

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Приладобудівний факультет
Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Анатолій ПРОТАСОВ
«__» _____ 2021 р.

Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані системи та
технології неруйнівного контролю і діагностики»
спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
на тему: «Засіб для позиціонування рухомих об'єктів в просторі»

Виконав:

Студент IV курсу, групи ПК-71

Бердичевський Дмитро Володимирович _____

Керівник:

Старший викладач, кандидат технічних наук,

Богдан Галина Анатоліївна _____

Консультант з роботи електричної системи:

Доцент, кандидат технічних наук,

Баженов Віктор Григорович _____

Рецензент:

Доцент, кандидат технічних наук,

Філіппова Марина В'ячеславівна _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент (-ка) _____

Київ – 2021 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ПК71.010000.000 ПЗ	Пояснювальна записка	74	
3	A1	ПК71.010000.000 ЕЗ	Функціональна схема	1	
4	A1	ПК71.010000.002	Алгоритм роботи	1	
5	A1	ПК71.010000.000 Е4	Електрична схема з'єднання системи позиціонування	1	

				ДП 71.010000.000		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Бердичевський			Відомість дипломної роботи	Лист	Листів
Керівн.	Богдан Г. А.				1	1
Консуль т.					КП ім. Ігоря Сікорського Каф. ПСНК Гр. ПК-71	
Н/контр.	Лашко О.В.					
Зав.каф.	Протасов А.Г.					

**Пояснювальна записка
до дипломної роботи
на тему: «Засіб для позиціонування рухомих об'єктів в
просторі»**

Київ – 2021 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Приладобудівний факультет

Кафедра приладів та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології неруйнівного контролю і діагностики»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій ПРОТАСОВ

«__» _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Бердичевському Дмитру Володимировичу

1. Тема роботи «Засіб для позиціонування рухомих об'єктів в просторі», керівник роботи Богдан Галина Анатоліївна, старший викладач, кандидат наук, затверджені наказом по університету від «25» травня 2020 р. №1180-с

2. Термін подання студентом роботи 11.06.2021

3. Вихідні дані до роботи: Про моделювати пристрій для знаходження координат дефекту.

4. Зміст роботи:

Вступ

1. Технології локального позиціонування

2. Методи локального позиціонування

3. MEMS датчики

4. Схема приладу та прилад реалізації

Висновок

Список використаних джерел

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням обов'язкових плакатів, презентацій тощо):

Три плакати:

1. Функціональна схема;
2. Алгоритм роботи;
3. Електрична схема з'єднання системи позиціонування.

6. Консультанти розділів роботи*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розробка електричної схеми	Баженов В. Г.		

7. Дата видачі завдання 11.03.2021

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Формулювання завдання	12.03.2021	
2	Проведення аналітичного огляду	18.04.2021	
3	Підбір компонентів	15.05.2021	
4	Оформлення пояснювальної записки	25.05.2021	
5	Розробка плакатів	31.05.2021	

Студент

Дмитро БЕРДИЧЕВСЬКИЙ

Керівник

Галина БОГДАН

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проєкту.

Анотація

В даній дипломній роботі було промодельовано засіб для знаходження координат об'єкта в просторі щоб полегшити та зменшити час знаходження дефекту на ділянці.

У першому розділі дипломної роботи представлено теоретичні відомості про технології локального позиціонування. А також, наведено переваги та недоліки даних технологій, а також обґрунтовано вибір певної технології до даної дипломної роботи.

У другому розділі приведено методи локального позиціонування та висновок щодо застосування даних методів.

В третьому розділі описано MEMS датчики та короткі відомості про них, математичну частину даних датчиків, знаходження кутів Ейлера, характеристики, а також вибір датчиків до даної дипломної роботи.

В четвертому розділі приведено функціональну та принципову електричну схему, опис цієї схеми, а також алгоритм знаходження координат нашого дефекту.

Данна дипломна робота складається із пояснювальної записки обсягом 74 сторінок, включає 24 ілюстрації, 3 кресленика та 30 літературних джерел.

Ключові слова: MEMS датчики, гіроскоп, акселерометр, GSM.

Annotation

In this thesis, a tool for finding the coordinates of the object in space was modeled to facilitate and reduce the time of finding the defect on the site.

The first section of the thesis presents theoretical information about local positioning technologies. Also, the advantages and disadvantages of these technologies are given, as well as the choice of a certain technology for this thesis is substantiated.

The second section presents the methods of local positioning and the conclusion on the application of these methods.

The third section describes MEMS sensors and brief information about them, the mathematical part of the sensor data, finding the Euler angles, characteristics, as well as the choice of sensors for this thesis.

In the fourth section the functional and basic electric scheme, the description of this scheme, and also algorithm of finding of coordinates of our defect is resulted.

This thesis consists of an explanatory note of 74 pages, includes 24 illustrations, 3 drawings and 30 references.

Key words: MEMS sensors, gyroscope, accelerometer, GSM.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	10
1. ТЕХНОЛОГІЇ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ.....	12
1.1 Позиціонування в стільникових мережах	12
1.2 Технологія UWB позиціонування	13
1.3 Технологія Wi-Fi	15
1.4 Технологія WiMax.....	16
1.5 Технологія ZigBee і Thread	17
1.6 Технологія MiWi	18
1.7 Технологія NFER.....	19
1.8 Технологія NanoLOC	20
1.9 Технологія DECT	20
1.10 Технологія Bluetooth.....	21
1.11 Системи позиціонування з використанням активних RFID-міток	22
1.12 Технологія інерційного позиціонування	23
1.13 Технології позиціонування, засновані на зміні магнітного поля.....	23
1.14 Ультразвукові технології позиціонування	24
1.15 GPS технології.....	25
1.16 GPRS технологія	26
1.17 GSM технології.....	27
1.18 RTLS технології	28
2. МЕТОДИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ	30
2.1 Метод, заснований на використанні триангуляції.....	30
2.2 Методи, засновані на використанні трилатерації.....	31
2.3 Метод ToA	32
2.4 Метод TDoA	33
2.5 Метод ToF	34
2.6 Метод TWR.....	35

					ПК71.010000.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Бердичевський			Засіб для позиціонування рухомих об'єктів в просторі		Літ.	Арк.
Перевір.		Богдан. Г.А.						8
Н. Контр.							ПБФ, ПК-71	
Затверд.		Богдан Г. А.						

2.7 Метод SDS-TWR	35
2.8 Метод NFER	37
2.9 Метод, заснований на вимірюванні сили сигналу	37
3. MEMS ДАТЧИКИ	39
3.1 MEMS гіроскоп	52
3.2 MEMC акселерометр	55
3.3 Вибір датчиків	58
4. СХЕМА ПРИЛАДУ ТА ПРИЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ.....	62
ВИСНОВОК	70
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	71

ВСТУП

З кожним роком науково-технічний прогрес не стоїть на місці, і весь час людина знаходить як полегшити собі роботу, або ж скоротити час знаходження дефекту на певній ділянці.

Трубопроводи проектуються, будуються і випробовуються в відповідно до жорстких стандартів, будівельних норм і правил. Для забезпечення безпеки і надійності поставок транспортується продукту надзвичайно важливо зберегти в процесі експлуатації необхідні характеристики і показники.

Корозійно-активний ґрунт, низька якість ізоляції труб і порушення в режимах робіт електрохімічного захисту(ЕХЗ) призводять до розвитку корозійних процесів, наслідком яких є значне стоншення стінок труб в окремих місцях. Застосування сучасних засобів діагностики на діючих газопроводах дозволяє виявляти такі місця "втрат металу". Ухвалення рішення про можливість подальшої експлуатації або про необхідність виведення пошкоджених ділянок в ремонт має спиратися на нормативні документи, що регламентують ступінь небезпеки дефектів в залежності від їх геометричних параметрів і режиму роботи газопроводу на конкретній ділянці.

Для забезпечення безпеки і надійності трубопровідних існує необхідність проведення спеціальних технічних програм по діагностиці, ремонту і реконструкції об'єктів транспортного газу.

Для відновлення техніко-економічних показників, підвищення надійності і безвідмовності роботи магістральних газопроводів проводяться комплекси заходів по ремонту та модернізації складових елементів МР.

Актуальністю даної роботи є виключення виникнення аварійних ситуацій на магістральному газопроводі, що дозволить забезпечити нормальне і безперебійне функціонування об'єктів. Тому даної розробка допомогою допоможе визначити:

- порушення однорідності структури;
- однорідність матеріалу;

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

- місця ураження корозією;
- невідповідність початкового хімічним складом;
- відхилення в розмірі та інші дефекти.

Отже, в даній роботі представлена розробка, яка дозволить за допомогою технології GSM передавати координати знайденого дефекту і тим самим прискорить та полегшить знаходження нашого місця розташування дефекту. В даному проекті, об'єкт контролю – труба, а метод контролю – ультразвук.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

1. ТЕХНОЛОГІЇ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

Технологій локального позиціонування поділяються на:

- оптичні технології;
- ультразвукові технології;
- технології інерціального позиціонування;
- радіолокаційні технології;
- технології, засновані на зміні магнітного поля.

Найбільшою групою є радіолокаційна яка включає в себе кілька підгруп. Дана технологія, діляться на стандартні технології передачі даних (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee), які вимірюють відстань, і на ті, які, виходячи з фізичних властивостей модуляції, найбільш підходять для вимірювання відстаней (UWB, NFER та ін.) [1-8].

1.1 Позиціонування в стільникових мережах

Історично однією з перших технологій позиціонування стало позиціонування в стільникових мережах. Це пояснюється як широким розповсюдженням (мільярди абонентів у всьому світі), так і відносною простотою спочатку застосовувався методу Cell Of Origin - за координатами стільники, до якої підключений абонент. На базових станціях мережі встановлюється відповідне обладнання, і абоненту не треба купувати новий телефон. Однак точність позиціонування при такому методі визначається радіусом дії стільники. І якщо для так званих «пікосоти» вона становить 100-150 метрів, то в більшості випадків це кілометр і більше.

Більш точні методи визначення координат ґрунтуються на вимірі даних, отриманих від декількох найближчих до телефону базових станцій.

Гібридний метод мобільного позиціонування на увазі використання мобільного телефону, доповненого GPS. Технологія спирається на чинну

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

систему GPS, що істотно ускладнює всю систему. Система забезпечує точність 15-50 м, але в міських умовах її застосування утруднено через багатопроменеве поширення сигналу

На практиці використовуються і інші, фірмові технології:

- Finder (CellPoint) – точність 75 м;
- RadioCamera TM – точність 50 м;
- SnapTrack TM (Wireless Assistant GPS) – точність до 15 м;
- Mobile Positioning System (Ericsson) – точність 100 м;
- Cursor TM (CPS) – точність 50 м.

Недоліки:

- низька точність позиціонування;
- ліцензований діапазон частот.

Переваги:

- можливість використання існуючої інфраструктури стільникових операторів.

Методи визначення позиції: AoA, ToA, EoTD, OTDoA.

1.2 Технологія UWB позиціонування

Технологія UWB (Ultra Wideband – надширокосмугова) це радіочастотна технологія, яка використовує короткі імпульси з максимально можливою пропускну здатністю при мінімально можливої центральній частоті. Технологія використовується в пристроях зв'язку, радіолокації, при визначенні відстаней і позиціонуванні.

На відміну від широкосмугових радіо технологій, що мають ширину смуги від декількох сотень кілогерц до десятків мегагерц, надширокосмугові UWB сигнали поширюються на частоті декількох гігагерц, досягаючи відносної ширини смуги 25-100%. Тобто, їх ширина смуги досягає декількох гігагерц.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		13

У UWB системах це забезпечується шляхом передачі імпульсоподібного сигналу. Такі сигнали є за своєю природою широкосмуговими. Дійсно, аналіз Фур'є вчить нас, що ідеальний імпульс (тобто, хвиля заданої амплітуди і нескінченно малої тривалості) забезпечує нескінченну смугу пропускання. В результаті передача зовсім не схожа на традиційні радіочастотні модульовані синусоїдальні хвилі. Замість цього вони нагадують серію імпульсів. Приклад індивідуального UWB імпульсу показаний на малюнку.

Існують різні варіанти UWB технології. Різняться форма імпульсів - більшість використовують форму, як на малюнку, але існують і інші підходи. Деякі компанії передають рідкісні сигнали, використовуючи щодо потужні імпульси - інші посилають сотні мільйонів малопотужних імпульсів в секунду. Одні системи застосовують когерентну (послідовну) обробку сигналу, більшість використовують не когерентну. Відповідно розрізняються і характеристики UWB систем різних виробників.

Наприклад, один з варіантів UWB технології, орієнтований на системи передачі даних і позиціонування, використовує низько завантажену циклічну передачу з когерентної обробкою сигналу і типовою частотою повторення 10 МГц. Цикл передачі зазвичай складається з пакета від декількох тисяч до декількох сотень тисяч послідовно переданих імпульсів. Оскільки передача послідовна, енергія сигналу може розподілятися на кілька імпульсів, тим самим збільшуючи енергію на біт і, отже, відношення сигнал / шум (SNR). Незалежні комунікаційні канали встановлюються псевдовипадковим кодуванням фази, позиції і / або частоти повторення послідовності імпульсів. Дані можуть додаватися до передачі шляхом подальшої модуляції фази або позиції імпульсів. Псевдовипадковий код і дані зазвичай застосовуються не до окремих імпульсів, а до блокам з багатьох імпульсів. Когерентна обробка збільшує робочий діапазон і ставлення сигнал / шум.

Недоліки:

– складна інфраструктура;

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		14

– малий радіус дії (до 10 м).

Переваги:

– висока безпека;

– чим вище частота, тим більша точність (але тим менше радіус дії);

– високий рівень перешкодозахищеності.

Методи визначення позиції: AoA, ToF, ToA, TDoA.

1.3 Технологія Wi-Fi

Одна з причин досить швидкого поширення систем позиціонування, заснованих на використанні технологій Wi-Fi, як і в випадку з стільниковими мережами, - їх широке поширення. Поставки приладів, оснащених Wi-Fi, досягли в 2011 році 1,2 млрд. Штук, в тому числі 513 млн. Смартфонів і 230 млн. Комп'ютерів. У 2015 році буде продано 2 млрд. Приладів, оснащених Wi-Fi.

Найбільш простим способом позиціонування в мережах Wi-Fi, як і в стільникових мережах, - за фактом підключення до конкретної базової станції. Такі системи використовуються зазвичай для надання конкретного виду послуг, в залежності від типу і місцезнаходження приладу. Радіус дії точок доступу Wi-Fi становить від 30 до 200 метрів, в залежності від конкретного виконання. Відповідно, така ж і точність позиціонування.

Для підвищення точності позиціонування застосовується вимір параметрів радіосигналу - потужності, часу поширення сигналу (часу, необхідного радіосигналу, щоб подолати відстань від джерела до приймача) або напрямку (кута) джерела щодо приймача.

Для позиціонування використовується сервер. Сервер взаємодіє з приладом і мережею, а потім розраховує місцезнаходження приладу або передає необхідну для розрахунку інформацію централізованого сервісу (наприклад, Google).

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		15

Проте, точність позиціонування навіть в системах із застосуванням спеціальних розширень WiFi, відносно невисока і складає в ідеальних умовах 3-5 метрів, в реальності 10-15 метрів. Для більшості додатків такої точності недостатньо.

Недоліки:

- недостатня точність визначення місця розташування для ряду завдань, навіть при застосуванні спеціальних розширень Wi-Fi (в ідеальних умовах 3-5 метрів, в реальності 10-15 метрів);
- завантаженість ефіру Wi-Fi;
- для підвищення точності, потрібне збільшення щільності розташування базових станцій[4].

Переваги:

- низька вартість обладнання;
- широке розповсюдження.

Методи визначення позиції: RSSI, на основі TDoA.

1.4 Технологія WiMax

WiMax технологія дозволяє забезпечити доступ в інтернет зі швидкостями і зоною покриття, істотно більшими, ніж у сучасних мереж WiFi. Wi-Fi - це технологія бездротового зв'язку для невеликих відстаней: в офісній будівлі, кафе тощо Відстань від хот-спота Wi-Fi до комп'ютера не перевищує десятків метрів. Технологія WiMax - це мережа широкосмугового бездротового доступу, яка створюється на території цілого міста, а відстань від приймача до базової станції вимірюється кілометрами. У свою чергу, локальні мережі Wi-Fi стають логічним продовженням мереж WiMAX[12].

