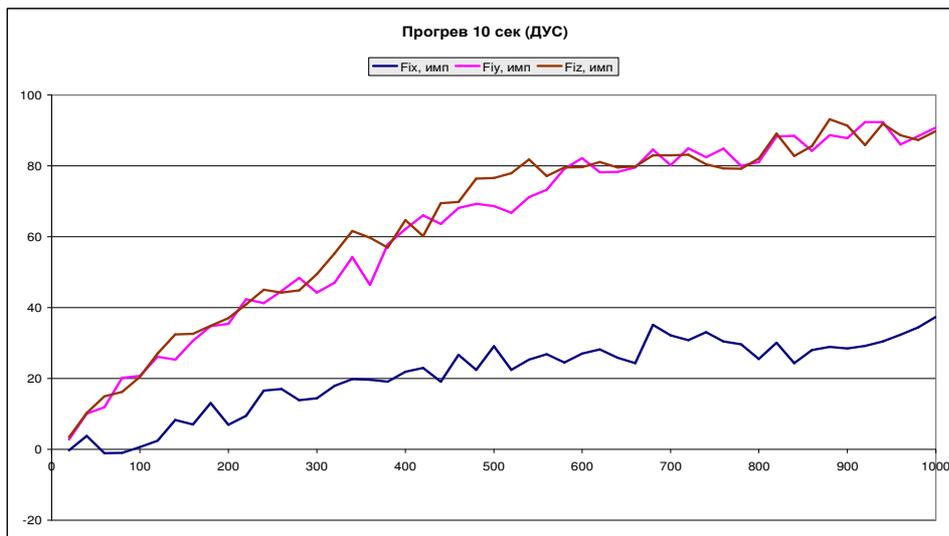
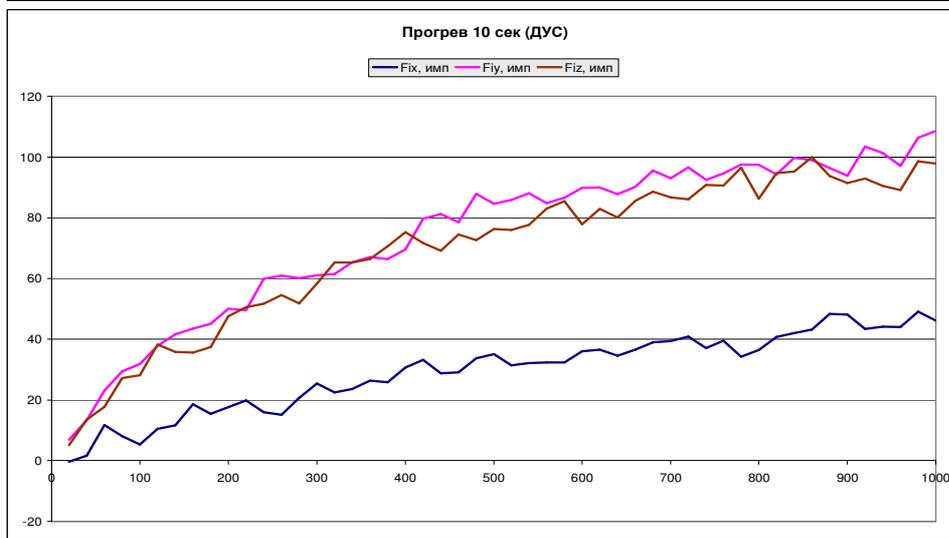
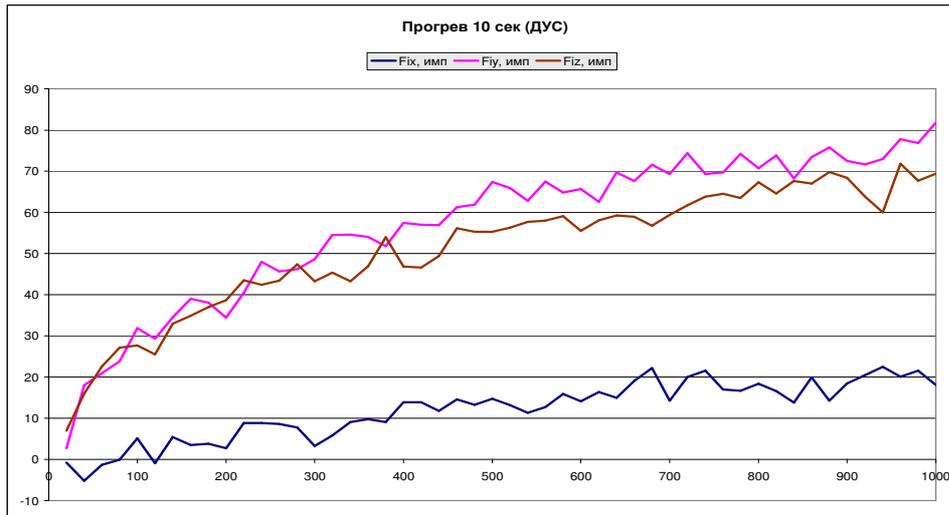


