

Михайло Мельник¹, Роман Винарович², Юрій Гасюк³, Михайло Шварц⁴

¹ Кафедра Систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”
вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: Mykhaylo.R.Melnyk@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8593-8799

² Кафедра Систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”,
Львів, Україна, E-mail: roman.i.vynarovich@lpnu.ua, ORCID 0009-0000-3462-977X

³ Кафедра Систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”
вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: yurii.l.hasiuk@lpnu.ua

⁴ Кафедра Систем автоматизованого проектування, Національний університет “Львівська політехніка”
вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, E-mail: mykhailo.y.shvarts@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-5567-442X

УДОСКОНАЛЕННЯ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПРИБРОЮ ДЕФЕКТΟΣКОПІ ПІДЗЕМНИХ ТРУБ

Отримано: березень 05, 2024 / Переглянуто: березень 28, 2024 / Прийнято: квітень 01, 2024

© Мельник М., Винарович Р., Гасюк Ю., Шварц М., 2024

<https://doi.org/>

Анотація. У цій статті розглядається проблема шуму та дрейфу мікроелектромеханічних гіроскопів та їх вплив на точність вимірювань в інженерних застосуваннях. Запропоновано використання комплементарного фільтру для поєднання інформації з акселерометра та гіроскопа з метою зменшення неточностей. Дослідження показують, що акселерометр має кращу повторюваність результатів, що важливо для отримання стабільних вимірювань. У той же час, гіроскоп може бути більш ефективним у вимірюванні поступальних рухів. Важливим аспектом є добір чутливості датчиків, а також правильна настройка параметрів. Розроблена система, яка здатна ефективно фільтрувати та вимірювати кут об'єкта, а використання комплементарного фільтру дає змогу покращити точність вимірювань. Запропонований підхід може бути успішно використаний для точного виявлення кута положення вимірювальної установки при дефектоскопії підземних трубопроводів.

Ключові слова: MEMS, акселерометр, гіроскоп, кут, комплементарний фільтр, калібрування, LabView.

Вступ

Сучасне виробництво неможливе без автоматизованих систем управління, серед яких особливе місце займають малорозмірні системи, що базуються на мікроелектромеханічних системах (MEMS). Сучасний технологічний прогрес в області мікроелектромеханічних систем (MEMS) дозволяє впроваджувати датчі руху, такі як акселерометри та гіроскопи, у різноманітні сфери людської діяльності. Використання цих датчиків не лише дозволяє вимірювати рухи об'єктів, а й відтворювати їхні просторові орієнтації та положення в просторі. На сьогоднішній день існує велика різноманітність мікроелектромеханічних систем, таких як різні датчі фізичних величин (тиск, кутова швидкість, прискорення тощо), які використовуються для автоматизації технологічних систем, роботизованих систем, транспортних механізмів та інших систем, які діють у виробництві та економіці. Мікроелектромеханічні гіроскопи та акселерометри, що входять до складу таких систем, використовуються переважно в гіротахометрах, інерційних навігаційних системах та системах орієнтування, становлячи ключову частину автоматизованих систем управління.

Для дефектоскопії труб, особливо тих, що розташовані під землею, є критично важлива висока точність і надійність обладнання для визначення орієнтації труби під землею. Зазвичай, для визначення орієнтації використовували гіроскопи, проте їхні недоліки можуть призвести до неточних результатів або повної їх втрати. Наприклад, при отриманих неточних даних з гіроскопа

може виникнути ризик інциденту через неправильно визначений кут повороту труби. Отже, пропонується розробити інноваційний підхід, який буде надійно працювати в умовах недоступності сигналу GPS, забезпечуючи точні та достовірні вимірювання кутів повороту у трубах під землею. Одним із способів вирішення цієї проблеми є одночасне використання акселерометра та гіроскопа і опрацювання даних через компліментарний фільтр. Однак, у MEMS гіроскопа є один значний недолік – дрейф нуля. Суть цього недоліку полягає в тому, що при зупинці обертання гіроскопа, він все ще буде показувати значення відмінне від нуля. Ще одна проблема виражається в поступовому накопиченні помилки обчислення. Тобто накопичувальна похибка. Акселерометр може використовуватися для визначення орієнтації труби в разі відсутності чи виходу із ладу гіроскопа. Він здатен вимірювати силу тяжіння та інші прискорення, які виникають у процесі руху пристрою всередині труби. У разі, якщо гіроскоп виявиться недоступним або несправним, акселерометр може забезпечити базові дані про рух та орієнтацію труби, що дозволить продовжити процес дефектоскопії без значного втручання та втрати точності. Такий підхід забезпечує більшу надійність та стабільність у проведенні досліджень під землею. Якщо використовувати акселерометр, то для визначення кута нахилу досить застосувати прості геометричні перетворення до його показань. Саме тому у роботі пропонується провести дослідження акселерометру та гіроскопу із використанням компліментарного фільтра на лабораторній установці для дослідження придатності їх використання при дефектоскопії труб.

Огляд джерел інформації за тематикою публікації

На сьогоднішній день існує багато методів обробки шуму сигналу гіроскопу, які можна приблизно розподілити на дві категорії: одна з них – це методи компенсації на основі моделі, тобто моделювання випадкового шуму гіроскопа та його компенсація згідно з моделлю, наприклад, метод фільтра Калмана, статистичне фільтрування і т.д.; інша – це прямі методи фільтрування, які безпосередньо фільтрують вихідний сигнал гіроскопа, наприклад, фільтрування нижньої частоти, вейвлет-фільтрування, адаптивне фільтрування та інше.