Недоліки:

- низька точність позиціонування;
- дороге обладнання та обслуговування.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

Переваги:

- надійність;
- висока пропускна здатність;
- зона покриття (кілька кілометрів).

Методи визначення позиції: RSSI, OTDoA.

1.5 Технологія ZigBee і Thread

В основі мережі ZigBee лежить Mesh-мережі (mesh-топологія). У такій мережі, кожен пристрій може зв'язуватися з будь-яким іншим пристроєм як безпосередньо, так і через проміжні вузли мережі. Mesh-мережі пропонує альтернативні варіанти вибору маршруту між вузлами. Повідомлення надходять від вузла до вузла, поки не досягнуть кінцевого одержувача. Можливі різні шляхи проходження повідомлень, що підвищує доступність мережі в разі виходу з ладу того чи іншого ланки.

У мережі ZigBee існує 4 типи вузлів: координатор, роутер, сплячий пристрій і мобільний пристрій.

Головне пристрій в ZigBee-мережі - це координатор. Координатор виконує функції по формуванню мережі, а також є одночасно довірчим центром (trust-центром). Довірчий центр встановлює політику безпеки і задає налаштування під час підключення пристрою до мережі.

Недоліки:

- низька швидкість передачі даних.

Переваги:

- простота розгортання, обслуговування та модернізації;
- підтримує як прості топології мережі («точка-точка», «дерево» і «зірка»), так і mesh-топологію з ретрансляцією і маршрутизацією повідомлень;
- низький рівень споживання енергії;
- здатність до самоорганізації та самовідтворення;

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		17

– містить можливість вибору алгоритму маршрутизації, в залежності від вимог програми та стану мережі.

Методи визначення позиції: RSSI, TDoA, ToF.

1.6 Технологія MiWi

MiWi є простим протоколом бездротових мереж, орієнтованим на низькі швидкості передачі даних, невеликі відстані і низьку вартість реалізації вузла. MiWi заснований для бездротових персональних мереж (WPAN). MiFi технологія орієнтована на мережі невеликого розміру з обмеженою кількістю маршрутизаторів. MiFi є трішки спрощеним аналогом ZigBee.

Недоліки:

- дороге обслуговування;
- низька швидкість передачі даних призводить до обмежень за розміром мережевого сегмента;
- необхідність установки додаткового програмного забезпечення;
- пропрієтарна технологія.

Переваги:

- підтримує шифрування повідомлень;
- є дешевою альтернативою стеку протоколів ZigBee;
- підтримує mesh-мережі, «вузол-вузол» (peer-to-peer) з'єднання та інші топології;
- надається компанією без ліцензії (за умови застосування трансивера MRF24J40 і мікроконтролерів Microchip);
- є ідеальним рішенням для дешевих мережевих пристроїв з обмеженим обсягом пам'яті.

Методи визначення позиції: RSSI.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		18

1.7 Технологія NFER

Технологія вимірювання відстані в ближньому електромагнітному полі (Near-field electromagnetic ranging - NFER) використовує мітки-передавачі і один або кілька приймачів. У системах NFER приймач для визначення відстані вимірює різницю фаз між електричної та магнітної складовими випромінюваного міткою електромагнітного поля [9, 10]. Оскільки ця різниця змінюється від 90° близько випромінюючої антени до нуля на відстані напівхвилі, саме довжина напівхвилі визначає радіус дії системи. При частоті 1 МГц довжина хвилі становить 300 м, а радіус дії -150 м, при частоті 10 МГц - 30 і 15 м відповідно.

Точність позиціонування в реальних умовах становить близько метра на відстані до 30 метрів.

Недолік NFER системи пов'язаний з низькою ефективністю антени. Для ефективної роботи антена повинна бути порівнянна з довжиною хвилі. Насправді вона в сотні разів менше, що вимагає збільшення потужності передавача, а відповідно габаритів і ваги міток.

Недоліки:

- неузгодженість антени вимагає збільшення потужності передавача і веде до відносно великих габаритів і вазі міток;
- відносно низька ефективність антени. Найбільш ефективна антена, співмірна з довжиною хвилі – це чверть хвильовий монополь. У разі NFER розміри такої антени мали б становити десятки метрів, що є неприйнятним.

Переваги:

- позиціонування з точністю 0,5-1 метр (в теорії) на відстані 20-30 метрів;
- підходить для застосування в приміщеннях зі складною геометрією.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		19

1.8 Технологія NanoLOC

Технологія NanoLOC дозволяє одночасно з передачею даних визначати відстань між передавальними вузлами. Принцип розрахунку дистанції заснований на вимірюванні часу затримки поширення радіосигналу від одного модуля до іншого і назад. Дана технологія дозволяє вимірювати відстані, в тому числі і в закритих приміщеннях, де сигнали від супутників систем GPS і ГЛОНАСС недоступні.

Недоліки:

- пропрієтарна технологія;
- обмеження за кількістю пристроїв в сегменті.

Переваги:

- автокореляційні властивості сигналу роблять технологію стійкою до зовнішніх перешкод;
- методи, що використовуються для визначення місця розташування забезпечують можливість локалізації об'єктів за межами периметра зони обслуговування зі зниженням точності;
- великий вибір готового ПО (з відкритими кодами);
- можливість роботи в неліцензованих діапазонах частот при потужності до 100 мВт.

Методи визначення позиції: RSSI, TDoA, ToF, TWR.

1.9 Технологія DECT

DECT - це стандарт цифрового радіодоступу, дуже ефективно використовує смугу радіочастот і відкриває все нові додатки безшнурові зв'язку для будинку, офісу і приватних локальних комерційних зон (аеропортів, вокзалів, торговельних центрів, банків, бірж і ін.). Він забезпечує

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

своїм користувачам стійку високоякісний зв'язок, захищену від несанкціонованого доступу.

Недоліки:

- потрібне спеціалізоване обладнання;
- невисока швидкість передачі даних;
- відносно невелика дальність зв'язку (через обмеження потужності самим стандартом).

Переваги:

- не потребує ліцензування;
- простота розгортання DECT-мереж;
- гарна інтеграція з системами стаціонарної корпоративної телефонії;
- не потребує спеціалізованого обслуговування.

Методи визначення позиції: RSSI [12].

1.10 Технологія Bluetooth

Bluetooth являє собою технологію бездротового зв'язку пристроїв на невеликій відстані один від одного, типове значення - до 10 м. Однак цей діапазон може бути і довшим, в залежності від класу потужності радіоприймача. Назване 10-метрове значення характерно для 2-го класу, який використовується більшістю пристроїв. А деякі з них, наприклад, мобільні телефони, для яких низьке споживання енергії є критичним, окрім 2-класу радіоприймача не можуть використовувати інший.

Недоліки:

- неможливість досягнення високої точності визначення місця розташування.

Переваги:

- компактність модулів;
- недороге обладнання;

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

- низький рівень споживання енергії (BLE);
- підвищена безпека і перешкодозахищеність.

Методи визначення позиції: RSSI.

1.11 Системи позиціонування з використанням активних RFID-міток

Областю застосування пасивних RFID є системи автоматизації процесів, де традиційно використовувалися штрих-коди і магнітні картки - розпізнавання товарів і вантажів, впізнання людей і т.п.

Активні RFID використовують на предметах (палетах, вагонах, контейнерах), які необхідно відстежувати з відносно великих відстаней (наприклад, на сортувальній майданчику). Зазвичай активні RFID працюють на частоті 455 МГц, 2,4 ГГц або 5,8 ГГц, а радіус зчитування становить від 20 до 100 метрів.

У загальних рисах, існують два типи активних міток: транспондери і радіомаяки. Транспондери включаються, коли отримують сигнал від зчитувача. Вони застосовуються в автоматизованих системах оплати проїзду, на контрольно-пропускних пунктах, в'їзних порталах сортувальних дворів і в інших подібних системах.

Ціна активних міток (RFID) становить від 10 до 50 доларів, залежно від вживаної технології позиціонування, обсягу пам'яті, часу дії батареї, міцності матеріалу, а також від того, чи має мітка будь-які датчики.

Термін «активні RFID» - вельми узагальнений, і охоплює широкий спектр найрізноманітніших виробів. Практично будь-яка радіочастотна система позиціонування використовує активні RFID для ідентифікації об'єктів, що підлягають позиціонуванню. Тому область застосування і характеристики активних RFID визначаються в кожному конкретному випадку застосовуваної технологією позиціонування і конструкцією RFID (мітки)[11].

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

1.12 Технологія інерційного позиціонування

Суть даної технології полягає у використанні додаткового обладнання, встановленого на мобільному об'єкті (наприклад, акселерометри, акселерометри і т. Д.). Завдяки цьому обладнанню з'являється можливість визначення швидкості і зміни напрямку руху. Таким чином, знаючи початкове положення і знаючи характеристики руху, можна визначити положення об'єкта в будь-який момент часу. Основною перевагою такої технології є автономність, інакше кажучи, обладнання самого об'єкта досить, і немає необхідності в додаткових пристроях, таких, як при використанні радіолокаційних технологій. При цьому виникає ряд недоліків, пов'язаних з неправильним визначенням характеру руху, наприклад, прослизання коліс і т. Д. Тому дана технологія є далеко не основною, а уточнюючою.

Недоліки:

- високе енергоспоживання;
- є уточнюючою технологією, тому що вимагає періодичного узгодження місця розташування за допомогою реперних точок;
- помилкові спрацьовування (через неправильне визначення характеру руху).

Переваги:

- автономність.

1.13 Технології позиціонування, засновані на зміні магнітного поля

Дана група технологій заснована на знанні розташування магнітних полів і їх інтенсивності в регіоні моніторингу. Таким чином, вимірявши інтенсивність магнітного поля, можна визначити віддаленість об'єкту від джерела поля. Ключовим недоліком даної групи технологій є необхідність в

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		23

досить точної і актуальної мапі магнітних полів регіону моніторингу. Також в регіонах з мало що змінюється полем похибка зростає, інакше кажучи, точність залежить від кількості і інтенсивності змін, магнітних полів. Подібна технологія набула найбільшого поширення в сфері буріння.

Недоліки:

- низький рівень точності локації (залежить від кількості і інтенсивності локальних змін магнітного поля);
- необхідність підтримки змісту карт змін магнітного поля в актуальному стані.

Переваги:

- не потрібна розстановка анкерних точок.

1.14 Ультразвукові технології позиціонування

Суть такого позиціонування полягає в тому, що джерело передає ультразвукової сигнал, який отримує приймач. На основі проходження сигналу можна визначити віддаленість датчиків. При використанні одного приймача, дана технологія має певну похибку, але точність вимірювань можна підвищити, збільшивши кількість приймачів. Таким чином, дану технологію можна вважати високоточною. Недоліками технології є можливі перешкоди на шляху поширення ультразвукової хвилі, наприклад, дзеркало, що створює відображення сигналу, або ж матеріали оточуючих конструкцій, які можуть придушити сигнал. Також можливі перешкоди, пов'язані з перебуванням в регіоні позиціонування інших пристроїв, здатних створювати ультразвукові хвилі. Варто враховувати і малий радіус поширення звуку. Дані недоліки призводять до постійної калібрування і більш ретельному плануванню роботи системи позиціонування.

Недоліки:

- помилкові сигнали через відбиття;

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		24

- ослаблення сигналу через перешкоди;
- малий радіус;
- перешкоди від високочастотних джерел звуку.

Переваги:

- висока точність позиціонування.

1.15 GPS технології

Глобальна система позиціонування - Global Positioning System - з'явилася в 50-ті завдяки запуску супутника.

Супутники обертаються по шести орбітах, утворюючи взаємопов'язану мережу. Нею керують спеціальні станції GPS, які розташовані в тропіках, але пов'язані з координатним центром у Сполучених Штатах. Завдяки цій мережі ви можете дізнатися точні координати людини, машини або літака зі швидкістю проходження сигналу від супутників, тобто практично миттєво, а точність показань не залежить від погодних умов і часу доби. При цьому саме по собі використання Global Positioning System - безкоштовне, і єдине, що потрібно, щоб користуватися цією навігаційною системою, - навігатор або інший пристрій, що підтримує функцію GPS.

Принцип роботи GPS

В основі технології - простий навігаційний принцип маркерних об'єктів, який використовувався задовго до появи GPS. Маркерний об'єкт - це орієнтир, координати якого точно відомі. Для визначення координат об'єкту потрібно знати також відстань від нього до маркерного об'єкту, тоді можна провести на карті лінії в сторону маркерів від можливого місця розташування: точка перетину цих ліній і буде координатами.

Супутники на навколоземній орбіті грають в GPS роль маркерних об'єктів. Вони швидко обертаються, але їх місце розташування постійно відстежується, а в кожному навігаторі є приймач, налаштований на потрібну

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		25

частоту. Супутники посилають сигнали, в яких закодований великий обсяг інформації, включаючи точний час. Дані точного часу - одні з найважливіших для визначення географічних координат: орієнтуючись на різницю між віддачею і прийомом радіосигналу, супутники обчислюють відстань між собою і навігатором[3].

1.16 GPRS технологія

GPRS - General Packet Radio Service (пакетна радіозв'язок загального користування). Завдяки GPRS користувачі стільникового зв'язку можуть обмінюватися даними з іншими пристроями в мережі GSM, з зовнішніми мережами, в тому числі Інтернет. Служба, по якій здійснюється передача даних GPRS, надбудовується над GSM мережею. На структурному рівні систему GPRS поділяють на дві частини: підсистему базових станцій і опорну мережу GPRS. До підсистемі базових станцій відносяться всі ті основні станції та контролери, завдяки яким підтримується пакетна передача даних. SGSN (Serving GPRS Support Node) - це один з головних складових частин опорної мережі, який обробляє пакетну інформацію і конвертує кадри даних GSM у формати, які використовуються протоколами TCP / IP.

Принцип роботи GPRS

Коли застосовують GPRS, інформація збирається в пакети і передається через невикористовувані в даний момент голосові канали, такий вид технології припускає більш раціональне використання ресурсів мережі GSM. А пріоритет передачі інформації (голосовий трафік або передача даних) вибирається на розсуд оператора зв'язку.

Є багато класів GPRS, які відрізняються швидкістю передачі даних і можливістю поєднання передачі даних з одночасним голосовим викликом. Передача даних ділиться за напрямками «вниз» (downlink, DL) - від мережі до абонента, і «вгору» (uplink, UL) - від абонента до мережі. Залежно від

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		26

можливості одночасно використовувати таймслоти для обміну інформацією, мобільні термінали поділяються на класи.

GPRS - служба передачі даних, яка обробляє пакетну інформацію даних GSM в голосові канали. Голосовий трафік вибирає оператор зв'язку і передає дані абоненту.

GPRS працює так само, як і Інтернет: дані місцезнаходження відправляються одержувачу на gprs-приймач. Пристрою присвоюється унікальний адресу, таким чином gprs трекер перетворюється в сервер. Можна в онлайн режимі спостерігати за пересуванням об'єкта, а встановивши додаткові датчики, контролювати витрату палива авто, блокувати мотор в разі спроби викрадення.

1.17 GSM технології

GSM - це стандарт мобільних мереж другого покоління 2G.

Хоча стандарт заснований на системі множинного доступу з тимчасовим поділом (TDMA), його технологія використовує цифрові сигнальні і мовні канали і вважається другою системою (2G) для мобільних телефонів. Кінцеві користувачі GSM першими скористалися недорогий реалізацією SMS (система коротких повідомлень), яка більш відома як текстове повідомлення. Будучи мережею, стандарт стільникового зв'язку використовує осередки для забезпечення бездротового зв'язку абонентам, що знаходяться в безпосередній близькості від цих осередків. Чотири основні осередки, які становлять мережу GSM, називаються макросами, мікро, піко і фемто. Зовнішнє покриття зазвичай забезпечується макро і мікро осередками, в той час як критий охоплення зазвичай забезпечується клітинами pico і femto. Телефони GSM можуть бути ідентифіковані наявністю модуля ідентифікації абонента (SIM). Цей крихітний об'єкт, розміром приблизно з палець, являє собою знімну смарт-карту, яка містить інформацію про підписку користувача, а також деякі записи контактів. Ця SIM-карта дозволяє користувачеві перемикатися з одного

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

GSM-телефону на інший. У деяких країнах, особливо в Азії, телефони GSM заблоковані для конкретного оператора. Однак, якщо користувачеві вдасться розблокувати телефон, він може вставити будь-яку SIM-карту з будь-якого носія в той же телефон.