Рисунок 3 - Графики зависимости показаний ДУС от времени прогрева (при трех идентичных запусках, длительность ~ 15 минут (осреднение на интервале 10 секунд), показания ДУС приведены в импульсах, 1 импульс - 25.2 град/ч)

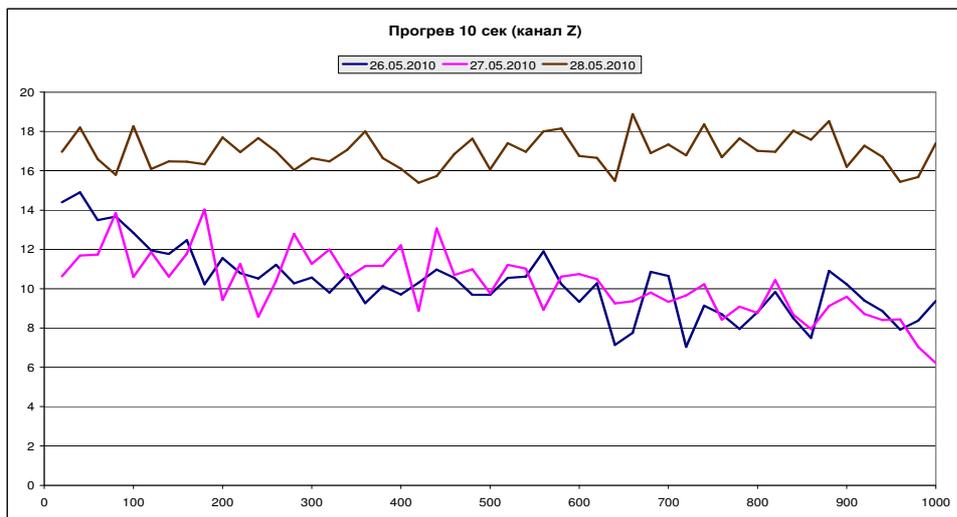
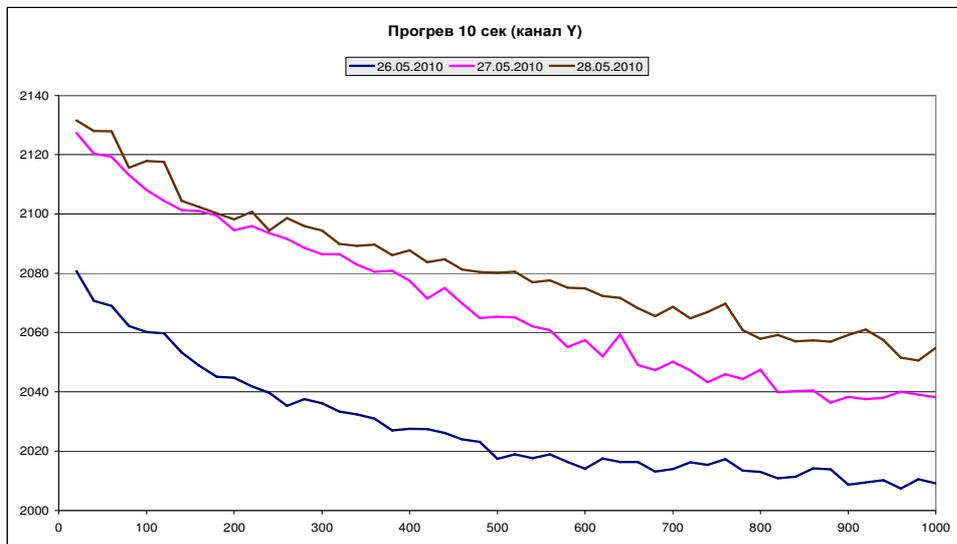
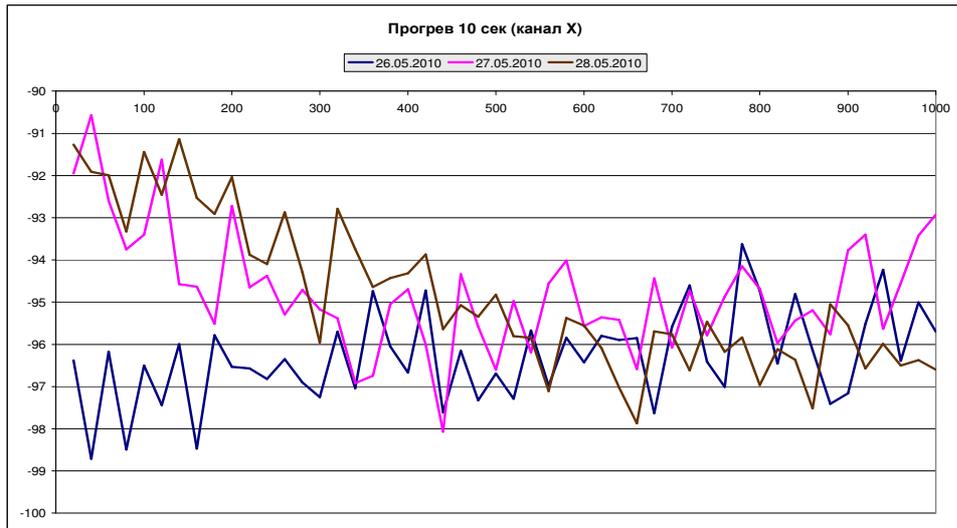
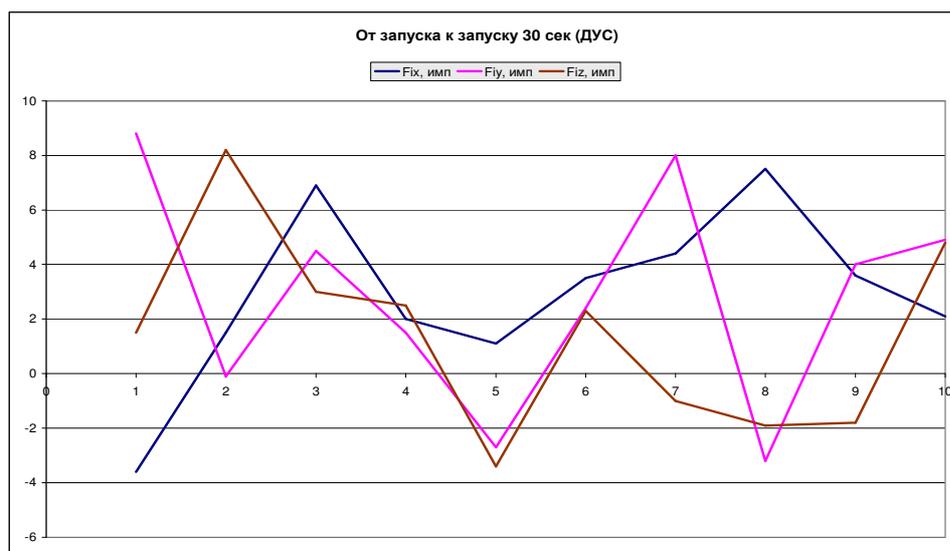