У [1], на основі часової моделі даних про дрейф нуля гіроскопа, автор використовує алгоритм Калмана для обробки даних дрейфу. Результати моделювання показують, що метод може фільтрувати статичний сигнал гіроскопа, але ефект фільтрування динамічного сигналу є незадовільним. Ще одна робота [2] пропонує аналітичний метод оцінки дисперсії шуму вимірювання в фільтрі Калмана та його застосування в реальному часі; експерименти показують, що цей метод може здійснити більш точне оцінювання дисперсії шуму вимірювання та покращити точність фільтра Калмана; однак він не здатний оцінити дрейф давача. У літературі [3] Лумінг Лі поєднує фільтрацію Калмана з нейронними мережами для оцінки дисперсії шуму вимірювання фільтра Калмана через нейронні мережі, тим самим вирішуючи проблему неточного вибору дисперсії шуму вимірювання. Експерименти показують, що цей алгоритм краще підганяє випадковий шум гіроскопа. Однак, оскільки цей метод також базується на моделюванні часових рядів, ефект фільтрування на динамічних сигналах є незадовільним. У літературі [4] фільтр Калмана використовується для об'єднання двох сигналів датчика MEMS-гіроскопа та акселерометра для приглушення випадкового шуму гіроскопа, при цьому оцінюється дрейф акселерометра.

Для оцінки дрейфу сигналів гіроскопа в [5] використовуються шість акселерометрів, розташованих симетрично на обертовій вісі БПЛА, для розрахунку кутової швидкості. Алгоритм фільтра Калмана використовується для об'єднання кутової швидкості вихідного гіроскопа з кутовою швидкістю, розрахованою акселерометром, для оцінки постійного дрейфу гіроскопа. Результати моделювання показують, що метод може ефективно компенсувати постійний дрейф гіроскопа та має певну практичну цінність. Однак цей метод має лише певний ефект у моделюванні і не був перевірений в експерименті.

Хоча вищезазначені дослідження досягли певних результатів у фільтрації та оцінці дрейфу сигналу гіроскопа, фільтрація та оцінка дрейфу шуму гіроскопа часто не можуть бути отримані

одночасно. Хоча деякі вчені також використовують гіроскопи та лінійні акселерометри для досягнення фільтрації сигналу гіроскопа та оцінки його дрейфу, вони ігнорують існування дрейфу лінійного акселерометра, що робить результати менш точними. На основі підсумків поточних досліджень у цій статті використовується Комплементарний фільтр, який поєднує сигнал гіроскопа та сигнал акселерометра для обробки сигналу гіроскопа, тим самим покращуючи точність оцінки кута.

Виклад основного матеріалу

Інерційні давачі: використання та проблеми.

Гіроскоп та акселерометр широко використовуються для вимірювання кутового нахилу вздовж вісі. Обидва вони визнані в останні роки, особливо в телекомунікаційних системах через їх переваги над високо-вартісними інерційними системами, мініатюрним розміром, низьким споживанням енергії та часто мають на меті вимірювати кут [6]. Зокрема, гіроскопи та акселерометри дуже корисні в застосуваннях до безпілотних літальних апаратів, дефектоскопії труб, автомобілів та мобільних роботів [7,8,9].

Гіроскоп – це давач кутової швидкості, який використовується для вимірювання обертальної швидкості об'єкта, інформація з якого подається у вигляді кутової швидкості [10,11]. Сигнал кутової швидкості повинен бути інтегрований відносно часу для отримання читабельного кута. Процес інтегрування кутової швидкості з часом створює дрейфи. Ці проблеми виникають через інтегрування відносно часу, коли показник не повертається до значення нуля.

Акселерометри призначені для вимірювання сил прискорення, де його можна визначити за допомогою вимірювання напряду сили тяжіння. Акселерометр має хорошу точність на низьких частотах, і дослідження показують, що акселерометр може виявляти як статичне, так і динамічне прискорення в будь-який момент часу. Однак він має недоліки, де головним чином впливає вібраційний стрес, оскільки акселерометр дуже чутливий до вібрацій внаслідок руху. Вібрація призведе до спотворення сигналу акселерометра та спричинить похибку у вимірах.

Типова практика отримання кута полягає в подвійному інтегруванні вимірюваного кутового прискорення. Однак [12] вказує на те, що подвійне інтегрування викликає дрейф. Джерела [13,14] запропонували запобіжний метод додавання фільтра Калмана до процедури інтеграції, який ефективніше зменшує дрейф.

У відміню від [13,14], [15] стверджує, що математичний алгоритм фільтра Калмана є занадто складним, має довгий час обчислення і складно програмується на певних 8-бітних мікроконтролерах. Крім того, оцінку кута фактично можна здійснити за допомогою меншої кількості давачів та набагато простіших алгоритмів.

Отже, враховуючи аналіз останніх досліджень, для досягнення кращої точності визначення кута запропоновано використання акселерометра та комплементарного фільтра. Перевагою цього підходу є досить простий алгоритм та здатність виправляти дрейф гіроскопу, а також вимірювання кута за допомогою акселерометра при виході з ладу гіроскопа для продовження роботи системи навіть у непередбачених обставинах.