Одним з основних переваг стандарту GSM є можливість переміщатися і перемикатися між операторами за допомогою окремих мобільних пристроїв (якщо партнерські мережі розташовані в пункті призначення)[19].

1.18 RTLS технології

RTLS (Real time location system) - система визначення поточного місця розташування об'єктів в заданому просторі в реальному часі. За допомогою RTLS можна не тільки оперативно визначити місце розташування, а й побачити траєкторію руху об'єкта на карті, контролювати його стан (знаходження в певній зоні), а також зберігати історію його переміщень.

типи систем

Координати місця знаходження визначаються за допомогою мітки, яка кріпиться до кожного спостережуваного об'єкту. Залежно від того, який тип сигналу посилають ці мітки можна реалізувати різні типи RTLS систем:

акустична (ультразвук) [20],

електромагнітна (ІК-випромінювання) [10],

UWB (радіочастотна, широкосмугова),

Narrowband (радіочастотна, вузькосмуговий сигнал),

Wi-Fi (RSSI),

Wi-Fi (ToA).

Система RTLS характеризується великою гнучкістю і широкими можливостями, її можна адаптувати практично під будь-які завдання в найкоротші терміни і з мінімальними вкладеннями. Вибір конкретної RTLS технології безпосередньо залежить від цілей і умов.

Отже, в даному бакалаврському проекті основною технологією знаходження координат нашого рухомого візка будемо використовувати технологію GSM, так як дана технологія не дорога, а також даною технології забезпечене велике покриття наших шляхів, що допоможе швидше та детальніше продіагностувати наші шляхи, та з великою точністю передати їх робітнику. А також, дозволяє визначати місце розташування об'єкта всередині приміщень і в зонах, де неможливе використання систем глобального позиціонування.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

2. МЕТОДИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦІОНУВАННЯ

В залежності від способу визначення місцезнаходження об'єкта всі методи можна поділити на 3 групи:

Метод, заснований на використанні триангуляції

Метод, заснований на використанні трилатерації.

Метод, заснований на вимірюванні сили сигналу[1].

2.1 Метод, заснований на використанні триангуляції

Методика Angle of Arrival (AOA) полягає у визначенні напрямку, з якого був прийнятий Bluetooth-пакет щодо орієнтації приймального вузла. АOA зазвичай застосовується при реалізації методу триангуляції.

Для реалізації технології використовується набір антен з певними характеристиками, приймач повинен буде швидко перемикатися між окремими антенами, одночасно вимірюючи фазовий зсув сигналу, обумовлений невеликими відмінностями в довжині шляху сигналу для різних антен.

Ці відмінності в довжині траси будуть залежати від напрямку входять радіочастотних хвиль щодо антен в решітці. Щоб полегшити вимір фази, пакет Bluetooth повинен мати специфічний вид: містити ділянку безперервного тону (СТ), в якому немає фазових зрушень, викликаних модуляцією.

В АOA-пакетах в корисне навантаження пакета (PDU) передається секція послідовних одиниць, що формує синусоїду на несучої частоті 250 кГц (малюнок 2). Це дає демодулятора час на синхронізацію, щоб потім вибрати I- (реальна складова) і Q- (уявна складова) компоненти сигналу, записати їх в буфер і передати додатком для подальшого аналізу[9].

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

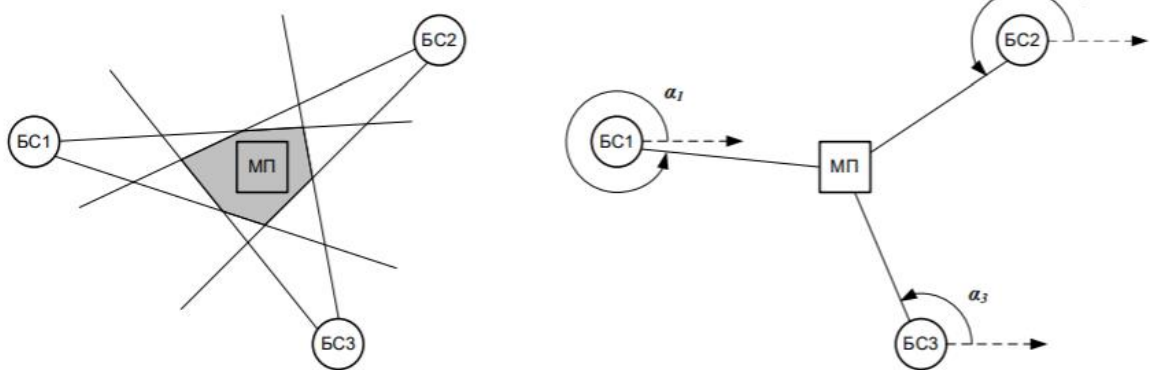


Рисунок 2.1 – Визначення місцезнаходження об’єкта з використанням триангуляції, коли відомо напрямки секторів антен базових станцій (зліва) або кут базової станції по відношенню до об’єкта контролю в деякій системі відліку (зправа)

Недоліки:

- низька точність визначення місця розташування об’єкта контролю;
- складність антени.

Переваги:

- можливість роботи на різних фізичних принципах;
- великий радіус дії;
- прості алгоритми визначення місця розташування об’єкта контролю.

2.2 Методи, засновані на використанні трилатерації

Трилатерація - метод визначення положення геодезичних пунктів шляхом побудови на місцевості системи суміжних трикутників, в яких вимірюються довжини їх сторін. Є одним з методів визначення координат на місцевості поряд з триангуляцією (в якій вимірюються кути відповідних трикутників) і полігонометрії (проводиться вимірювання як кутів, так і відстаней). В основі трилатерації лежить лінійна зарубка.

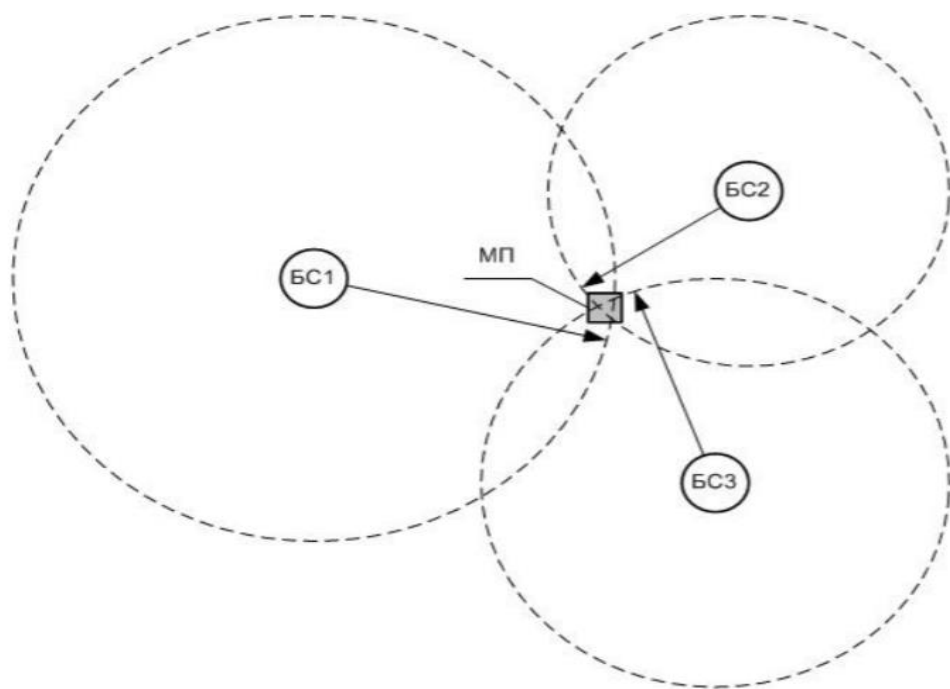


Рисунок 2.2 – Визначення місцезнаходження на основі методу трилатерації

2.3 Метод ToA

Метод ToA (time of arrival) цей ефективний метод відбудови від перешкод заснований на принципі контролю відстані від датчиків, встановлених на обладнанні, до місця виникнення дефекту в високовольтної ізоляції. До датчику, розташованому ближче до зони дефекту, імпульс від розряду за часом прийде раніше. Метод працює на основі визначення різниці в часі між приходом імпульсів. Найчастіше цей метод застосовується для виділення і відбраковування високочастотних імпульсів, які прийшли в обладнання ззовні, тобто є перешкодами. Відстань визначається за формулою:

$$S = t \cdot c,$$

де c – швидкість розповсюдження радіохвилі (швидкість світла);

t – час подолання хвилею відстані від МП до БС.

Недоліки:

- складні алгоритми визначення місця розташування об'єкта контролю;
- необхідність синхронізації часу на всіх БС і МП.

Переваги:

- великий радіус дії;
- мале енергоспоживання мобільним пристроєм;
- висока точність визначення місця розташування об'єкта контролю.

2.4 Метод TDoA

Метод TDoA (time difference of arrival) група методів, заснованих на вимірі різниці в часі передачі сигналу від мобільного пристрою до базової станції, з синхронізованими годинами і заздалегідь відомим місцем розташування. Іноді говорять також, що цей метод застосовує OWR (One-Way Ranging) - одностороннє вимір часу поширення сигналу. Положення приймача визначається перетином гіпербол, так як для визначення положення приймача застосовується різностно-далекомірний метод з використанням мінімум трьох опорних точок з відомим положенням для обміну сигналами з мобільним пристроєм. Метод відомий в безлічі варіантів і реалізацій за методом синхронізації годин, порядку передачі пакетів і т. д.

Недоліки:

- складні алгоритми визначення місця розташування об'єкта контролю;
- необхідність синхронізації часу між усіма мобільними пристроями.

Переваги:

- великий радіус дії;
- мале енергоспоживання мобільним пристроєм;
- висока точність визначення місця розташування об'єкта контролю.

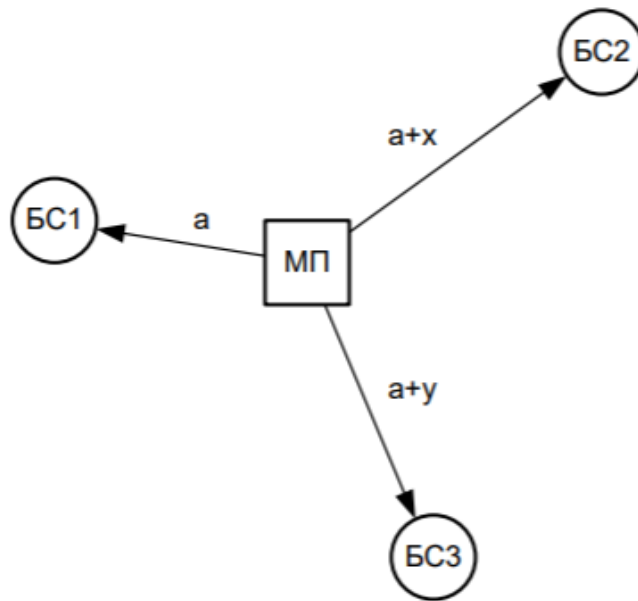


Рисунок 2.3 – Метод TDoA

2.5 Метод ToF

Метод ToF (time of flight) заснований на виміру часу поширення сигналу, загальне формулювання для цілого ряду методів, термін часто зустрічається в літературі, хоча зазвичай не вказує на певну технологію. Можна сказати, що він зазвичай відноситься до методів, коли час проходження сигналу вимірюється в одному напрямку, але бувають і виключення:

$$S = \frac{1}{2} \cdot t \cdot c$$

де c – швидкість розповсюдження радіохвилі (швидкість світла)

t – час подолання хвилею відстані від БС до МП.

Недоліки:

- неможливо розділити мобільні пристрої (для ідентифікації);
- МП має відображати електромагнітну хвилю в напрямку БС.

Переваги:

- відсутність необхідності синхронізації між пристроями;
- висока точність визначення місця розташування об'єкта контролю;
- великий радіус дії;

– мобільний пристрій – пасивний (не споживає енергію).

2.6 Метод TWR

Метод TWR (two-way ranging) полягає в наступному: БС фіксує час відправлення сигналу (T_1), об'єкт контролю фіксує час отримання сигналу (t_1), а також час відправлення сигналу назад на БС (t_2). У сигналі від об'єкта контролю до базової станції передаються часи t_1 і t_2 . БС отримує сигнал з об'єкту контролю и фіксує час отримання (T_2). Відстань обчислюється за формулою:

$$S = \frac{1}{2} \cdot c \cdot ((T_2 - T_1) - (t_2 - t_1))$$

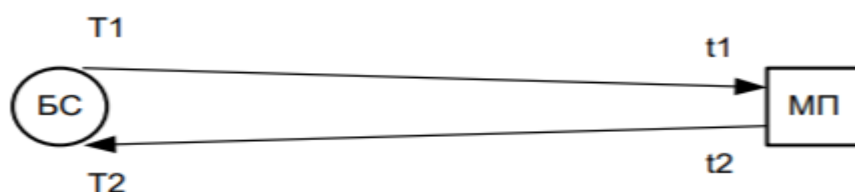


Рисунок 2.4 – Метод TWR

Недоліки:

– високе енергоспоживання МП.

Переваги:

– відсутність необхідності синхронізації між пристроями;

– висока точність визначення місця розташування об'єкта контролю;

– великий радіус дії.

2.7 Метод SDS-TWR

Метод SDS-TWR (symmetrical double-sided two-way ranging) метод вимірювання дистанції, що є вдосконаленим TWR, який використовує

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

подвійний вимір за методом TWR послідовно в двох напрямках, від першого пристрою до другого і навпаки. У кожному циклі пристрої обмінюються часом ретрансляції, виміряним самими пристроями. Після двох вимірів час проходження сигналу можна обчислити з похибкою, достатньою для отримання дециметровому і навіть сантиметрової точності[15].

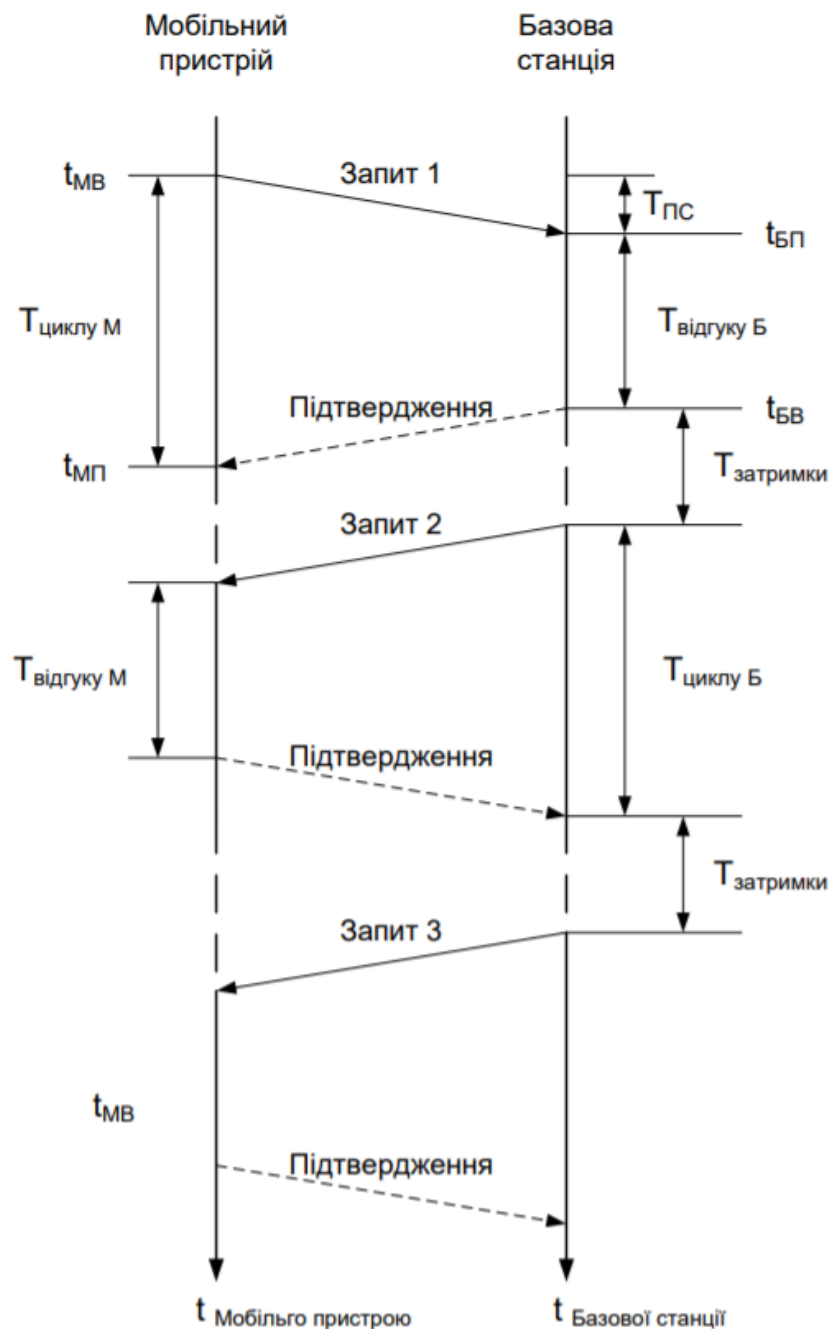


Рисунок 2.5 – Обмін пакетами у процесі виміру відстані методом SDS-TWR

2.8 Метод NFER

NFER - відносно нова технологія позиціонування, яка використовує одне або кілька приймаючих пристроїв і мітки-передавачі. Технологія заснована на тому, що зсув фаз між електричної та магнітної складової електромагнітного поля змінюється в міру віддалення від випромінюючої антени.