Рисунок 4 - Графики зависимости показаний блока акселерометров (БА) от времени прогрева (при трех идентичных запусках, длительность 15 минут (осреднение на интервале 10 секунд), показания акселерометров приведены в импульсах, 1 импульс - $4.9 \cdot 10^{-4} g$)

Из рисунков видно, что изменение нулевых сигналов горизонтальных каналов акселерометров соответствует изменению угла порядка 0.15 град за время самопрогрева. Изменение показаний вертикального акселерометра вызвано, по-видимому, изменением масштабного коэффициента в процессе самопрогрева, что соответствует технической документации на датчик ADXL345. Изменение дрейфа ДУС ADIS16100 в процессе самопрогрева может достигать $2000\text{-}3000 \text{ град/ч}$.

На второй стадии для оценки изменения характеристик от включения к включению проводился съём данных БИНС-ММГ с осреднением показаний за 30 сек с выключением питания в 10 повторениях. Результаты приведены на рисунках 5, 6.



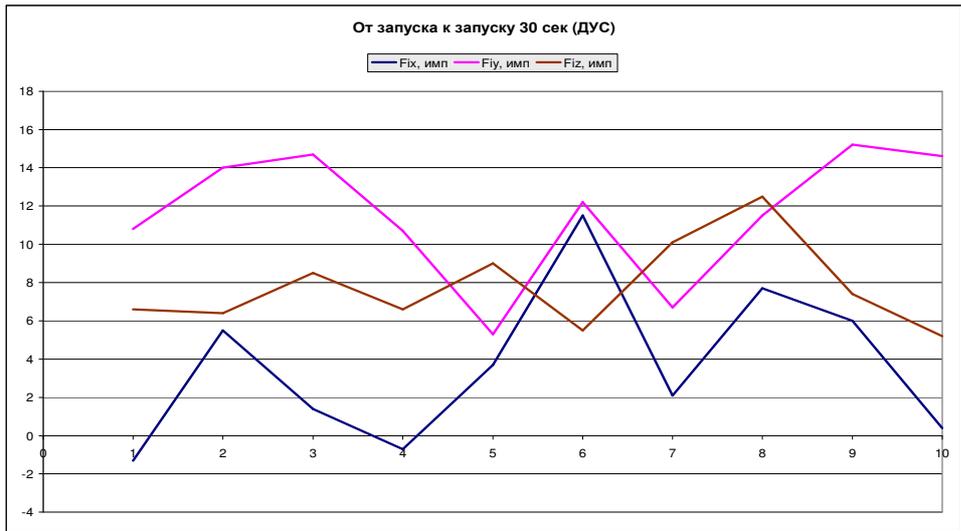
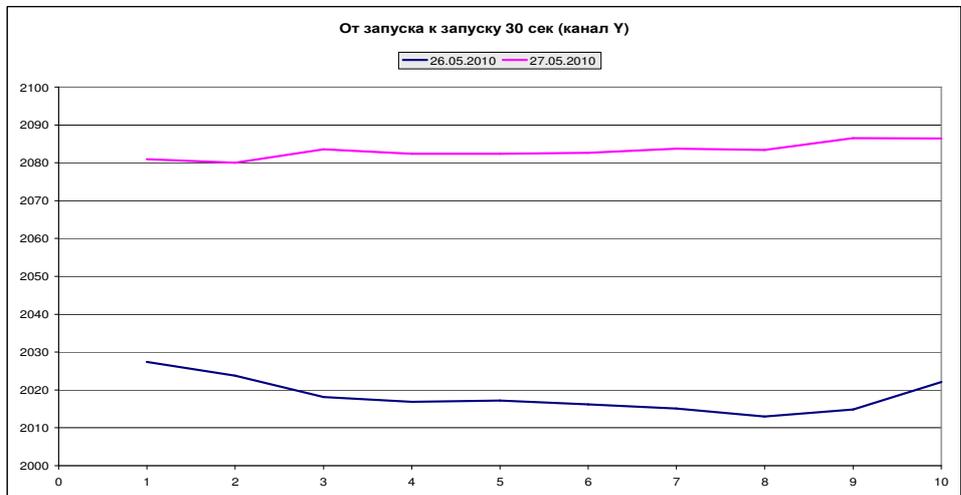
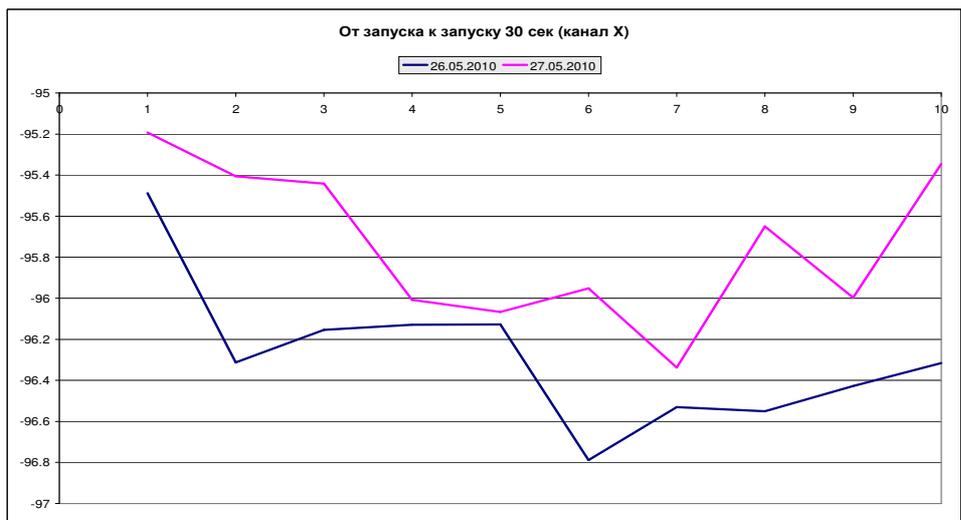


Рисунок 5 - Графики изменения показаний ДУС от запуска к запуску (интервал осреднения показаний - 30 секунд, по оси абсцисс – номер запуска).



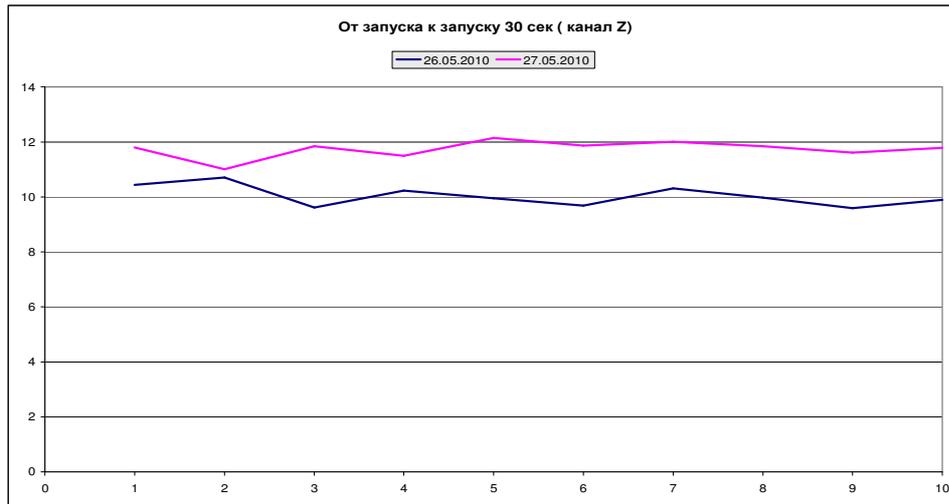


Рисунок 6 - Графики изменения показаний БА от запуска к запуску (интервал осреднения показаний - 30 секунд, по оси абсцисс – номер запуска).