Комплементарний фільтр

Як відомо з попереднього розділу, комплементарний фільтр – це спрощена версія моделі фільтра Калмана, що використовується для об'єднання інформації з різних давачів або вимірювальних пристроїв з метою отримання більш точної оцінки стану системи або параметрів, які ми досліджуємо. Ідея фільтра полягає в тому, щоб використовувати різні види давачів, які мають різні характеристики чи діапазони роботи, та об'єднати їх відповідним чином, щоб скоригувати недоліки кожного давача. Комплементарний фільтр, застосований до гіроскопа та акселерометра, дозволяє визначити орієнтацію або кут нахилу об'єкта в просторі. Оцінка кутів отримується як сума вимірів, отриманих з гіроскопа та акселерометра, як показано на Рис. 1.

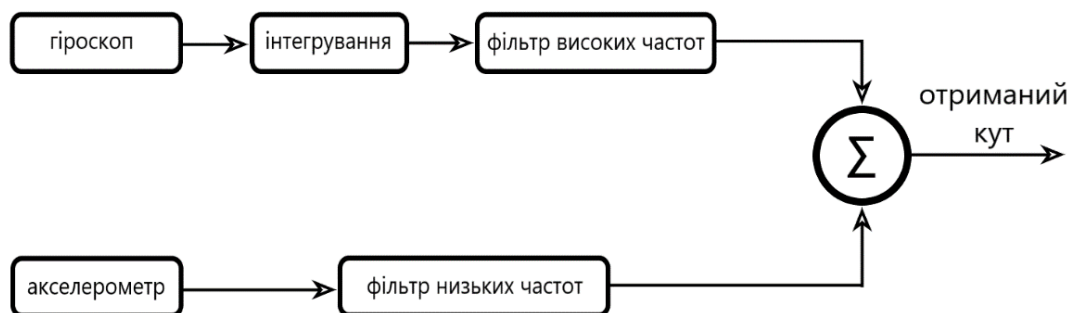


Рис. 1. Схематичне зображення комплементарного фільтра

Комплементарний фільтр об'єднує виміри гіроскопа та акселерометра таким чином, щоб він використовував гіроскоп для короткочасних оцінок кута (які добре працюють, коли об'єкт не рухається) та акселерометр для довготривалих оцінок (які корисні при русі, коли дрейф гіроскопа може бути помітним). Це досягається за допомогою поєднання вихідних сигналів давачів з використанням відповідних коефіцієнтів. Наприклад, гіроскоп може бути більш важливим для виміру кутів під час руху, тому йому може бути надано більший коефіцієнт, а акселерометру – менший. Таким чином, комплементарний фільтр забезпечує точність та стійкість визначення кутів нахилу в різних умовах руху.

Загальна формула для комплементарного фільтра, що об'єднує виміри гіроскопа та може бути виражена наступним чином:

$$\text{кут} = k * (\text{кут}_{\text{попередній}} + (\text{кутова}_{\text{швидкість}} * \Delta t)) + ((1 - k) * \text{кут}_{\text{аксе}}), \quad (1)$$

де, кут – кут, отриманий за допомогою комплементарного фільтра; k – коефіцієнт, який зазвичай знаходиться в межах від 0 до 1. Чим більше значення k , тим більший вплив вихідного сигналу гіроскопа на результуючий кут, і навпаки; $\text{кут}_{\text{попередній}}$ – поточне значення кута; Δt – інтервал часу між вимірами гіроскопа; $\text{кут}_{\text{аксе}}$ – кут, отриманий за допомогою акселерометра;

Такий підхід дозволяє забезпечити точність та стабільність виміру кутів нахилу в різних умовах експлуатації. У наступному розділі розглянемо математичні моделі акселерометра та гіроскопа, які лежать в основі цього методу.

Математичні моделі акселерометра та гіроскопа

Модель акселерометра. Акселерометр вимірює силу, що діє на об'єкт, включаючи гравітаційну силу, а також будь-які інші акселераційні сили. За допомогою вектору гравітації можна визначити кут орієнтації об'єкта відносно вертикальної осі, наприклад, відносно горизонтальної площини. Це може бути зроблено, використовуючи тригонометричні функції, такі як арктангент, для обчислення кутів між гравітаційним вектором і векторами, які визначають площини (наприклад, xy , xz або yz площини).

Модель акселерометра зображена у вигляді:

$$\text{кут} = \arctan\left(\frac{g_x}{g_y}\right), \quad (2)$$

де кут – кут орієнтації відносно осі Ox , g_x – компонента гравітаційного вектора вздовж осі Ox , g_y – компонента гравітаційного вектора вздовж осі Oy

Модель гіроскопа. МЕМС гіроскоп надає значення кутової швидкості обертання відносно своїх осей. Ці значення можуть бути виміряні у градусах за секунду або радіанах за секунду.

$$\text{кут} = (\text{кут}_{\text{попередній}} + (\text{кутова}_{\text{швидкість}} * \Delta t)), \quad (3)$$

де кут – поточний кут повороту; $\text{кут}_{\text{попередній}}$ – поточне значення кута; Δt – інтервал часу між вимірами гіроскопа.

Апаратна частина. Для досліджень вибрано аналоговий повнофункціональний тьохосевий акселерометр з низьким споживанням ADXL335 [16]. Вихідним сигналом пристрою є напруга.

Удосконалення навігаційної системи пристрою дефектоскопії підземних труб

Мінімальний діапазон повної шкали виміру прискорення складає ± 3 g. Пристрій здатен вимірювати статичне прискорення, що викликане гравітацією, в задачах визначення відхилення, а також динамічне прискорення викликане рухом, ударами чи вібрацією.