Поблизу невеликий (щодо довжини хвилі) антени електрична і магнітна складові поля радіохвилі зрушені по фазі на 90 градусів. При збільшенні відстані від антени ця різниця зменшується. При достатньому видаленні від антени зрушення фаз сходять нанівець.

Недоліки:

- складні алгоритми визначення місця розташування об'єкта контролю;
- малий радіус дії;
- складні антени.

Переваги:

- можливість роботи в закритих приміщеннях;
- висока точність визначення місця Розташування об'єкта контролю [14].

2.9 Метод, заснований на вимірюванні сили сигналу

RSSI (received signal strength indicator) – це повна потужність прийнятого приймачем сигналу. Вимірюється приймачем за логарифмічною шкалою в дБм (dBm, децибел щодо 1 мілівата).

Вимірювання рівня сигналу мережі на телефоні найчастіше потрібна для точної діагностики проблем, через які спостерігається переривання дзвінків, "випадіння" телефону з мережі. Як правило (зокрема, в стільникових телефонах і інших GSM-пристроях), потужність сигналу вимірюється після перетворення його частоти з основної в проміжну, але до посилення. У

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

пристроях, що не перетворюють частоту сигнал з основної в проміжну, потужність сигналу вимірюється на основній частоті.

Значення RSSI погано корелює з якістю сигналу, але може використовуватися для його приблизної оцінки. Більш точну оцінку можна отримати за допомогою параметра індикатор якості сигналу [16].

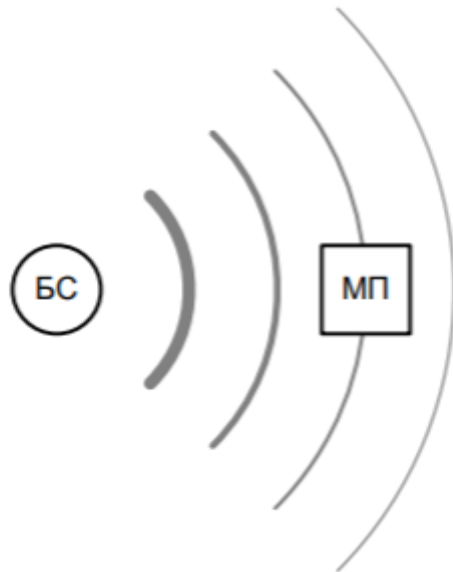


Рисунок 2.6 – Метод заснований на вимірюванні сили сигналу (RSSI)

Недоліки: – складні алгоритми визначення місця розташування об'єкта контролю;

– низька точність визначення місця розташування об'єкта контролю.

Переваги:

– низька вартість;

– мале енергоспоживання мобільним пристроєм.

.

3. MEMS ДАТЧИКИ

Для реалізації MEMS датчиків визначенні позиціонуванням ОК в просторі в нашій системи НК для діагностики рейок ми використовуємо систему MEMS датчиків, які складаються з гіроскопів і акселерометр [18] .

Математичний опис повороту в тривимірному просторі. Класичними незалежними параметрами, що дозволяють однозначно задати кутове положення твердого тіла, є три кути Ейлера - Крилова (кути Крилова використовують в авіації, тому інакше їх називають літаковими кутами): курс (yaw) φ , крен (roll) ψ і тангажу (pitch) θ [21]. Позитивні значення кутів відраховуються проти ходу годинникової стрілки (рисунок 4.1), а підсумкове кутове положення об'єкту в наведеній глобальній системі координат задається в відповідно до послідовності поворотів $\varphi \rightarrow \theta \rightarrow \psi$.

Знаючи значення кутів Ейлера - Крилова в поточний дискретний момент часу $(\varphi_i, \psi_i, \theta_i)^T$ і вектор кутових швидкостей обертання $(w_z^*, w_y^*, w_x^*)^T$ в нерухомій глобальній системі координат $OX^*Y^*Z^*$, відповідно до теорії інерційної навігації можна знайти кутові координати в момент часу $(i + 1)$:

$$(\varphi_{i+1}, \psi_{i+1}, \theta_{i+1})^T = (\varphi_i, \psi_i, \theta_i)^T + T(w_z^*, w_y^*, w_x^*)^T, \quad (1)$$

де T - інтервал часу між моментами i та $(i + 1)$.

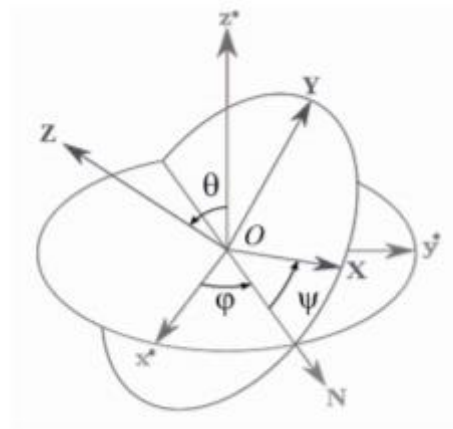


Рисунок 3.1

Оскільки MEMS гіроскоп видає кутові швидкості обертання $(w_z, w_y, w_x)^T$ навколо осей пов'язаної з ним рухомий, а не глобальної системи координат, для обчислення (1) необхідно виконати функціональне перетворення

$$(w_z^*, w_y^*, w_x^*)^T = \Phi\{(w_z, w_y, w_x)^T\}. \quad (2)$$

Позитивні напрямки обертання MEMS гіроскопа відносно осей X^* і Z^* відраховуються, як правило, проти годинникової стрілки.

Найбільш очевидним варіантом перетворення (2) є застосування математичного апарату афінних перетворень [21, 22] і використання в якості функціоналу $\Phi\{\cdot\}$ в (2) вираження

$$(w_z^*, w_y^*, w_x^*)^T = \mathbf{R}_{ZXY}^{-1}(w_z, w_y, w_x)^T, \quad (3)$$

де $\mathbf{R}_{ZXY} = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Y$ – матриця повороту в тривимірному (3-D) просторі, яка має властивість ортогональності, тобто $\mathbf{R}_{ZXY} \mathbf{R}_{ZXY}^T = \mathbf{E}$, де $\mathbf{E}$ – одинична матриця, і $\mathbf{R}_{ZXY}^{-1} = \mathbf{R}_{ZXY}^T$, що дозволяє замінити обчислювально ємну процедуру звернення до (3) транспортуванням. Також для матриці $\mathbf{R}_{ZXY}$ (як і для матриць $\mathbf{R}_Z, \mathbf{R}_X, \mathbf{R}_Y$) виконується рівність $\det[\mathbf{R}_{ZXY}] = 1$, тобто дотримується умова ортогональності осей рухомий системи координат. Слід враховувати, що твір матриць повороту некомутативними, тобто $\mathbf{R}_X \mathbf{R}_Y \neq \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_X$, і результат залежить від послідовності поворотів навколо кожної з осей.

Оскільки трійка векторів, утворених осями X, Y і Z на рисунку 4.1, є правою, то матриці повороту $\mathbf{R}_X, \mathbf{R}_Y$ і $\mathbf{R}_Z$ відповідно мають вигляд[21]

$$\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_Y = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Однак практичне застосування матриці 3-D повороту для вирішення завдань інерційної навігації обмежується двома факторами[21, 22]:

- 1) ефектом «шарнірного замку» (Gimbal lock);

2) помилками, пов'язаними з кінцевою точністю представлення результату в обчислювальних пристроях при знаходженні значень тригонометричних функцій і похідні матриць, в результаті яких матриця R_{ZXY} крім обертання поступово починає виробляти операції зсуву і / або розтягування, тобто перестає виконуватися умова ортогонального повороту $\det[R_{ZXY}] = 1$.

Рішенням проблеми «шарнірного замку» є інтегрування кінематичних рівнянь[22]:

$$\begin{aligned} w_x^* &= \sin \psi w_z + \cos \psi w_x, \\ w_y^* &= w_y - (w_z \cos \psi - w_x \sin \psi) \tan \theta, \\ w_z^* &= (w_z \cos \psi - w_x \sin \psi) / \cos \theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Це дозволяє реалізувати функціонал (2) при довільному кутовому положенні рухомого об'єкта за винятком особливих точок $\theta = \pm 0.5(2k + 1)\pi$, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, в яких рівняння (4) вироджуються. Існування особливих точок в рівняннях руху твердого тіла з однією нерухомою точкою (5) пов'язано не з фізикою руху твердого тіла, а обумовлено обраним способом математичного опису його обертального руху [21]. Аналогічний недолік притаманний і евристичної математичної моделі, що враховує компенсацію сигналів кутової швидкості при довільному кутовому положенні MEMS гіроскопа $(\varphi, \psi, \theta)^T$ [25]:

$$\begin{aligned} w_x^* &= \sin \psi w_z + \cos \psi w_x, \\ w_y^* &= w_y - (w_z - w_x^* \sin \psi) \tan \theta / \cos \psi, \\ w_z^* &= (w_z - w_x^* \sin \psi) \cos \psi \cos \theta + (w_y - w_y^*) \sin \theta - (w_x - \\ &- w_x^* \cos \psi) \sin \psi \cos \theta. \end{aligned} \quad (6)$$

В даний час часто використовується інший підхід до визначення орієнтації об'єкта, заснований на застосуванні кватерніонів і інтегруванні диференціальних кінематичних рівнянь (5) в параметрах Ейлера (Родріго - Гамільтона), однозначним чином кодує поворот твердого тіла [21, 23, 24]. Кватерніон є 4-компонентний вектор $Q = (w, x, y, z)^T$, який зручно записати у

вигляді гіперкомплексні числа $Q = w + ix + jy + kz$, де елементи кватерніона розраховуються за формулами:

$$w = \cos(\varphi/2) \cos(\psi/2) \cos(\theta/2) - \sin(\varphi/2) \sin(\psi/2) \sin(\theta/2),$$

$$x = \cos(\varphi/2) \cos(\psi/2) \sin(\theta/2) - \sin(\varphi/2) \sin(\psi/2) \cos(\theta/2),$$

$$y = \sin(\varphi/2) \cos(\psi/2) \cos(\theta/2) - \cos(\varphi/2) \sin(\psi/2) \sin(\theta/2),$$

$$z = \cos(\varphi/2) \sin(\psi/2) \cos(\theta/2) - \sin(\varphi/2) \cos(\psi/2) \sin(\theta/2)$$

і називаються параметрами Родріга-Гамільтона.

Послідовність поворотів кодується в вигляді твору декількох кватерніонів. При множенні Гіперкомплексні чисел справедливі співвідношення:

$$ij = k, ji = -k, jk = i, kj = -i, ki = j, ik = -j, i^2 = j^2 = k^2 = -1, \quad (7)$$

тобто множення кватерніонів некомутативними. Для корекції помилок округлення в ході обчислень необхідно унормувати два-норму кватерніона $\|Q\| = 1$.

Рівняння (5) в кватерніоній записі приймають вид

$$2dQ/dt = 2Q^* = Q^\circ(iw_y + jw_z + kw_x), \quad (8)$$

де символ « $^\circ$ » позначає множення кватерніонів відповідно до правил (7).

Формули для знаходження кутів Ейлера – Крилова через параметри Родріго - Гамільтона мають вид:

$$\varphi = \arctg \left[\frac{wy - xz}{w^2 + x^2 - 0.5} \right], \quad \psi = \arcsin[2(xy + wz)], \quad \theta = \arctg \left[\frac{wx - yz}{w^2 + y^2 - 0.5} \right].$$

Виставка (визначення початкових умов). Для виставки кутів крену ψ і тангажу θ з допомогою тривісного MEMS акселерометра, видає прискорення a_x, a_y і a_z по осях X, Y і Z пов'язаної з ним рухомий системи координат, відповідні значення кутів можна знайти за проекціями векторів прискорення вільного падіння $g = 9.81 \text{ м/с}^2$ на кожну з осей, використовуючи математичний апарат матриць повороту (4):

$$\psi_a = -\arctg(a_x/a_z) - \pi, \arctg(a_x/a_z) < 0,$$

$$\psi_a = -\arctg(a_x/a_z) + \pi, \arctg(a_x/a_z) > 0;$$

$$\theta_a = \arctg[a_y/(a_z \cos \psi - a_x \sin \psi)] - \pi,$$

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		42

$$\arctg[a_Y/(a_Z \cos \psi - a_X \sin \psi)] > 0,$$

$$\theta_a = \arctg[a_Y/(a_Z \cos \psi - a_X \sin \psi)] + \pi,$$

$$\arctg[a_Y/(a_Z \cos \psi - a_X \sin \psi)] < 0.$$

У інерційних навігаційних системах початкове значення курсу φ , як правило, отримують за допомогою 3-осного магнітометра. Введемо допущення, що початкове значення курсу для рухомого обертового об'єкта також може бути отримано за допомогою оптичної, магнітної або супутникової системи позиціонування.

Фільтрація сигналів MEMS датчиків. Отримати оптимальну за критерієм мінімуму дисперсії помилки лінійну незміщену оцінку стану лінійної нестационарної дискретної системи, на яку впливає білий шум з нульовим середнім і відомою дисперсією, дозволяє калманівська фільтрація. Математичний опис оптимального фільтра Калмана, що приводиться в монографіях [26, 27], є складним і вимагає збільшення обчислювальних операцій для реалізації фільтра при збільшенні порядку моделі зміни даних. Тому для вирішення практичних задач зазвичай спрощують реалізацію фільтра Калмана, використовуючи $\alpha - \beta$ фільтр [28]. Поєднати переваги широкосмугового $\alpha - \beta$ фільтра (малий час перехідного процесу) і вузькосмугового $\alpha - \beta$ фільтра (гарна якість згладжування) можливо, використовуючи $\alpha - \beta$ фільтр з перехресними зв'язками [29]. Моделі стану і спостереження для такого фільтра мають вигляд:

$$\mathbf{X}(j) = \mathbf{\Phi}\mathbf{X}(j-1) + \mathbf{D}\mathbf{w}(j), \mathbf{Z}(j) = \mathbf{H}\mathbf{X}(j) + \mathbf{D}\mathbf{i},$$

де $\mathbf{X}$ - послідовність станів; $\mathbf{\Phi}$ - фундаментальна матриця переходів, $\mathbf{\Phi} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, T - інтервал дискретизації; $\mathbf{H}$ - матриця вимірювань; $\mathbf{D}\mathbf{w}$ - матриця дисперсій, $\mathbf{D}\mathbf{i}$ - матриця дисперсій вимірювань; j - дискретний час.