Полученные результаты показывают, что изменение нулевого сигнала (СКО) горизонтальных каналов акселерометров от запуска к запуску составляет $\sim 0.0002 \text{ g}$, в вертикальном канале $\sim 0.001-0.002 \text{ g}$ (или $0.05-0.1\%$ по масштабному коэффициенту).

Изменение дрейфа ДУС от запуска к запуску (СКО) составляет $50-100 \text{ град/ч}$.

Выводы по результатам испытаний. Анализ результатов проведенных испытаний акселерометров ADXL345 и ДУС ADIS16100 в составе БИНС-ММГ позволяет сделать следующие выводы:

1. Датчики угловой скорости (ДУС):

- изменение дрейфа в процессе самопрогрева составляет $2000-3000 \text{ град/ч}$;

- изменение дрейфа от запуска к запуску составляет $150-300 \text{ град/ч}$;

- изменение дрейфа в запуске составляет 150 град/ч .

2. Акселерометры:

- изменение нулевого сигнала в процессе самопрогрева горизонтальных каналов составляет $\sim 0.001-0.006 \text{ g}$, в вертикальном канале $\sim 0.03-0.04 \text{ g}$;

- изменение нулевого сигнала от запуска к запуску горизонтальных каналов составляет не более ± 0.0006 g, в вертикальном канале не более ± 0.006 g;

- изменение нулевого сигнала в запуске составляет ± 0.001 g.

3. Повышение точности БИНС-ММГ на базе ДПИ фирмы Analog Devices в диапазоне изменения температур возможно при проведении температурной компенсации дрейфа ДУС и нулевого сигнала акселерометров.

2.2 Испытания на комплексе наземной отработки

В процессе проведения испытаний навигационной системы на комплексе наземной отработки (КНО) проведен ряд проездов, каждый из которых включал режим начальной выставки на неподвижном основании, и режим движения между контрольными точками трассы.

Задание начального угла ориентации в азимуте осуществлялось с помощью магнитного компаса, в процессе движения азимутальная ориентация корректировалась по показаниям приемника GPS (путевой угол).

Для оценки автономной точности БИНС-ММГ на соответствие требованиям ТЗ по погрешностям счисления координат имитировались отказы приемника GPS путем расстыковки разъема антенного блока на время 90 сек.

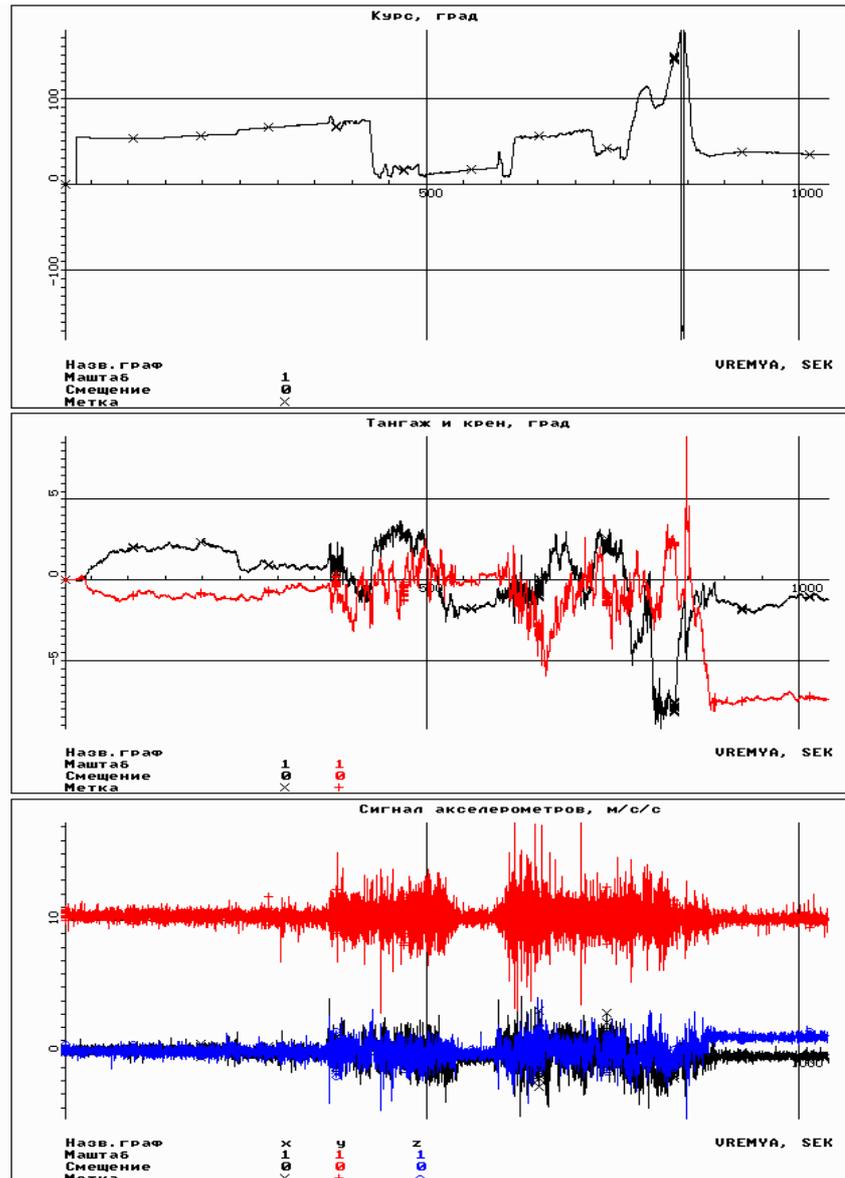
Погрешность счисления координат оценивалась по данным эталонной БИНС, также комплексированной с приемником GPS.