Також використано двовісний гіроскоп від компанії SparkFun LPY503AL, який дає змогу вимірювати кутову швидкість уздовж осей x та y [17]. Для збору даних з датчиків використано вимірювальну карту USB-1208LS, яка містить 4 диференціальних або 8 несиметричних аналогових входів (в залежності від налаштувань) та 2 аналогові виходи. Всі аналогові входи можуть працювати з частотою дискретизації 1,2-50кГц. Також наявні 16 цифрових входів/виходів, один 32-розрядний вхідний канал.

Конструкція вимірювального пристрою

На Рис. 2 та Рис. 3 представлено фото лабораторної установки для дослідження роботи акселерометра та гіроскопа. Дані датчики закріплені на обертовому механізмі штативу та живляться з допомогою двох батарейок типу AAA, або модуля живлення YwRobot MB-V2. Макет включає в себе також вимірювальну карту USB-1208LS яка підключається до комп'ютера з допомогою USB-кабеля. За допомогою ручки повороту ми можемо обертати акселерометр та гіроскоп і досліджувати точність показів датчиків.

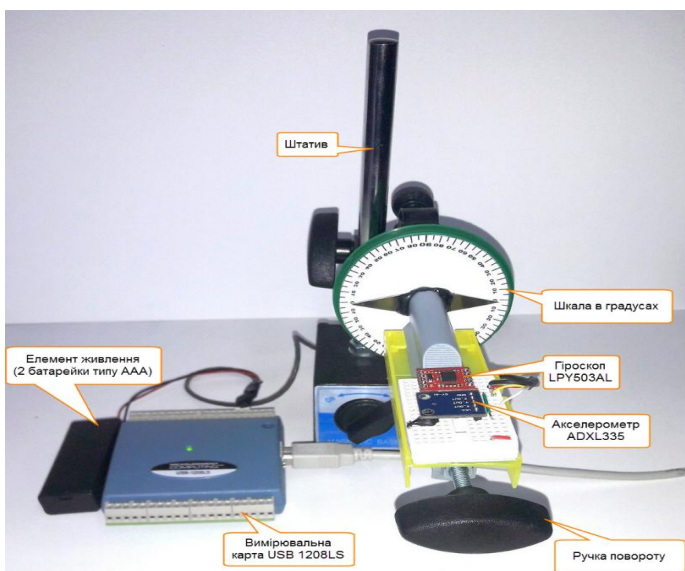


Рис. 2. Фото вимірювального стенду (вигляд спереду)

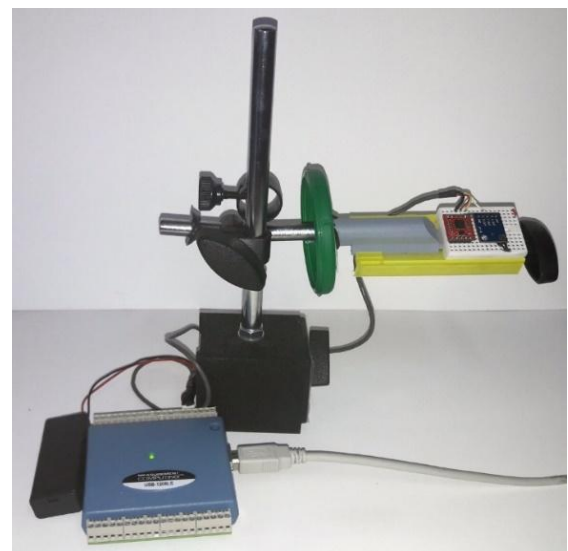


Рис. 3. Фото вимірювального стенду (вигляд збоку)

Програмне забезпечення. Для зручного аналізу розроблене програмне забезпечення у системі LabVIEW [18]. На Рис. 4 наведено знімок вікна Front Panel, на якому зображено розміщення елементів інтерфейсу програми.

Інтерфейс розробленого програмного забезпечення складається з 5 основних частин, до яких належить:

- 1) Панель керування параметрами Акселерометра
- 2) Панель керування параметрами Гіроскопа
- 3) Панель налаштування комплементарного фільтра
- 4) Панель налаштування діаграми та, власне, сама діаграма
- 5) Панель відображення орієнтації

Блок-схема логіки програми. Як відомо з попередніх розділів, блок-схема відображає логіку програми. Як видно з Рис. 5, робота програми складається з основних етапів, до яких належать:

- Отримання вимірів з вимірювальної плати;
- Інтерпретація отриманих вимірів;
- Опрацювання та фільтрація даних;
- Вивід та візуалізація.