Зміщення вектора стану в момент часу $(j-1)$ для кожного фільтра мають вигляд:

$$\hat{x}^{01}(j-1|j-1) = \frac{\hat{x}^1(j-1|j-1)p_{11}\mu_1(j-1)}{p_{11}\mu_1(j-1)+p_{21}\mu_1(j-1)} + \frac{\hat{x}^2(j-1|j-1)p_{21}\mu_1(j-1)}{p_{11}\mu_1(j-1)+p_{21}\mu_1(j-1)},$$

$$\hat{x}^{02}(j-1|j-1) = \frac{\hat{x}^1(j-1|j-1)p_{12}\mu_1(j-1)}{p_{12}\mu_1(j-1)+p_{22}\mu_1(j-1)} + \frac{\hat{x}^2(j-1|j-1)p_{22}\mu_1(j-1)}{p_{12}\mu_1(j-1)+p_{22}\mu_1(j-1)},$$

де $\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} \\ p_{21} & p_{22} \end{bmatrix}$ - матриця ймовірностей переходів,

$$\mu_i(j) = L_i(j) \sum_{k=1}^2 p_{ki}(j-1) / \sum_{l=1}^2 L_l(j) \sum_{k=1}^2 p_{ki}(j-1),$$

$$L_i(j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_i}} \exp \left(-\frac{(\mathbf{Z}(j) - \mathbf{H}\Phi \hat{x}^{0i}(j-1|j-1))^2}{2D_i} \right).$$

Вихідні дані пари $\alpha - \beta$ фільтрів описуються виразами

$$\hat{x}^1(j|j) = \Phi x^{01}(j-1|j-1) + [\alpha_1, \beta_1/T]^T (\mathbf{Z}(j) - \mathbf{H}\Phi x^{01}(j-1|j-1)),$$

$$\hat{x}^2(j|j) = \Phi x^{02}(j-1|j-1) + [\alpha_2, \beta_2/T]^T (\mathbf{Z}(j) - \mathbf{H}\Phi x^{02}(j-1|j-1)),$$

а вихідні дані $\alpha - \beta$ фільтра з перехресними зв'язками -

$$\hat{x}(j|j) = \sum_{i=1}^2 \hat{x}^i(j|j) \mu_i(j).$$

Оптимальним співвідношенням для коефіцієнтів $\alpha - \beta$ фільтра з перехресними зв'язками є

$$\beta = 2\alpha, \beta < 1,$$

а умова стійкості фільтра має вигляд

$$\beta < 2(1 - \alpha), \beta < 1.$$

Чим менше α , тим вже смуга пропускання (вище згладжують властивості фільтра) і тим з більшою помилкою він відпрацьовує високочастотні складові в спектрі вхідного сигналу.

Для виключення дрейфу кутових координат в стані спокою при відсутності обертання (наявності тільки шуму MEMS гіроскопа) на виході фільтра потрібно забезпечити сигнал нульовий амплітуди. Це призводить до необхідності використання нелінійної фільтрації. Спочатку в статичному режимі оцінюється математичне очікування сигналів гіроскопа, яке віднімається з амплітуди кутової швидкості. За аналогією з [30] запропоновано використовувати комбінований адаптивний метод фільтрації: первісну лінійну фільтрацію ($\alpha - \beta$ фільтр з перехресними зв'язками) і подальшу нелінійну процедуру по розпізнаванню інформативною (корисною) складової в суміші сигналу і шуму на виходах MEMS гіроскопа. В разі прийняття позитивного рішення про наявність корисного сигналу (наявності обертання) видається

результат фільтрації; в іншому випадку видається нульовий сигнал кутової швидкості. Найбільш очевидною ознакою корисного сигналу (обертання) є амплітудний: якщо амплітуда відліку на виході фільтра вище порогового значення, то приймається рішення про присутності корисного сигналу (обертання):

$$w = \begin{cases} 0, & |w_\phi - \hat{m}_w| \leq w_{\text{пор}}, \\ w_\phi - \hat{m}_w, & |w_\phi - \hat{m}_w| > w_{\text{пор}}, \end{cases}$$

де w та w_ϕ - значення кутової швидкості на виході нелінійного фільтра і $\alpha - \beta$ фільтра з перехресними зв'язками відповідно, $\hat{m}_w$ - оцінка математичного очікування величини дрейфу на виході фільтра, $w_{\text{пор}}$ - амплітудний поріг.

Для комплексування кутів Ейлера - Крилова (за винятком курсу φ), що обчислюються з допомогою гіроскопа і акселерометра, використаний спрощений додатковий (комплементарний) фільтр Калмана [31]:

$$(\psi_{i+1}, \theta_{i+1})^T = (\psi_i, \theta_i)^T + (1 - \delta)T(w_y^*, w_x^*)^T + \delta(\psi_a, \theta_a)^T,$$

де параметр δ визначає частку складової акселерометра в підсумковому результаті, а величина $(1 - \delta)/\delta$, звана часом релаксації, показує, що при відсутності сигналу кутовий швидкості з гіроскопа перехідний процес досягне сталого значення не більше ніж через $T(1 - \delta)/\delta$ секунд.

Реалізує запропоновані алгоритми структурна схема лабораторного макета з зазначенням протоколів обміну наведена на рисунку 4.2, де символом **G** позначений вектор кутових швидкостей MEMS гіроскопа $(w_z, w_y, w_x)^T$, символом **A** - вектор прискорень $(a_z, a_y, a_x)^T$ MEMS акселерометра, символом **I** - ініціалізуюча послідовність для завдання режимів роботи гіроскопа і акселерометра. Для управління поворотним підставою через ПЕОМ використана встановлюється в РСІ слот плата виведення даних PIODA16.

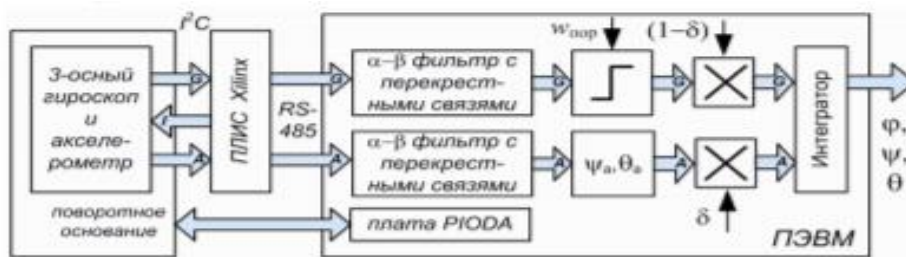


Рисунок 3.2

Кути Ейлера

Сферичним називається рух тіла, при якому одна точка тіла залишається нерухомою. Назва відображає той факт, що при такому русі точки тіла рухаються по сферам. Більш повно це рух називається обертанням навколо точки. Поворот тіла можна задати трьома кутовими координатами. Існує кілька способів вибору таких кутів.

Ми розглянемо кути Ейлера: ψ -кут прецесії, θ -кут нутації, ϕ -кут власного обертання (Рис.4.3). Покажемо, що, знаючи кути Ейлера, можна побудувати положення тіла (осей $x' y' z'$) щодо осей $x y z$. Нехай в поточний момент часу t довільний вектор в тілі a має координати $x(t) y(t) z(t)$, що утворюють стовпець $a(t)$ в нерухомих осях. очевидно, у що його координати в осях $x' y' z'$ незмінні і рівні x_0, y_0, z_0 . Вони утворюють постійний стовпець a_0 .

$$a(0)=a_0$$

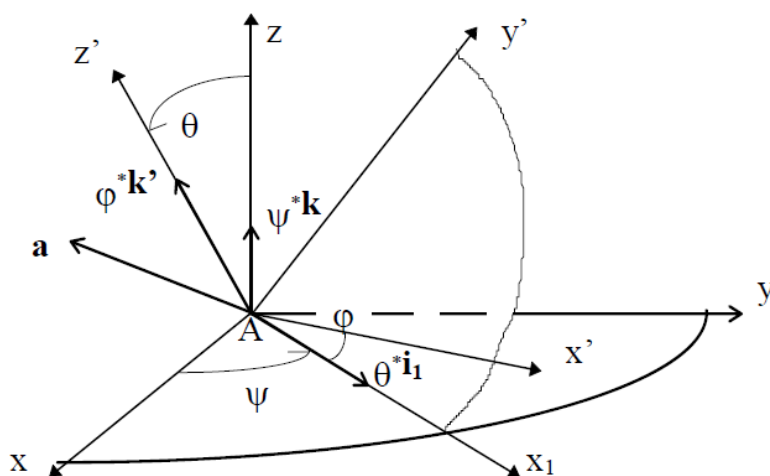


Рисунок 3.3

Покажемо, як трьома послідовними поворотами можна поєднати осі $(x y z)$ з осями $(x' y' z')$. Простежимо при цьому за зміною координат вектора $a(t)$ від a в нерухомій системі до a_0 в рухомій і таким чином знайдемо залежність $a(t)$ від кутів Ейлера.

Спочатку поворотом навколо осі z на кут ψ перейдемо до осей $(x_1 y_1 z)$ (y_1 не зображено на Рис.4.3). Ось x_1 називається лінією вузлів. Стовпці координат a і a_ψ пов'язані матрицею переходу T_ψ від другої до першої системи координат. Як відомо ця ж матриця є матрицею повороту тіла з першого положення в друге:

$$a = T_\psi a_\psi \quad T_\psi = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Тепер поворотом навколо x_1 на кут ϑ перейдемо до осей $(x_1 y_2 z')$ (y_2 не зображена). Аналогічно до попереднього, координати a_ψ і a_θ виявляться пов'язаними матрицею повороту T_θ від першої до другої системи координат

$$a_\psi = T_\theta a_\theta \quad T_\theta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ 0 & \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix}$$

Останнім здійснимо поворот навколо z' на кут φ . При цьому осі $(x_1 y_2 z')$ з'єднаються з осями $(x' y' z')$: і координати вектора a утворюють стовпець a_0 .

$$a_\theta = T_\varphi a_0,$$

Тут T_φ має вигляд матриці T_ψ , але для кута φ :

$$T_\varphi = T_\psi(\varphi)$$

Ми показали, що координати полюса A і кути Ейлера визначають положення тіла. Таким чином шість функцій: $x_A(t), y_A(t), z_A(t); \psi(t), \vartheta(t), \varphi(t)$ є законом руху вільного тіла. Тому кажуть, що вільне тіло має 6 ступенів свободи.

Попутно ми знайшли вираз матриці повороту T через кути Ейлера:

$$a(t) = T(t) a_0; \quad T(t) = T_\psi T_\theta T_\varphi \quad a_0 = Const$$

Кутова швидкість і кутове прискорення

Знайдемо проекції кутової швидкості на нерухомій осі:

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

$$\omega_x = \vartheta^* \cos \psi + \varphi^* \sin \psi \sin \vartheta;$$

$$\omega_y = \vartheta^* \sin \psi - \varphi^* \cos \psi \sin \vartheta;$$

$$\omega_z = \psi^* + \varphi^* \cos \vartheta;$$

Набагато простіше знайти ці проекції, скориставшись теоремою про складання кутових швидкостей. Її можна застосувати, оскільки кожний наступний поворот заданий по відношенню до попередньої системи координат. Тіло робить три обертання з кутовими швидкостями ψ^* к навколо осі z, ϑ^* i_1 навколо осі x_1 і φ^* k' навколо осі z'. По теоремі:

$$\omega = \psi^* k + \vartheta^* i_1 + \varphi^* k'$$

На відміну від обертального руху тіла, де ω спрямований весь час уздовж фіксованої осі обертання, тут такий осі немає і вектор ω може змінювати і модуль і напрямок.

Кутове прискорення направлено, як векторна похідна, по дотичній до годографу вектора ω . Тому, на відміну від обертального руху є тут не збігається за напрямком з ω .

$$\varepsilon = d\omega/dt$$

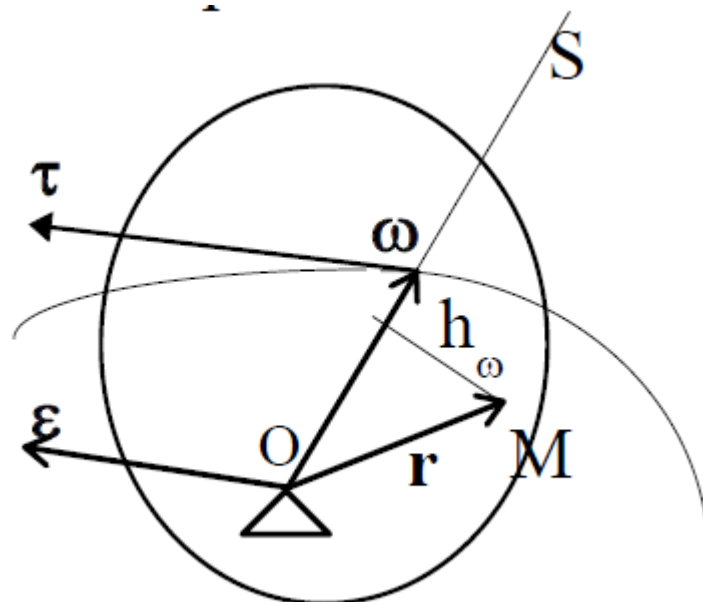


Рисунок 3.4

Швидкість і прискорення точки тіла

Виберемо за полюс нерухому точку O . Тоді швидкість довільної точки тіла можна знайти за формулою

$$v = \omega \times r$$

Звідси випливає, що на миттєвої осі S швидкості в даний момент дорівнюють нулю, і лінійно зростають з віддаленням від S .

$$v = \omega h_w$$

Прискорення довільної точки M

$$w = w^{bp} + w^{oc} = \varepsilon \times r + \omega \times (\omega \times r)$$

складається з обертальної і осестрімкої складових, які при сферичному русі не ортогональні. Осестрімкі прискорення як і раніше направлено до миттєвої осі S , а обертальний по перпендикулярно площині (εr).

Векторним формулами відповідають матричні вирази швидкості і прискорення, зручні для їх обчислення в довільний момент часу.

$$V = \Omega r$$

$$W = (\varepsilon + \Omega^2)r$$

Рух вільного тіла

Розглянемо вільне тіло, що рухається щодо системи відліку з осями $X Y Z$ (Рис.4.5). Виберемо в тілі довільну точку A (полюс) і помістимо в неї початок осей $x y z$, паралельних $X Y Z$ і рухомих поступально. У тому ж полюсі A виберемо початок осей $x' y' z'$, пов'язаних з тілом.

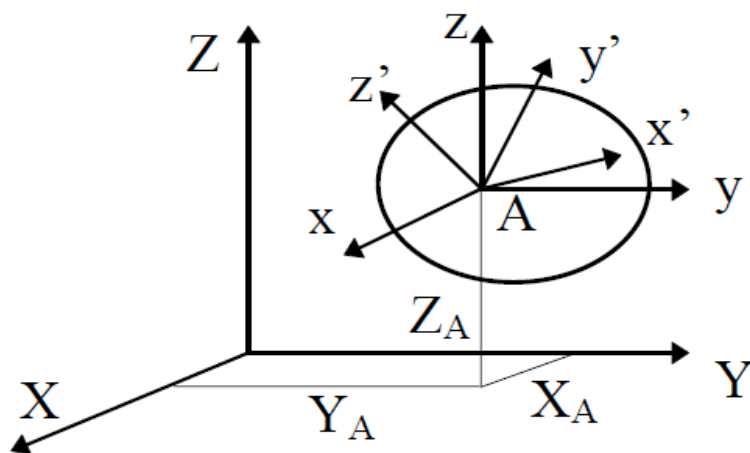


Рисунок 3.5

Рух тіла задано, якщо зазначений спосіб визначення положення осей x' , y' , z' , в довільний момент часу. Для цього досить визначити положення початку A координатами $X_A(t)$, $Y_A(t)$, $Z_A(t)$, і поворот осей x' , y' , z' щодо x , y , z ... Як відомо, такий поворот можна задати трьома кутами Ейлера.

Таким чином шість функцій є законом вільного руху твердого тіла. Це означає, що вільне тіло має 6 ступенів свободи. Згадаймо, що при поступальному русі тіло має три ступені свободи, при обертанні - одну і при плоскому - три.

$$X_A(t), Y_A(t), Z_A(t).$$

$$\psi(t), \theta(t), \varphi(t)$$

Зауважимо, що з перших трьох функцій по формулах кінематики точки можна знайти швидкість V_A і прискорення W_A полюса A , а по кутах Ейлера - кутову швидкість ω і кутове прискорення ε тіла.