На рисунке 7 приведены графики навигационных параметров, измеряемых БИНС-ММГ для одного из проездов: углы ориентации, измерения акселерометров и ДУС.

Данные графики характеризуют параметры движения автомобиля. Для оценки автономной точности БИНС-ММГ каждый проезд разбивался на участки, на которых осуществлялась имитация отказа GPS.

На последующем рисунке 8 приведены проекции линейной скорости движения, ошибки по координатам, а также оценки дрейфа ДУС, в качестве примера – для проезда №4.

Участки отказа GPS характеризуются накоплением ошибок по координатам и проекциям скорости.



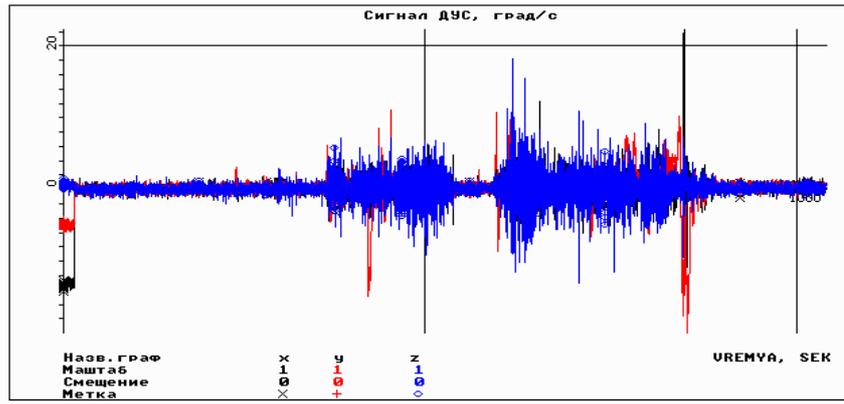
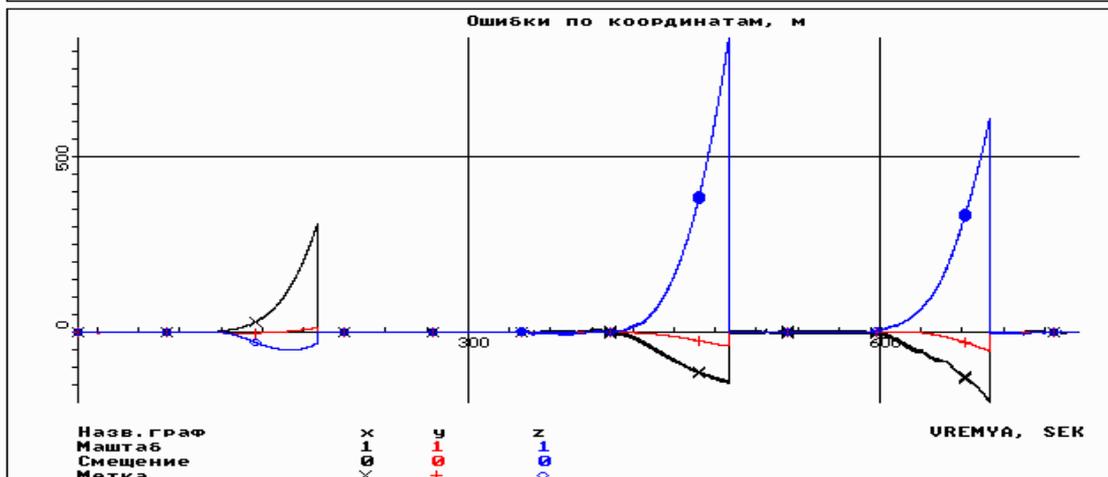
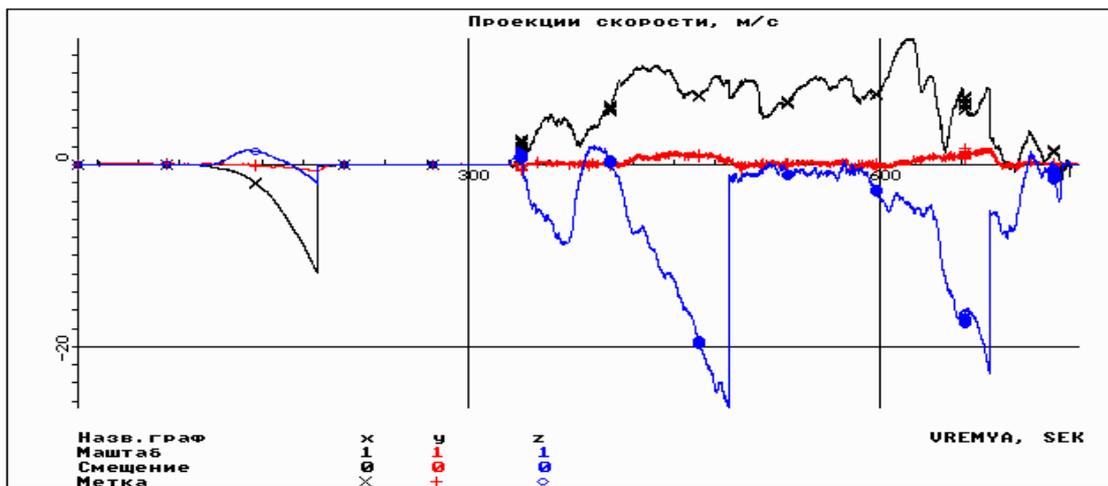