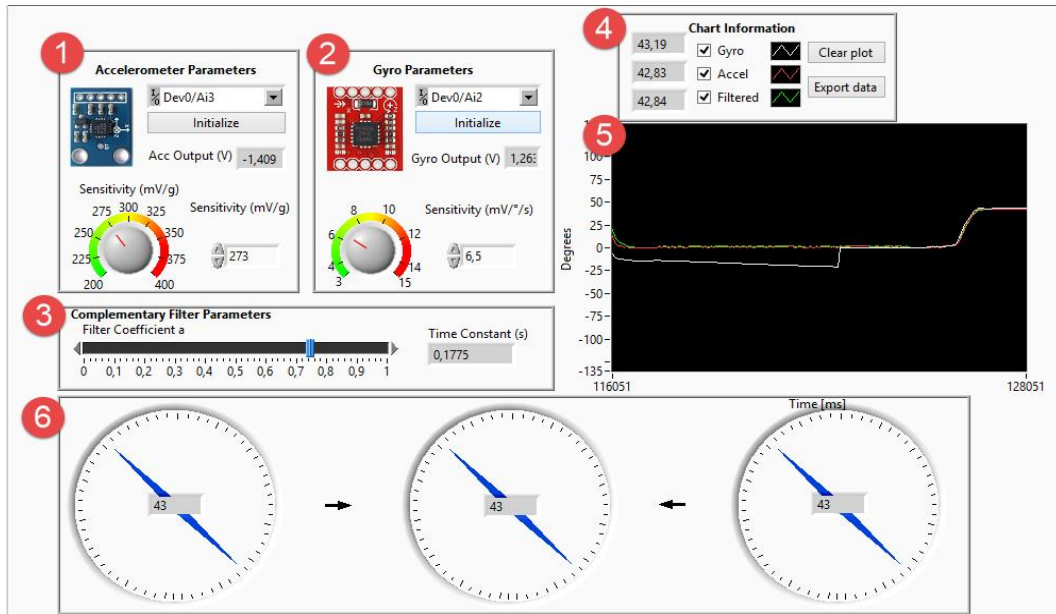


Рис. 4. Знімок фронтальної панелі у вікні Front Panel

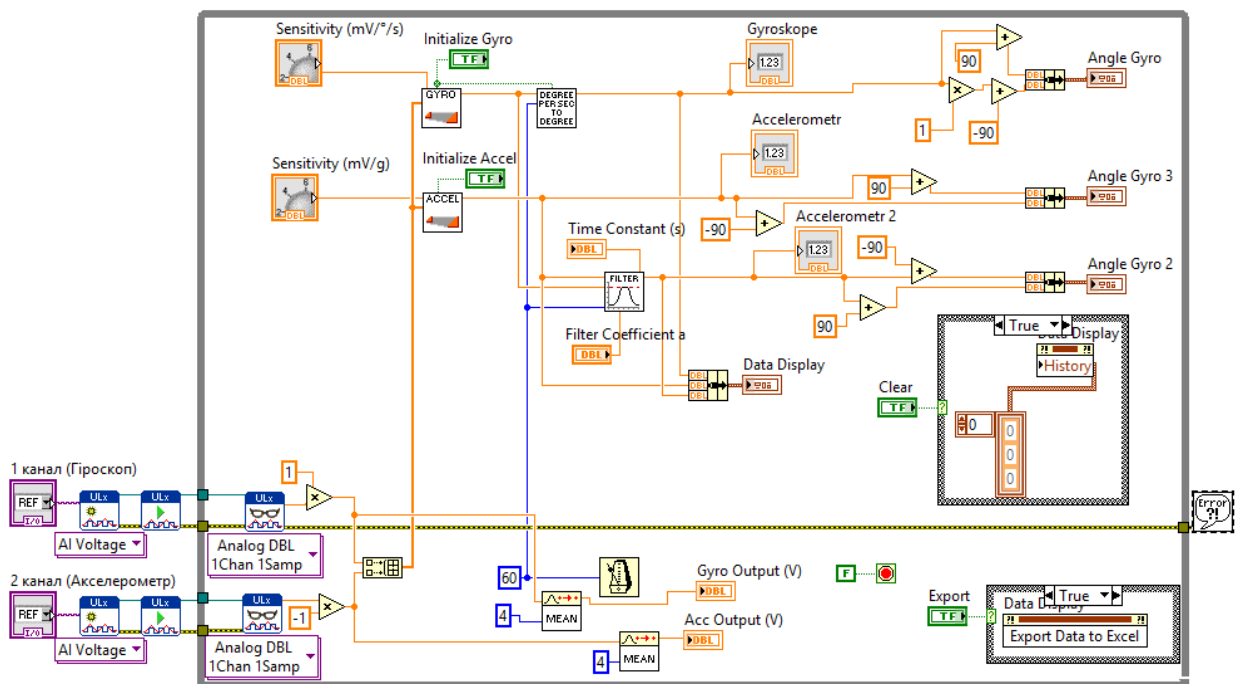


Рис. 5. Знімок блок-схеми у вікні Block Diagram

Це програмне забезпечення дозволяє зручно керувати та аналізувати дані з акселерометра та гіроскопа, що забезпечує точність та надійність проведених досліджень, результати яких ми розглянемо у наступному розділі.

Результати та обговорення

Як бачимо з Рис. 6, при правильно підбраній чутливості датчиків і плавному повороті, що видно із графіку, і акселерометр і гіроскоп показують точні дані кута повороту – по 43 градуси.