Швидкість довільної точки тіла знайдемо по теоремі про розподіл швидкостей

$$V = V_A + \omega \times \rho$$

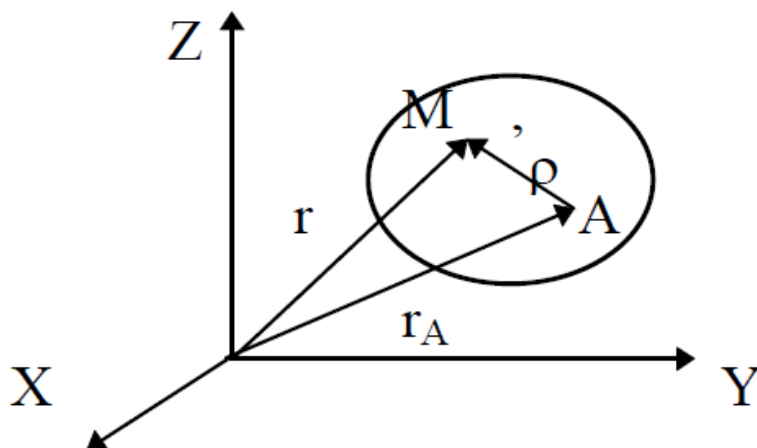


Рисунок 3.6

Прискорення довільної точки тіла знайдемо, диференціюючи цю теорему

$$dV/dt = dV_A/dt + d\omega/dt \times r + \omega \times dr/dt$$

Враховуючи, що

$$dV/dt = W, \quad dV_A/dt = W_A$$

$d\omega/dt = \varepsilon$ - кутове прискорення тіла

$$dr/dt = \omega \times r$$

як для "вектора в тілі".

Таким чином прискорення довільної точки дорівнює

$$W = W_A + \varepsilon \times r + \omega \times (\omega \times r)$$

Останні два доданків вже зустрічалися нам в сферичному русі. Як і там, назвемо їх обертальним і осестрімкого прискорення точки M при її обертанні навколо полюса A.

Таким чином формули швидкості і прискорення показують, що вільний рух тіла можна уявити як результат складання двох рухів: поступального руху з полюсом A і сферичного руху навколо полюса.

3.1 MEMS гіроскоп

Призначення гіроскопа полягає в вимірі кутових швидкостей щодо однієї або декількох осей. відстежувати і фіксувати рух в тривимірному просторі можна в спільному використанні гіроскопа і акселерометра.

Більшість MEMC гіроскопів є вібраційними. Усередині гіроскопа є робоче тіло, що здійснює в одній площині зворотно поступальний рух. Якщо поставити це тіло на обертову платформу, площа якої збігається з площиною коливань, то на коливається масу почне діяти сила Коріоліса. ця сила спрямована перпендикулярно напрямку коливань (рис.4.3а) і осі обертання. Визначивши силу Коріоліса і знаючи лінійну швидкість тіла, обчислюється кутова швидкість і її кутове прискорення.

Все вібраційні гіроскопи можна розділити на:

- балкові;
- біморфний.

Принцип роботи балкових гіроскопів (рис.4.3б): консольну балку або пластину змушують коливатися за допомогою п'єзоелементів в напрямку осі X. Під дією сили Коріоліса при обертанні щодо осі Z, паралельної поздовжньої осі балки, порушуються коливання уздовж осі Y. Вони реєструються іншими п'єзоелементами.

На нижньому боці балки приклеєний п'єзоелемент, що збуджує вібрацію, на бічних гранях також є п'єзоелемент для вимірювання. Так як складно забезпечити стабільні параметри клейового з'єднання металу і п'єзокераміки, то такі гіроскопи вважаються низькотехнологічними.

У біморфних гіроскопах резонатор являє собою дві склеєні п'єзопластини, поляризовані в протилежних напрямках. Для виникнення коливань до пластин (або до однієї з них) прикладають напругу, в результаті одна пластина починає стискатися, інша розтягуватися. Під дією сили Коріоліса при обертанні порушуються вторинні коливання, які можна розпізнати тими ж електродами.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						52
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

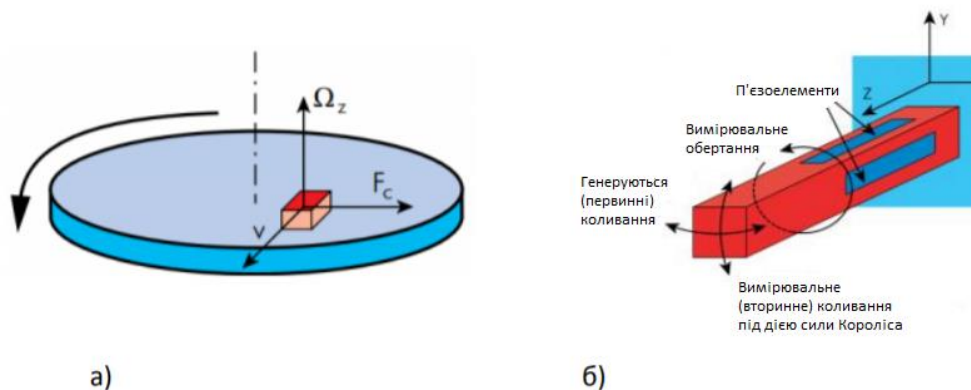


Рисунок 3.7 - Принцип дії

а) вібраційний гіроскоп, б) балочного вібраційного гіроскопа

Залежно від типу руху чутливого елемента в підвісі, MEMS гіроскопи можна розділити на три групи:

- RR-типу - з обертним рухом чутливого елемента по обидва ступеням свободи;
- RL-типу - з обертним рухом по одній ступеня свободи і з поступальним - по іншій;
- LL-типу - з поступальною ходою по обидва ступеням волі.

Конструкція MEMS гіроскопа RL-типу представлена на рисунку 4.4. У цьому гіроскопі вимушене рух чутливого елемента, що забезпечується вібраційних двигуном, є поступальним; інший рух, що є інформаційним - обертальний.

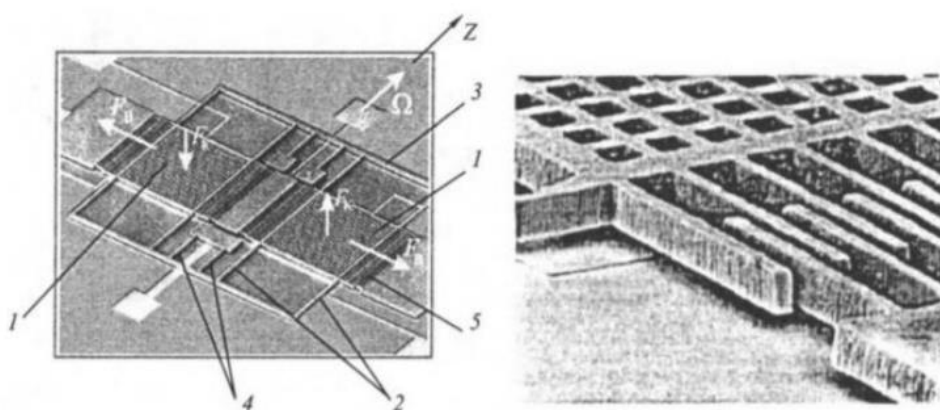


Рисунок 3.8 - Конструкція мікромеханічного гіроскопа RL – типу

У конструкціях MEMC гіроскопів RR-типу реалізований пружний карданний підвіс чутливого елемента. інерційна маса чутливого елемента розташована симетрично щодо площині механічної структури. Навколо осі внутрішньої рамки з допомогою електростатичного вібраційного двигуна, реалізованого в вигляді пари електродів, розташованих на діелектричній підкладці під внутрішньою рамкою, створюється змінний кінетичний момент.

ММГ LL-типу (гіроскопи з зосередженої масою,)

В основу конструктивної схеми MEMC гіроскопів LL-типу покладено виконаний з полікристалічного кремнію пружний підвіс чутливий елемент з двома поступальними мірами свободи в площині підвісу. У конструкції гіроскопа використовуються два незалежних пружних підвісу двох чутливих елементів на одній підкладці, порушуваних за допомогою гребінчастого електростатичного вібраційного двигуна і об'єднаних диференціальної системою ємнісного знімання, утвореної кожним з чутливих елементів його системою гребінчастих електродів ємнісного датчика і системою електродів, розташованих на підкладці.

Дана конструкція MEMC гіроскопів забезпечує зниження від ударів і лінійних вібрацій підстави а також, похибки гіроскопа від лінійних прискорень. Товщина механічної структури підвісу - 6 мкм. Корпус MEMC гіроскопа не вносять в вакуум, тому, незважаючи на невисоку твердість підвісу через його малої товщини і щодо великої площі, стійкість до впливу ударів і вібрацій в напрямку, перпендикулярному площині підкладки, забезпечується повітряної «подушкою», що виникає в зазорі між підкладкою і поверхнею чутливого елемента. Прилад розміщується в керамічному корпусі розміром 7х7х3 мм і має масу менше 1 г.

MEMC гіроскоп LL-типу (гіроскоп з кільцевих резонатором)

У цьому гіроскопі як чутливо елемента використовується кільцевої резонатор. Перевагою подібних MEMC гіроскопів є стійкість до зовнішніх механічних впливів, що забезпечується симетрією конструкції кільцевого резонатора і його підвісу. У відомих MEMC гіроскопах з кільцевих

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		54

резонатором, як правило, реалізується схема компенсаційного типу. випадковий дрейф гіроскопа становить величину порядку 0,2 град / с. На рисунку 4.5 представлений зовнішній вигляд варіанту MEMC гіроскопа з кільцевих резонатором.

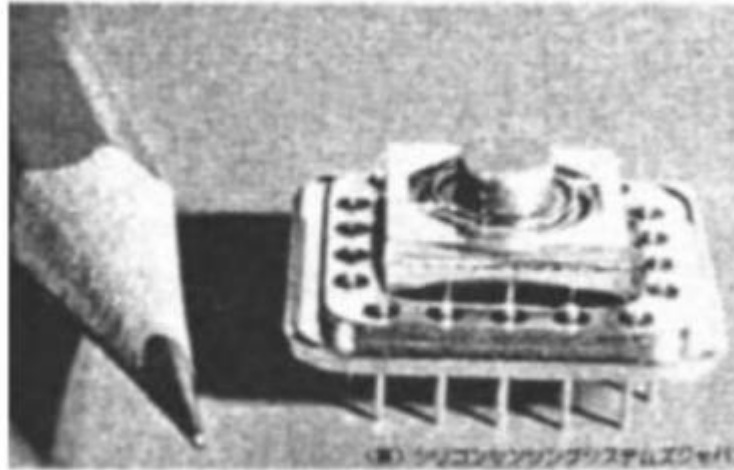


Рисунок 3.9 - Зовнішній вигляд MEMC гіроскопа з кільцевих резонатором

В іншому варіанті конструкції MEMC гіроскопа з кільцевих резонатором фірми BAE Systems застосовується електростатична система збудження і місткість система знімання сигналу. Такий варіант конструкції істотно спрощує виготовлення і збірку MEMC гіроскопів, забезпечує можливість балансування параметрів кільцевого резонатора за допомогою електростатичного приводу, зменшує масу і габарити, дозволяє позбутися від проблем, пов'язаних з нестабільністю його магнітних компонентів, підвищити його стійкість по відношенню до температурних і зовнішніх механічних впливів і знизити вартість MEMC гіроскопа.

3.2 MEMC акселерометр

Акселерометр - це пристрій, який вимірює проекцію удаваного прискорення, тобто різницю між істинним прискоренням об'єкта і

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

гравітаційним прискоренням. Рухома частина такої системи, працює на конденсаторному принципі є звичайний вантаж, який зміщується в залежності від нахилу приладу. В залежно від зсуву змінюється ємність конденсатора. Визначити прискорення можна знаючи зміщення вантажа.

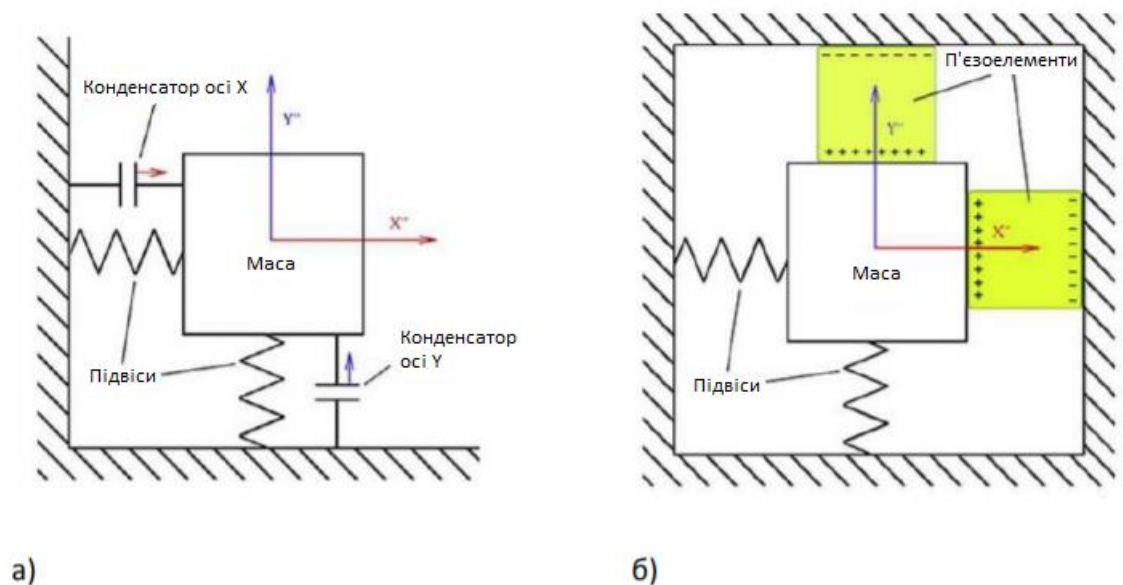


Рисунок 3.10 - Основний принцип роботи акселерометрів.

а) конденсаторних; б) на п'єзоелементах

У п'єзоелектричних системах є вантаж, який впливає на п'єзокристал і виробляє електричний струм. розрахувати прискорення можна знаючи параметри всієї системи.

Існує і ще один тип акселерометрів, який в корені відрізняється від конденсаторного і п'єзоелектричного. такі акселерометри називаються термальними. Їх архітектура передбачає використання бульбашки повітря. При прискоренні бульбашка відхиляється від свого початкового положення, і це фіксується датчиками. Знаючи, на скільки змістився бульбашка при русі, можна розрахувати величину прискорення.

У мікромеханічному виконанні реалізуються в основному три схеми акселерометрів з пружними повісами чутливого елемента як прямого, так і компенсаційного перетворення:

- MEMC акселерометр з поступальним переміщенням чутливого елемента;
- MEMC акселерометр з пружним підвісом маятникового типу;
- вібраційний MEMC акселерометр.

Як датчики переміщення чутливого елемента використовуються ємнісні, а також тензорезистивні і п'єзоелектричні датчики. Компенсація вимірюваних інерційних сил і моментів здійснюється за допомогою датчиків сили або моменту магнітоелектричного або електростатичного типів. Діапазон максимальних прискорень, вимірюваних за допомогою MEMC акселерометра може досягати величини порядку 105 g. На рис. 4.7 (а, б) показані митників MEMC акселерометри. Конструкція на рис. 4.7 (а) призначена для використання в спеціальних боєприпасах, зазнають дуже високі ударні навантаження, і дозволяє вимірювати прискорення до 105 g. MEMC акселерометр, конструкція якого представлена на рис. 4.7 (б), призначений для використання в системах орієнтації і навігації різноманітних рухливих об'єктів; похибка цього MEMC акселерометра становить $(10^{-4} - 10^{-3})$ g.