Рисунок 7 – Параметры траекторного движения БИНС-ММГ



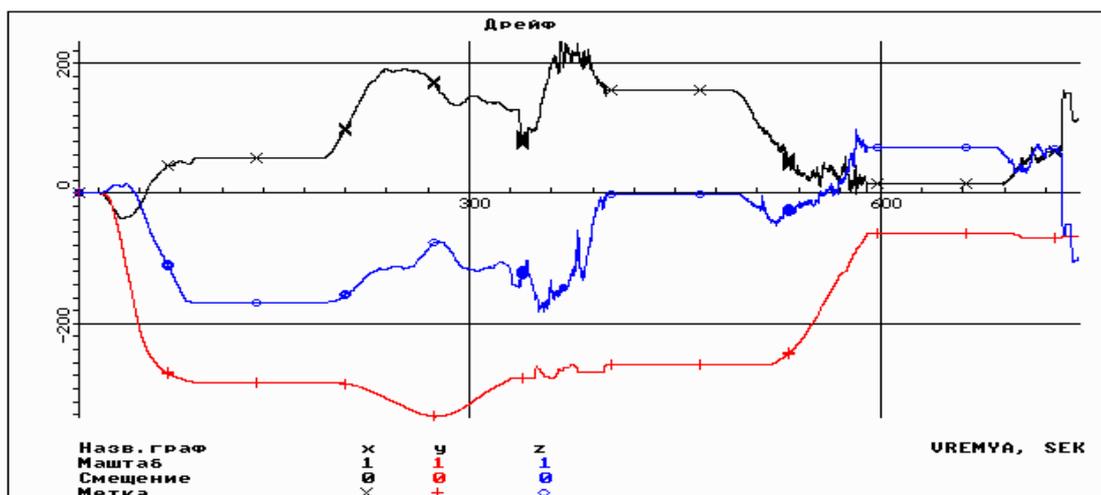


Рисунок 8 – Параметры 4-го проезда

Ошибки БИНС-ММГ по координатам за 90 секундные участки автономной работы по 4 проездам приведены в таблице 3. В данной таблице также приведены оценки эквивалентных ошибок, оцененные по характеру накопления погрешностей БИНС-ММГ по координатам.

Таблица 3. Обобщенные результаты проездов

№ проезда	№ участка	Канал	Ошибка по координате, м	Оценки факторов ошибок БИНС		
				V_0 , м/с	A_0 , g	ω_0 , град/ч
Проезд 1	1	x	602	0.185	-0.00744	153
		y	105	-0.181	0.00431	-9.06
		z	155	-0.227	0.0151	-74.1
	2	x	20	0.46	-0.00245	12.7
		y	20	0.112	-0.000262	4.45
		z	-115	0.585	-0.00255	-12
Проезд 2	1	x	250	-0.427	0.011	-25.2
		y	-21	-0.499	0.00152	-6.68
		z	203	-0.725	-0.00205	60.8
	2	x	17	0.675	-0.00525	27.7
		y	13	0.106	-0.00015	1.5
		z	-157	0.68	-0.00478	-5.8
	3	x	56	-0.379	-0.00277	34.5
		y	34	0.281	-0.0004	4.43
		z	253	-0.64	0.0104	-18.4
Проезд 3	1	x	62	1.42	-0.0234	149
		y	109	-0.074	0.00224	4.59
		z	72	0.0845	0.00581	-29.3
	2	x	-445	0.311	-0.0148	18.6

		y	-11	0.093	-0.000678	1.15	
		z	133	0.323	0.00509	-17.7	
	3	x	-713	-1.05	0.00728	-156	
		y	112	0.429	-0.00104	19.7	
		z	-404	0.494	-0.0209	66.7	
Проезд 4	1	x	307	0.515	-0.0055	82.8	
		y	14	-0.056	-0.000258	4.97	
		z	-32	0.92	-0.0113	57.5	
	2	x	-144	0.0615	-0.0103	46.3	
		y	-37	0.158	-0.00197	4.19	
		z	841	-0.0765	0.00341	124	
	3	x	-195	-0.85	-0.00186	-7	
		y	-54	0.261	-0.0012	-5.42	
		z	608	0.461	-0.000125	101	
		y	25	-0.0118	0.000616	0.345	
			z	256	0.381	0.0177	-84.8