Удосконалення навігаційної системи пристрою дефектоскопії підземних труб

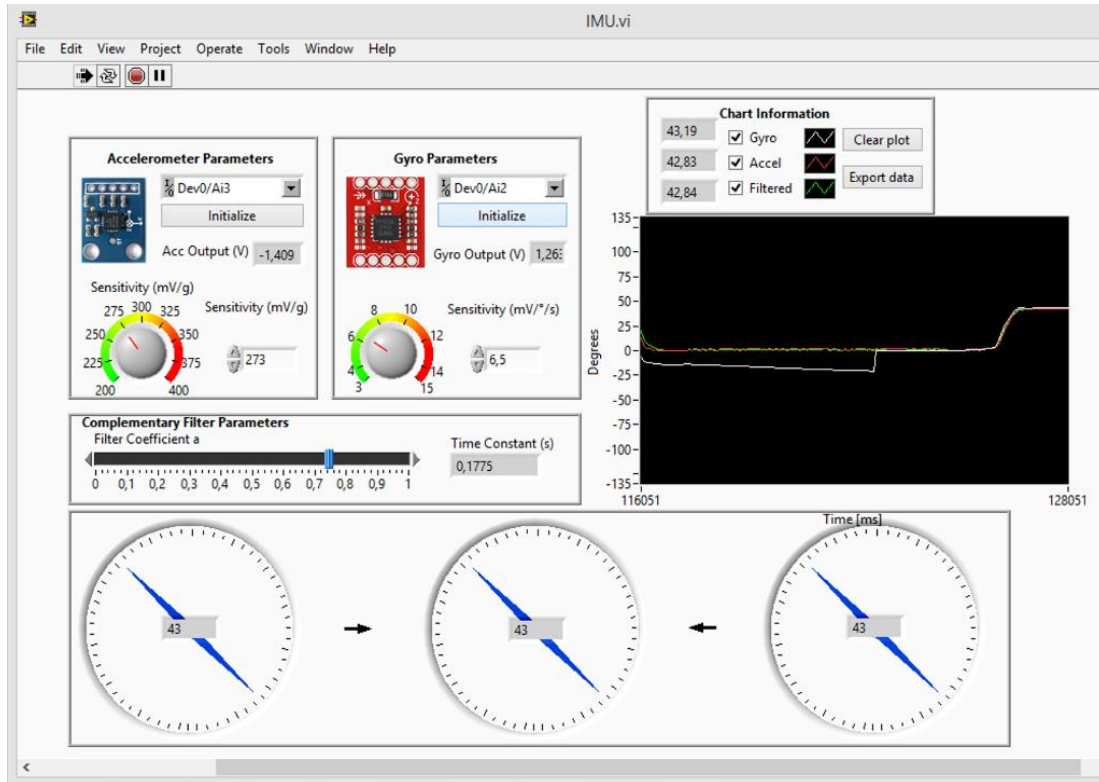


Рис. 6. Результати при плавному повороті датчиків

При різкій зміні кута, що видно із графіку Рис. 7, вже при першій ітерації отримуємо різницю у 1 градус.

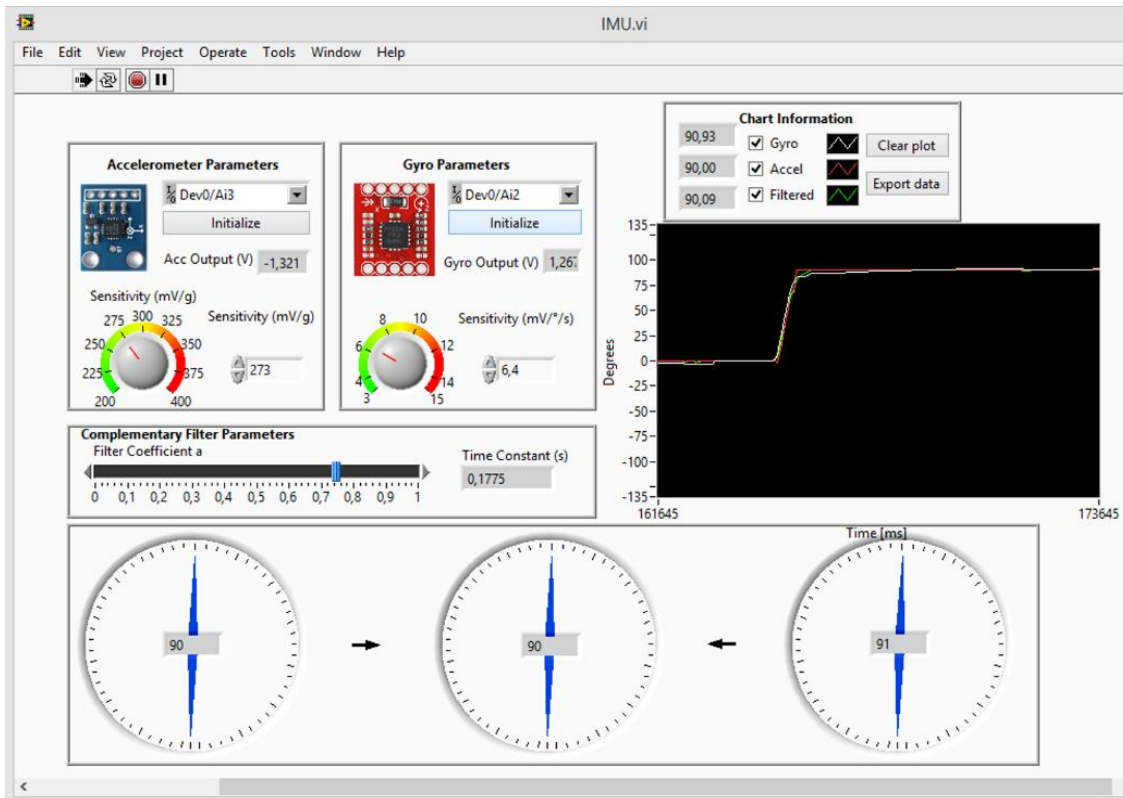


Рис. 7. Результати при різкій зміні кута положення датчиків

Натомість як бачимо з Рис. 8, після трьох ітерацій різкого повороту на 90 градусів а потім на 0 та знову 90 акселерометр знову показує 90 градусів, натомість гіроскоп показує 112 градусів. Така похибка може бути викликана тим, що акселерометр краще реагує на різкі рухи, натомість гіроскоп має кращу точність, коли відбувається повільна зміна кута повороту.