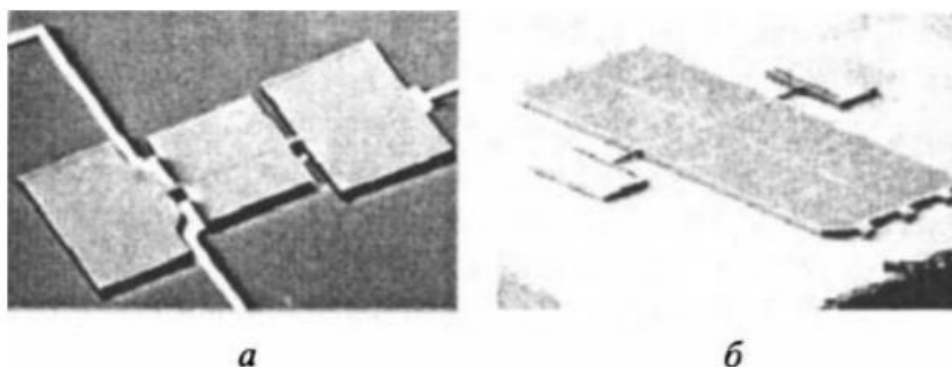


Рисунок 3.11 - MEMC акселерометр маякового типу

Великих успіхів в розробці ММА домоглася компанія Analog Devices, чий MEMC акселерометри стали практично першими масово випускаються інерційних MEMC-датчиками. В основі MEMC акселерометра – одне – або двокомпонентний пружний підвіс, поступально переміщується в площині підкладки чутливий елемент. В якості системи знімання застосовується ємнісний датчик, виконаний у вигляді гребінчастої структури. Подивись виготовлений методом поверхневої мікромеханічної обробки в полікремнію товщиною 2 мкм. В обсязі кристала кремнію і в поверхневих полікремнієвих шарах крім чутливого елемента розміщені підсилювачі сигналів з виходу первинного перетворювача інформації, аналогово-цифрові і цифро-аналогові перетворювачі, демодулятор, джерело опорного напруги, схеми самодіагностики і термостабілізації параметрів.

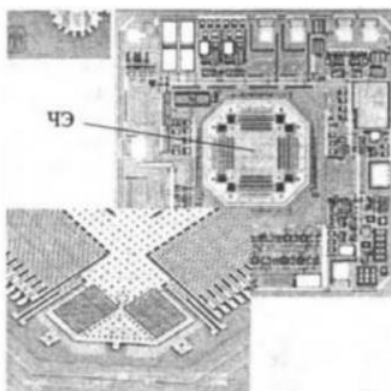


Рисунок 3.12 - MEMC акселерометр, розроблений компанією Analog Devices

3.3 Вибір датчиків

Як вже було сказано вище, для роботи даної системи знаходження дефекту рейок за допомогою системи позиціонування використовуємо систему MEMC датчиків, де необхідно використовувати два гіроскопа і один акселерометр. Також необхідно використовувати мікроконтролер для програмування і Wi-Fi для здійснення передачі сигналу на комп'ютер.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

LPR550AL Dual-Axis 1270 - двовісний гіроскоп зібраний на базі MEMS гіроскопів компанії ST і вимірює кутові переміщення навколо осей X і Y або X і Z. Два роздільних аналогових виходу за напругою для кожної осі надають два діапазони. Плата має стабілізатор 3.3 В, що забезпечує легку інтеграцію з 5 В частиною, двоступеневий НЧ фільтр для зниження шуму і має менші розміри, ніж аналогічні продукти інших виробників.

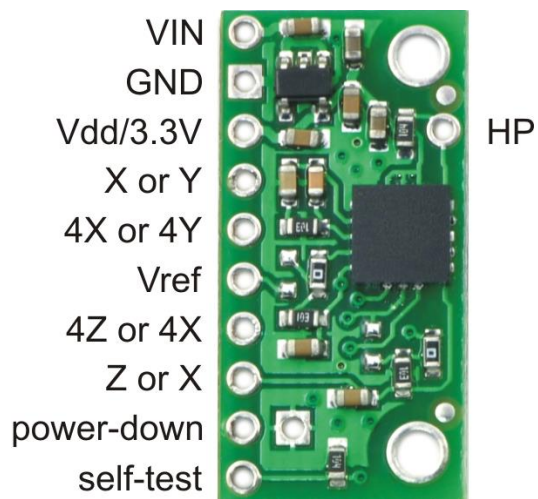


Рисунок 3.13 - Гіроскоп LPR550AL Dual-Axis 1270

Характеристики гіроскопа:

- осі XY;
- два аналогових виходу для кожної з осей;
- вбудований 3,3 регулятор напруги для підключення до 5 В шинам;
- діапазон виміру $\pm 500^\circ / \text{с}$ і $\pm 2000^\circ / \text{с}$;
- габарити 12x25 мм:
- напруга живлення від 2.7В до 3.6В;
- діапазон вимірювань $\pm 500\text{гр} / \text{с}$ для режиму з посиленням сигналу 4х і $\pm 2000\text{гр} / \text{с}$ для режиму без посилення;
- чутливість $2\text{mV} / ^\circ / \text{s}$;
- смуга пропускання 140Hz;
- струм споживання 6.8 mA.

Мікросхема MPU-6050 справляється з завданнями вирівнювання по осях, які можуть обробляти не всякі окремі чіпи. Алгоритми обробки по 9-осях MotionFusion можуть навіть приймати дані провідної шини I2C від зовнішніх магнітометрів або інших сенсорів що дозволяє обробляти всі типи даних, одержуваних з сенсорів без втручання головного процесора.

Точна обробка рухів на різній швидкості MPU-6050 виконується програмованим гіроскопом з широким набором швидкостей (± 250 , ± 500 , ± 1000 , and ± 2000 ° / секунду).

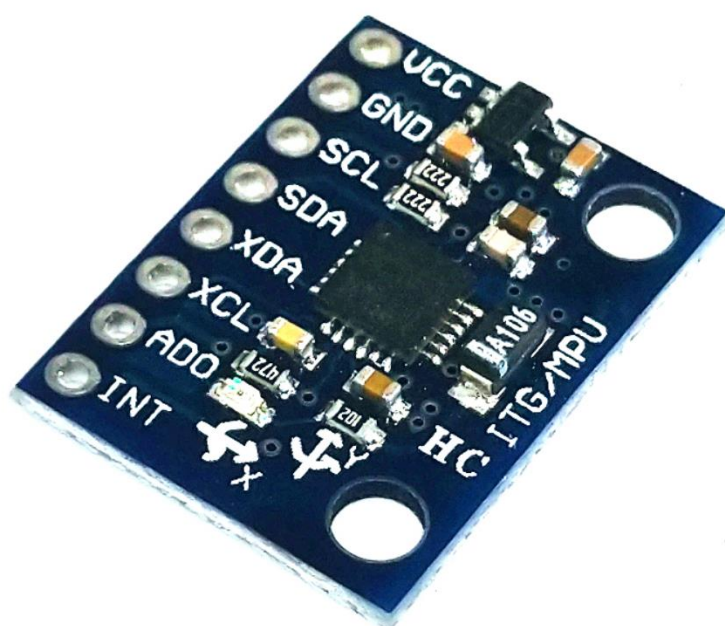


Рисунок 3.14 - Акселерометр MPU6050

Характеристики MPU6050:

- споживаний струм до 4 мА;
- внутрішній генератор на 8 МГц (поза модуля можливість підключити зовнішній кварцовий резонатор на 32,768 кГц або 19,2 МГц);
- напруги живлення 2,375 - 3,46 вольт;
- інтерфейс передачі даних - I2C;
- вхід для інших датчиків I²C;
- максимальна швидкість I²C - 400 кГц.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		60

Функції MPU6050:

- самоперевірка гіроскопа і акселерометра;
- Digital Motion Processor (DMP);
- регістри даних датчиків;
- master I²C для підключення до мікросхеми додаткового датчика;
- slave I²C для підключення до мікроконтролеру;
- вбудований FIFO;
- трьохосьовий MEMS гіроскоп з 16 бітовим АЦП;
- трьохосьовий MEMS акселерометр з 16 бітовим АЦП;
- регістр ідентифікації пристрою;
- переривання;
- температурний сенсор [17].

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		61

4. СХЕМА ПРИЛАДУ ТА ПРИЛАД РЕАЛІЗАЦІЇ

Розглянемо функціональну схему приладу:

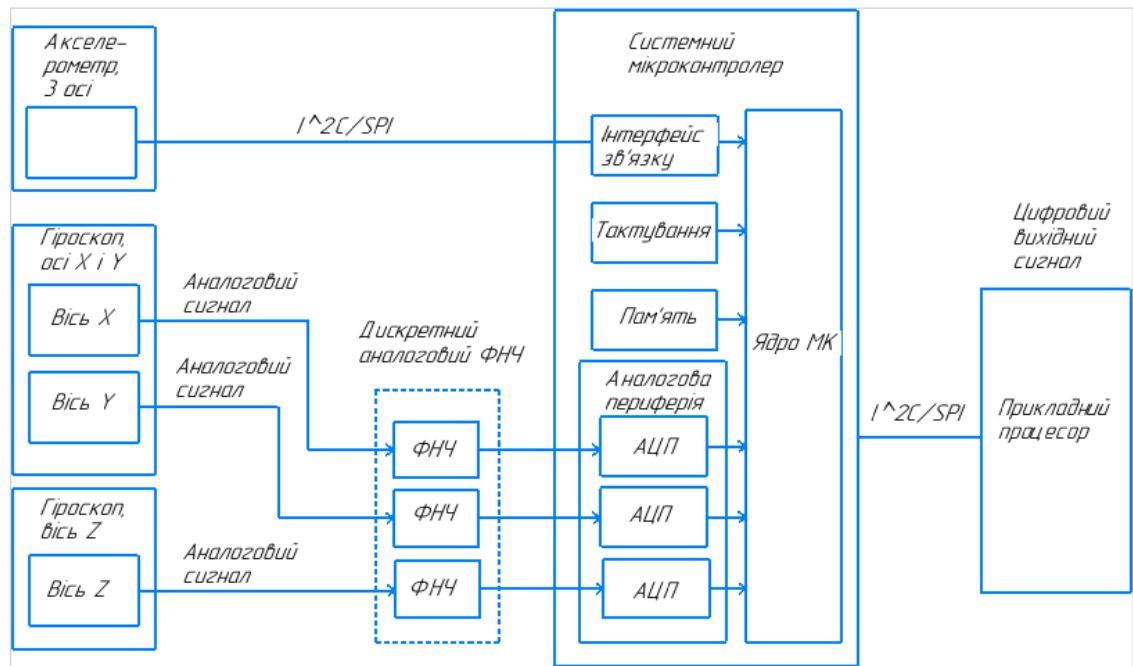


Рисунок 4.1. Функціональна схема

ФНЧ – фільтр нижніх частот;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

МК – мікроконтролер;

Функціональна схема складається з 3 акселерометрів, 3 гіроскопів та системного мікроконтролера де дані обробляються і за допомогою GSM технології передаються працівнику.

Акселерометр вимірює прискорення. Знаючи значення, і проінтегрувавши його, ми отримаємо швидкість нашого приладу, а за допомогою другого інтегралу отримаємо відстань від початкової точки до дефекту. Отримавши три значення з кожної осі ми зможемо проаналізувати де саме знаходиться дефект.

Гіроскоп допомагає більш детально з більшою точністю визначити де саме знаходиться дефект. За допомогою нього пристрій здатний реагувати на зміну кутів орієнтації тіла, на якому воно встановлено, щодо інерціальної

системи відліку і тим самим збільшує точність точки позиціонування. Тому для нашого приладу ми обрали саме 3 осьовий гіроскоп, щоб по відношенню до системи відліку більш детально знайти всі кути орієнтації.

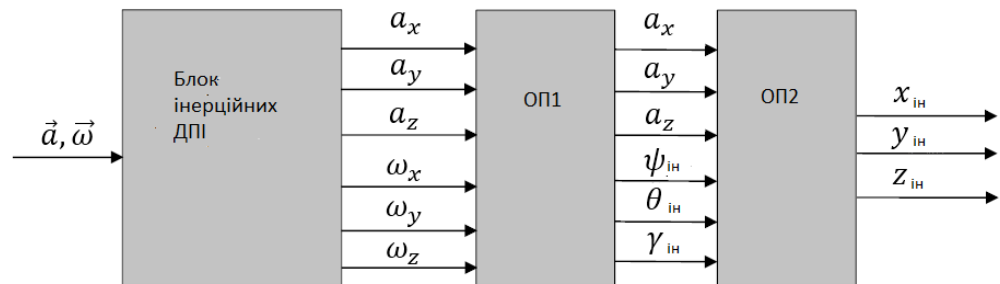


Рисунок 4.2. Структурна схема з'єднання системи позиціонування

ОП – обчислювальний пристрій;

a_x, a_y, a_z – визначення прискорення по осям X, Y, Z;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – кутові швидкості по осям X, Y, Z;

$\psi_{ін}, \theta_{ін}, \gamma_{ін}$ – визначення кутів Ейлера;

$x_{ін}, y_{ін}, z_{ін}$ – координати які передаються оператору

Представлено електричну схему з'єднання системи позиціонування:

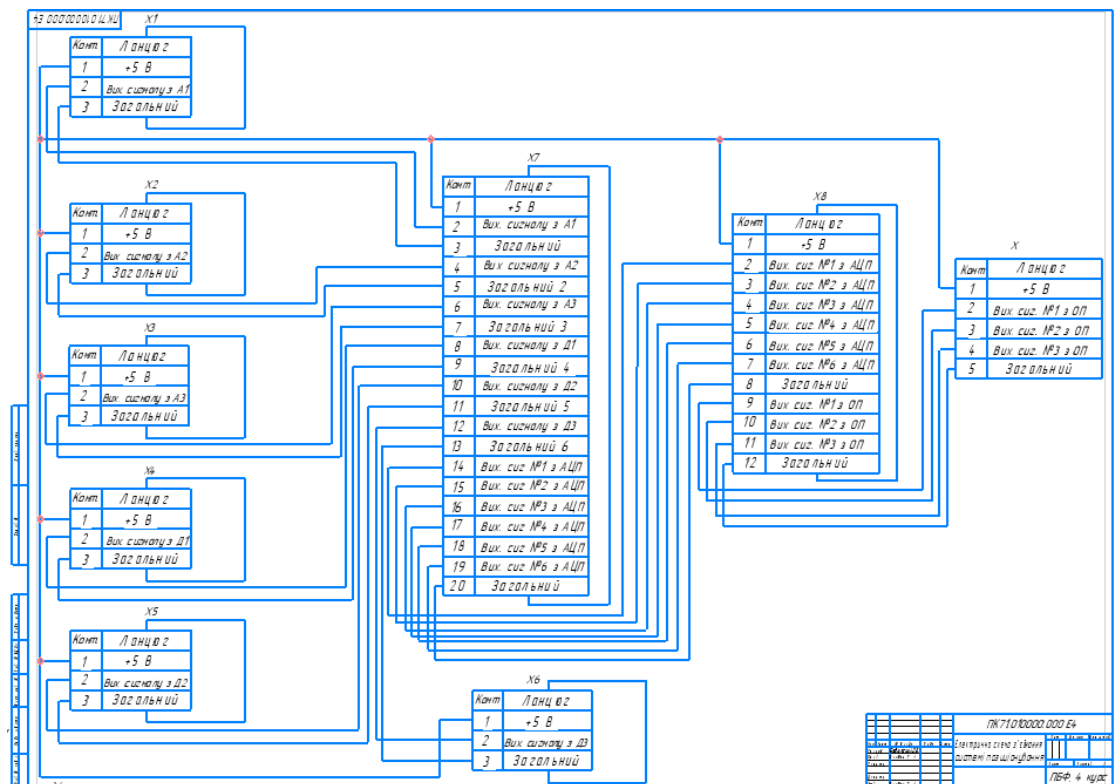


Рисунок 4.3. Електрична схема з'єднання системи позиціонування

Представлена електрична схема з'єднань персональної системи позиціонування, в якій визначені: 3 акселерометра (X1, X2, X3), 3 гіроскопа(датчика кутових швидкостей) (X4, X5, X6), аналогово-цифровий перетворювач (X7), обчислювальний пристрій (X8) і штепсельний роз'єм (X).

Штепсельний роз'єм має 5 контактів: 1-ий контакт забезпечує живлення приладу, з трьох контактів знімаються вихідні сигнали, пропорційні координатам X і Z щодо опорної системи координат і сигнал, пропорційний куту курсу.