В таблице 3 параметр V_0 - ошибка эквивалентная систематической погрешности БИНС-ММГ по скорости, A_0 – ошибка эквивалентная погрешности БИНС-ММГ по ускорению, W_0 характеризует эквивалентный дрейф ДУС.

Примечание – Выделенные ячейки таблицы показывают превышение допуска на БИНС низкой точности

Анализ результатов проездов показывает, что в большинстве случаев ошибки БИНС-ММГ не превышают требования ТЗ к БИНС низкой точности. В ряде проездов, где зафиксировано превышение допуска (500 м за 90 сек) определены факторы, вызвавшие рост погрешностей счисления координат:

- в проезде 1 – эквивалентный дрейф 153 град/ч при оцененных значениях дрейфа на уровне 300 – 600 град/ч;

- в проезде 3 – эквивалентный дрейф минус 156 град/ч при оцененных значениях дрейфа на уровне 600 – 800 град/ч;

- в проезде 4 – эквивалентный дрейф 100 - 125 град/ч при оцененных значениях дрейфа на уровне 200 град/ч;

Графики оценки дрейфа ММГ показывают на высокую нестабильность дрейфа в процессе движения, что может быть вызвано влиянием ускорений автомобиля.

Максимальное значение ошибки, пропорциональной эквивалентному нулевому сигналу акселерометра, составляет порядка 0.02 g. При этом, автономная ошибка БИНС-ММГ в вертикальном канале, которая в основном определяется нестабильностью нулевого сигнала вертикального акселерометра не превышает 120 м. Малый рост ошибок БИНС-ММГ в вертикальном канале обусловлен наличием оценки нулевого сигнала вертикального акселерометра в процессе совместной работы с БИНС с приемником GPS, кроме того вертикальный канал может быть поддержан информацией, поступающей от датчика давления.

Таким образом, по результатам испытаний можно сделать следующие выводы:

1. Требуемые значения погрешностей для систем низкой точности могут быть обеспечены БИНС-ММГ в принятом аппаратном облике и наборе ДПИ.

2. Дальнейшее уменьшение ошибок БИНС-ММГ в горизонтальных каналах может быть достигнуто применением следующих мероприятий:

- уточнение математических моделей дрейфов ДУС в части зависимости от температурных воздействий и линейных ускорений, с целью включения данных параметров в состав вектора состояния системы комплексной обработки информации;

- введение в состав вектора состояния системы параметров смещения нулевых сигналов горизонтальных акселерометров.

Заключение

В процессе выполнения работы проведены исследования характеристик малогабаритной комплексной навигационной системы, построенной на базе микромеханических датчиков, и осуществлена оценка возможности повышения

точностных характеристик системы за счет компенсации инструментальных погрешностей.

Основные задачи, решенные в данной статье:

- исследование характеристик микромеханических ДПИ и системы в целом;
- оценка возможности повышение точности микромеханической инерциальной системы в автономном режиме работы (при отсутствии корректирующей информации), за счет компенсации ошибок в процессе калибровки системы;
- проведены испытания БИНС-ММГ, включающие: лабораторные испытания, в том числе на температурных воздействиях; испытания на комплексе наземной отработки в составе движущегося транспортного средства.

Библиографический список

1. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В.Матвеев, В.Я.Распопов / *Под общ. ред. В.Я.Распопова.* – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. - 280с.
2. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы. – М.: Машиностроение, 2007 – 400 с.
3. *Бранец В.Н., Шмыглевский И.П.* Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – М.: Наука, 1992. – 280с.
4. *Степанов О.А.* Особенности построения и перспективы развития навигационных инерциально-спутниковых систем. /Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. Сб. статей докл. СПб. 2001.
5. Гироскопические системы. Гироскопические приборы и системы: Учеб. Для вузов /*Д.С.Пельпор, И.А.Михалёв, В.А.Бауман и др./ Под ред. Д.С.Пельпора.* 2-е изд., перераб. И доп. – М.:Высш. Шк., 1988.-424 с.

6. *Яценков В.С.* Основы спутниковой навигации. Система GPS NAVSTAR и ГЛОНАСС. – М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 272 с.
7. *Андреев В.Д.* Теория инерциальной навигации. Кн.І. Автономные системы. Кн.ІІ. Корректируемые системы. – М.: Наука, 1966, 1967.
8. *Ишлинский А.Ю.* Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. – М.: Наука, 1976. – 672 с.