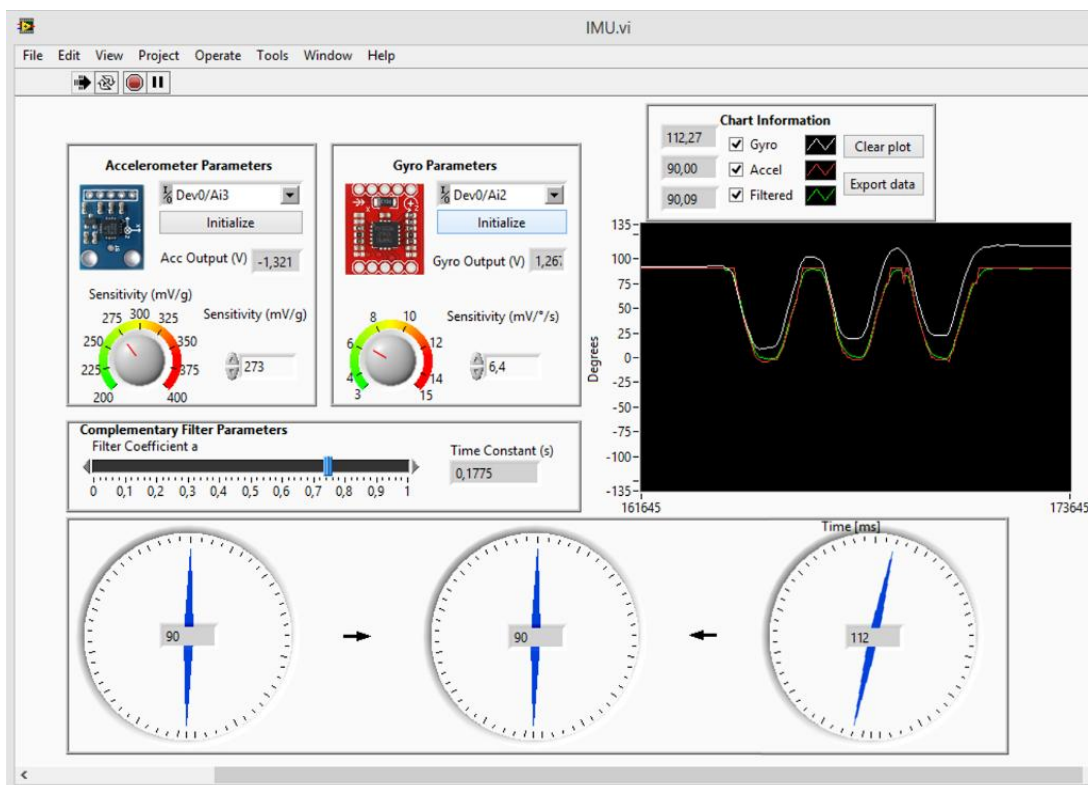


Рис. 8. Результати після трьох ітерацій різкого повороту

Висновки

У зв'язку із значним шумом та дрейфом мікроелектромеханічних гіроскопів у інженерних застосуваннях, для їх зменшення запропоновано використання комплементарного фільтру для об'єднання інформації з акселерометра та гіроскопа. Дослідження показали, що акселерометр має кращу повторюваність результатів, що означає, що вимірювані значення прискорення з акселерометра менше змінюються при однакових умовах вимірювання. Це важливо для отримання стабільних та надійних вимірів.

Натомість, гіроскоп може мати меншу повторюваність результатів, що може вказувати на більшу чутливість до зовнішніх факторів або недоліки в його конструкції. Це може вплинути на точність вимірювань і вимагати додаткової обробки даних для компенсації неточностей.

Гіроскоп має кращу точність при плавній зміні кута повороту. Це означає, що гіроскоп може бути більш ефективним у вимірюванні поступальних рухів, особливо якщо ці рухи відбуваються плавно та без різких змін швидкості або напрямку.

З іншого боку, акселерометр може мати деякі обмеження при вимірюванні поступальних рухів у зв'язку зі своєю конструкцією та принципом роботи. Наприклад, він може бути більш чутливим до змін прискорення, що викликає зміни вимірюваних значень.

Також важливим аспектом при роботі з акселерометром та гіроскопом є добір чутливості. Невірний параметр чутливості значно впливає на результати досліджень і призводить до

спотворених або неточних даних. Щоб отримати найкращі результати, необхідно правильно налаштувати чутливість датчиків.

На основі експериментальних та аналітичних результатів можна встановити, що розроблена система здатна послідовно фільтрувати та вимірювати бажаний рівень кута від 0 до 100 градусів. Експериментальні результати також свідчать про те, що дрейф гіроскопа може бути фільтрований без жодних труднощів за допомогою використання комплементарного фільтра.

Отже, комплементарний фільтр дає змогу покращити точність і послідовність визначення реального кута об'єкта за допомогою MEMS гіроскопа та акселерометра. В результаті розробка комплементарного фільтра, використаного для оцінки кута, може бути застосована для послідовного та точного виявлення кута при дефектоскопії підземних трубопроводів.