Приклад реалізації

У ході виконання дипломної роботи було знайдено оптимальну реалізацію даного пристрою. Отже, даний прилад складається з таких складових:

- акселерометр, гіроскоп, термометр;

- мікроконтролера STM32;
- модуль LB-499-GSM;

В нашому розроблюваному проєкті ми використано наступний модуль GY-521 MPU-6050, який включає в себе акселерометр, гіроскоп та термометр. Даний модуль дозволяє визначати положення і переміщення приладу в просторі. При переміщенні даний модуль визначає лінійне прискорення та кутову швидкість по трьох осях. Даний модуль складається з мікросхеми MPU-6050. Ця мікросхема містить гіроскоп та акселерометр. Дані які формуються в мікросхемі, тобто в гіроскопі та акселерометрі передаються за допомогою послідовного інтерфейсу I2C в мікроконтролер. Даний модуль GY-521 MPU-6050 є аналогом людського вестибулярного апарату.

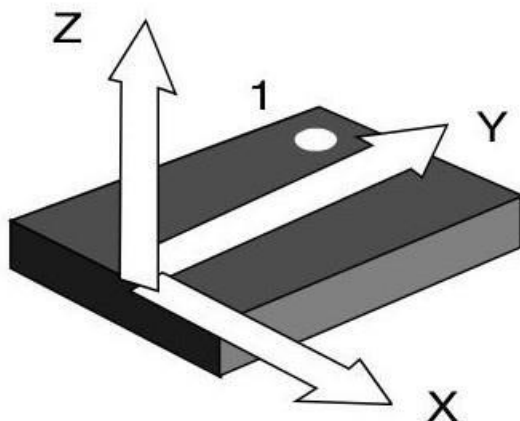


Рис. 4.4 Осі акселерометра

Даний 3-ох осьовий акселерометр здатний «відчувати» проекції прискорення на осі X, Y і Z. Наприклад, якщо в нас прилад не рухається і розміщений горизонтально, то проекції прискорення сили тяжіння на осі X і Y дорівнюватимуть 0. А вертикальною віссю Z сприймається сила тяжіння. Калібрування акселерометрів проводять час від часу в стані спокою. Ідеального руху тіла не існує, то тіло прискорюється, то сповільнюється, тому за допомогою акселерометра можна визначити не тільки положення об'єкта, а й визначити динамічні параметри при русі. Отже, акселерометр реєструє

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		65

гравітацію та суму прискорень під час руху. Якщо з осей акселерометра ми отримуємо дані близькі до нуля або ж нуль, то це свідчить про те що двигун вимкнутий.

3-ох осьовий гіроскоп – це датчик який дозволяє визначати кути повороту об'єкта по осям X, Y, Z за допомогою визначенню кутових швидкостей.

В даній роботі застосовували спільно акселерометр і гіроскоп, для правильної обробки параметрів руху та вірного розпізнавання динамічних параметрів. Гіроскоп відповідає за кут повороту і дає можливість правильно інтерпретувати дані акселерометра. Гіроскопа без акселерометра використовувати неможливо, бо це призведе до накопичення похибки.

В MPU-6050 передбачена можливість запису в пам'ять для точного відстеження рухів. Збережені дані можна зчитувати з регістрів зберігання або буфера FIFO розміром 1024 байт. Дана мікросхема на шині I2C може працювати майстром для контактів XDA і XCL. В MPU-6050 є АЦП 16 біт, також вона містить більше 100 регістрів.

На початку роботи проводимо калібрування за першими 10 даними для отримання постійних похибок від датчиків. Дану похибку віднімаємо і надалі не враховуємо до перетворення даних в кути.

Для обчислення орієнтації акселерометра, потрібно враховувати, що відбувається постійне гравітаційне тяжіння 1 g. Якщо немає інших сил, що діють на акселерометр, то виявлена величина прискорення буде 1 g. При діленні сирих даних гіроскопа на 131(коефіцієнт чутливості гіроскопа в заданому режимі 250 град / с) дає кутову швидкість в градусах в секунду. Знаючи що в акселерометрі АЦП 16 біт, то модуль максимального необробленого значення дорівнює 32767. Тобто $32767/250 = 131$ (умовних одиниць на градус в секунду). Отже, при отриманому необробленому значенні 131, кутова швидкість дорівнює 1 градус в секунду. Отримавши всі дані, можемо отримати положення нашого об'єкта. Для цього миттєве значення кутової швидкості помножимо на проміжок часу між опитуваними датчика

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

гіроскопа. Наприклад, розширення 2000 градусів в секунду, час між опитуваннями 0,1 с, значення миттєвої швидкості 210, значить $210 * 0,1 = 21$ - за цей час стався поворот на 21 градус. Далі кожне отримане значення потрібно скласти з попереднім.

З інформації вище, ми вже зрозуміли, що акселерометр і гіроскоп схильні до систематичних похибок. В гіроскопі при інтеграції даних відбувається дрейф, за те забезпечує отримання точних даних про зміну орієнтації за короткий проміжок часу. А от акселерометр за короткий проміжок видає сильний шум, тому для отримання більш точних і коректних даних знімаємо дані тільки на довгостроковій перспективі. Тому для знищення взаємної помилки, акселерометр і гіроскоп використовуються разом.

Наступний модуль який був використаний при реалізації пристрою є STM32.

STM32 - це платформа, в основі якої лежать мікроконтролери STMicroelectronics на базі ARM процесора, різні модулі та периферія, а також програмні рішення (IDE) для роботи з залізом. Рішення на базі stm активно використовуються завдяки продуктивності мікроконтролера, його вдалою архітектурі, малому енергоспоживанні, невеликій ціні. В даний час STM32 складається вже з декількох лінійок для самих різних призначень.

Спочатку вони випускалися в 14 варіантах, які були розділені на 2 групи - з тактовою частотою до 2 МГц і з частотою до 36 МГц. Програмне забезпечення у обох груп однаково, як і розташування контактів. Перші виробники випускалися з вбудованою флеш-пам'яттю 128 Кбайт і ОЗУ 20 Кбайт. Зараз лінійка істотно розширилася, з'явилися нові представники з підвищеними значеннями ОЗУ і Flash пам'яті.

Основні переваги:

- низька вартість;
- зручність використання;
- великий вибір середовищ розробки;

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		67

- чіпи взаємозамінні - якщо не вистачає ресурсів одного мікроконтролера, його можна замінити на більш потужної, не змінюючи самої схеми і плати;
- висока продуктивність;
- зручна налагодження мікроконтролера.

Недоліки:

- високий поріг входження;
- на даний момент не так багато літератури по STM32;
- більшість створених бібліотек вже застаріли, простіше створювати свої власні.

Для передачі даних отриманих даних до робітника застосовується GSM зв'язок, який реалізований в модулю LB-499-GSM.

Модуль радіопередачі даних GSM / GPRS (LB-499-GSM) дозволяє здійснювати віддалену передачу даних в програму LBX через стільникову мережу GSM / GPRS.

GSM-модеми реєструються в мережі оператора GSM зв'язку, що підтримує послугу пакетної передачі даних GPRS. За допомогою цієї послуги кожен модем отримує доступ в мережу Інтернет.

При доставці даних по GPRS поверх TCP / IP протоколів використовується додатковий протокол з шифруванням і підтвердженням про доставку, завдяки чому виключаються втрати і дублювання даних не тільки протягом активного сеансу GPRS з'єднання, а й при розриві / відновленні GPRS з'єднання.

Система дозволяє реалізовувати бездротові мережі зі структурою «зірка»: в «центрі» системи розташовується «база», на «променях» - вилучені модеми. База «чує» (приймає дані) всі вилучені модеми, кожен з віддалених модемів «чує» тільки базу.

Можливі два типи пакетної передачі даних по GPRS:

- Системи з віртуальним COM портом в якості бази, дозволяє використовувати систему для здійснення обміну даними між декількома

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		68

віддаленими модемами (до 255 штук) і прикладним програмним забезпеченням на диспетчерському комп'ютері.

- Системи з модемом в якості бази, використовується, коли в центрі системи використовується обладнання з послідовним портом RS-232. Модеми між собою встановлюють TCP / IP з'єднання. Сервер має або заздалегідь відомий і постійний IP-адреса (статичний), або динамічний IP-адресу. Сервер у вигляді модему, підтримує роботу тільки з 8 модемами-клієнтами.

В обох випадках система забезпечує прозорий двобічний канал обміну даними між базою і віддаленими модемами. Прозорість в даному випадку означає, що прикладне ПО або устаткування як би спілкується безпосередньо з віддаленим обладнанням, як якщо б це устаткування було підключене безпосередньо до послідовного порту базового комп'ютера або обладнання. Іншими словами, технологія передачі даних повністю прихована від прикладного ПО (або обладнання) і віддаленого обладнання.

GSM-маршрутизатор RIO-GSM дозволяє будувати системи віддаленого збору даних на обладнанні, розрахованому на провідні послідовний інтерфейси зв'язку без модифікації самого обладнання і без змін прикладного ПО [32].

ВИСНОВОК

Основною метою даної дипломної роботи є моделювання засобу для позиціонування рухомих об'єктів в просторі.

В першій частині технології локального позиціонування було приведено різні технології які використовуються в нас час та обрану саме ту яка є доцільною в використанні для нашої дипломної роботи. Було проаналізовано переваги та недоліки кожної технології.

В другій частині було продемонстровано методи локального позиціонування, які методи існують як вони працюють і зроблено висновок щодо доцільності використання декількох методів а не один.

В третьому розділі описано MEMS датчики та короткі відомості про них, математичну частину даних датчиків, знаходження кутів Ейлера, характеристики, а також вибір датчиків до даної дипломної роботи.

В четвертому розділі приведено функціональну та принципову електричну схему, опис цієї схеми, а також алгоритм знаходження координат нашого дефекту.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Магістерська дисертація [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу:
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/25539/1/Remeniuk_magistr.pdf
2. Магістерська дисертація [Електронний ресурс]. – 2018. – Режим доступу до ресурсу:
https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/23038/3/Sokolenko_magistr.pdf
3. GPS [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
[https://uk.wikipedia.org/wiki/GPS#:~:text=GPS%2C%20%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%CC%81%D0%BC%D0%B0%20%D0%B3%D0%BB%D0%BE%D0%B1%D0%B0%CC%81%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D1%86%D1%96%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20\(%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%B,%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BD%D1%96%20%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D1%96%20%D0%B0%D0%B1%D0%BE%20%D0%B2%20%D0%B0%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D1%96](https://uk.wikipedia.org/wiki/GPS#:~:text=GPS%2C%20%D0%A1%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%CC%81%D0%BC%D0%B0%20%D0%B3%D0%BB%D0%BE%D0%B1%D0%B0%CC%81%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BF%D0%BE%D0%B7%D0%B8%D1%86%D1%96%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F%20(%D0%B0%D0%BD%D0%B3%D0%B,%D0%BF%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BD%D1%96%20%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D1%96%20%D0%B0%D0%B1%D0%BE%20%D0%B2%20%D0%B0%D1%82%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%84%D0%B5%D1%80%D1%96)
4. И. Л. Рева, А. А. Богданов, Е. А. Малахова «Применение точек доступа Wi-Fi для регистрации движения на объекте» 2017.
5. Технологии позиционирования в реальном времени [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу:
<http://www.rtlsnet.ru/technology/view/4>
6. Овчинников С. Технологии локального позиционирования / Сергей Овчинников. // Технологии и средства связи. – 2014. – №3. – С. 26–30
7. Технологии локального позиционирования. Часть I [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу до ресурсу:
<https://habr.com/company/rtl-service/blog/281837/>

8. Технологии локального позиционирования. Часть II [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/company/rtl-service/blog/282357/>
9. Методы локального позиционирования [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/company/rtl-service/blog/301706/>
10. Технології електромагнітного неруйнівного контролю. Лабораторний практикум / Ю. В. Куц, Ю. Ю. Лисенко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 63 с. – Назва з екрана.
11. RFID [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/RFID#%D0%9F%D0%BE_%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%87%D0%B5%D0%B9_%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B5
12. Супутникова навігація [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: https://xn--j1ahb.xn--j1amh/articles/GPS_GLONASS_AGPS_RTK/
13. WiMAX [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
14. Радиолокационные методы локального позиционирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29656138#:~:text=%D0%98%D1%81%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%B7%D1%83%D0%B5%D0%BC%D1%8B%D0%B5%20%D0%BC%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%3A%20%D0%BD%D0%B0%20%D0%BE%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B5%20RSSi%2FTDoA%2FToF.,%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%BE%20%D0%B8%D0%BB%D0%B8%20%D0%BD%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D0%BA%D0%BE%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%BD%D0%B8%D0%BC%D0%B0%D1%8E%D1%89%D0%B8%D1>

[%85%20%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B9%D1%81%D1%82%D0%B2.&text=%D0%94%D0%BB%D1%8F%20%D0%B8%D0%B7%D0%BC%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D1%80%D0%B0%D1%81%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%8F%D0%BD%D0%B8%D0%B5%20%D0%BC%D0%B5%D0%B6%D0%B4%D1%83%20%D0%BF%D1%80%D0%B8%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%BC,%D0%B4%D0%BE%D0%BB%D0%B6%D0%BD%D0%BE%20%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B2%D1%8B%D1%88%D0%B0%D1%82%D1%8C%20%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%BD%D1%83%20%D0%B4%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D1%83%20%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B](#)

15. SDS-TWR Измерение расстояния без рулетки и синхронизации [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://habr.com/ru/post/154445/>
16. RSSI [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.gsmsota.com.ua/blog/stati/parametry-kachestva-signalu-lte-4g/>
17. МЭМС датчики системы позиционирования пространственного положения человека [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/40721/1/TPU411667.pdf>
18. Выбор и использование датчиков движения на основе МЭМС [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://russianelectronics.ru/vybor-i-ispolzovanie-datchikov-dvizheniya-na-osnove-mems/>
19. GSM [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <https://lanmarket.ua/entsiklopediya/besprovodnye-tehnologii/gsm.html>
20. Галаган Р.М. Теоретичні основи ультразвукового неруйнівного контролю [Электронный ресурс] / Р. М. Галаган. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 264с. Режим доступу:

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		73

<https://ela.kpi.ua/handle/123456789/27002> – (дата звернення: 04.03.2021). – Назва з екрану.

21. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 512 с
22. Лурье А.И. Аналитическая механика – М.: Физматгиз, 1961. – 824 с.
23. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – 280 с.
24. Savage P.G. Strapdown Analytics – Part I, Strapdown Associates, Inc., 2000.
25. Холопов И.С., Штрунова Е.С. Программный имитатор сигналов трехосного MEMS гироскопа с цифровым выходом // Труды РНТОРЭС им. А.С.Попова. Серия: «Цифровая обработка сигналов и её применение». Выпуск XIV. Т. 1. – М., 2012. – С. 237- 238.
26. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 551 с.
27. Kalman R.E. A new approach to linear filtering and prediction problems // Journal of Basic Eng., Trans. ASME, Ser. D, Vol. 82, No 1. 1960. – P. 35-45.
28. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации: пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1993. – 319 с.
29. Оценивание дальности и скорости в радиолокационных системах. Ч. 2 / под. ред. В.И. Меркулова. – М.: Радиотехника, 2007. – 304 с.
30. Кошелев В.И., Галкин В.И., Белокуров В.А. и др. Улучшение характеристик микромеханических датчиков угловых скоростей // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды РНТОРЭС им. А.С. Попова. № XII-1. – М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 59-61.
31. Di Li, René Jr. Landry, Philippe Lavoie. Lowcost MEMS Sensor-based Attitude Determination System by Integration of Magnetometers and GPS: A Real-Data Test and Performance Evaluation // IEEE ION Plans 2008, Monterey, CA, USA, 2008. – P. 1190-1198.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		74

32. Модуль LB-499-GSM [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:

http://www.microl.ua/index.php?page=shop.product_details&flypage=garден_flypage.tpl&product_id=260&category_id=113&option=com_virtuemart&Itemid=71

33. Безконтактна система визначення координат вимірювального перетворювача дефектоскопа / С.М. Маєвський, К.М. Сєрий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. — 2012. — № 4. — С. 20-23.

					ПК71.010000.000 ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпис	Дата		