Перелік використаних джерел

- [1] Zhang, Z.Y.; Fan, D.P.; Li, K.; Zhang, W.B. Study on the filtering method of micro-electromechanical gyro zero drift data. *J. Chin. Inert. Technol.* 2006, 4, 67–69.
- [2] Park, S.; Gil, M.S.; Im, H.; Moon, Y.S. Measurement Noise Recommendation for Efficient Kalman Filtering over a Large Amount of Sensor Data. *Sensors* 2019, 19, 1168. <https://doi.org/10.3390/s19051168>
- [3] Li, L.M.; Zhao, L.Y.; Tang, X.H.; He, W.; Li, F.R. Gyro Error Compensation Algorithm Based on Improved Kalman Filter. *J. Transduct. Technol.* 2018, 31, 538–544, 550.
- [4] Zhou, X.Y. Research on Target Positioning Error Analysis and Correction of Photoelectric Detection System. Ph.D. Thesis, National University of Defense Technology, Changsha, China, 2011.
- [5] Li, Q.G.; Zhang, H.L.; Hao, J.R. Research on Gyroscope Drift Compensation Algorithm Based on Six Accelerometers. *Sens. Microsyst.* 2009, 28, 42–44.
- [6] Yu Liu, Song Liu, Changwen Wang and Le Wang, “A New Northseeking Method Based on MEMS Gyroscope,” *International Frequency Sensor Association J. Sensors & Transducers*, vol. 178, September 2014, pp. 14-19.
- [7] A. S. Samosir and N. S. Widodo, “Gyroscope and Accelerometer Sensor on the Lanange Jagad Dance Robot Balance System Sensor Gyroscope dan Accelerometer pada Sistem Keseimbangan Robot Seni Tari Lanange Jagad,” *Bul. Ilm. Sarj. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 51–58, 2020, <https://doi.org/10.12928/biste.v2i2.922>
- [8] H. Chao, C. Coopmans, D. Long, and Y.Q. Chen, “A Comparative Evaluation of Low-Cost IMUs for Unmanned Autonomous Systems,” *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, September 2010, pp. 211-216. <https://doi.org/10.1109/MFI.2010.5604460>
- [9] L. Lasmadi, “Attitude Estimation for Quadrotor Based on IMU with Kalman-Filter,” *Conf. Senat. STT Adisutjipto Yogyakarta*, vol. 4, no. 0, pp. 351–358, Nov. 2018, <https://doi.org/10.28989/senatik.v4i0.267>
- [10] M. Riyadi et al., “Pendeteksi Posisi Menggunakan Sensor Accelerometer MMA7260Q,” *Semarang, Tek. Elektro Univ. Diponegoro*, vol. 12, no. 2, pp. 76–81, 2010, <https://doi.org/10.1093/geront/gns022>
- [11] S. A. Quadri and O. Sidek, “Error and Noise Analysis in an IMU using Kalman Filter,” *Int. J. Hybrid Inf. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 39–48, 2014, <https://doi.org/10.14257/ijhit.2014.7.3.06>
- [12] J.W. Chia, M.S.C. Tissera, K.S. Low, S.T. Goh and Y.T. Xing, “A low Complexity Kalman filter for Improving MEMS based Gyroscope Performance,” *March 2016* <https://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500795>
- [13] G. Yanning, H. Fei, D. Shaohe, M. Guangfu and Z. Liangkuan “Performance Analysis of MEMS Gyro and Improvement using Kalman Filter,” *IEEE 34th Chinese Control Conference*, July 2015, pp. 1934- 1768. <https://doi.org/10.1109/ChiCC.2015.7260380>
- [14] M.T. Leccadito, “An Attitude Heading Reference System using a Low Cost Inertial Measurement Unit,” M.S. thesis, Dept. Elect. and Computer Eng., Virginia Commonwealth University, Richmond, Virginia, August 2013.
- [15] B. McCarron, “Low-Cost IMU Implementation via Sensor Fusion Algorithms in the Arduino Environment,” Bachelor of Science, Department of the Aerospace Engineering, Polytechnic State University, San Luis Obispo, California, June 2013.
- [16] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl335.pdf>
- [17] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/IMU/lpy503al.pdf>
- [18] <https://www.ni.com/en/shop/labview.html>

Михайло Мельник, Роман Винарович, Юрій Гасюк, Михайло Шварц

Mykhaylo Melnyk¹, Roman Vynarovich², Yurii Hasiuk³, Mykhaylo Shvarts⁴

¹ Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University
S. Bandery st., 12, Lviv, Ukraine, E-mail: Mykhaylo.R.Melnyk@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-8593-8799

² Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University
S. Bandery st., 12, Lviv, Ukraine, E-mail: roman.i.vynarovich@lpnu.ua, ORCID 0009-0000-3462-977X

³ Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University
S. Bandery st., 12, Lviv, Ukraine, E-mail: yurii.l.hasiuk@lpnu.ua, ORCID 0009-0005-9981-0170

⁴ Computer Aided Design Department, Lviv Polytechnic National University
S. Bandery st., 12, Lviv, Ukraine, E-mail: mykhailo.y.shvarts@lpnu.ua, ORCID 0000-0002-5567-442X

IMPROVING THE NAVIGATION SYSTEM OF UNDERGROUND PIPE DEFECT DETECTION DEVICE

Received: March 05, 2024 / Revised: March 28, 2024 / Accepted: April 01, 2024

© Melnyk M., Vynarovich R., Hasiuk Y., Shvarts M., 2024

Abstract: This article addresses the issue of noise and drift in microelectromechanical gyroscopes and their impact on measurement accuracy in engineering applications. The use of a complementary filter is proposed to combine information from the accelerometer and gyroscope to reduce inaccuracies. Research shows that the accelerometer has better result repeatability, which is important for obtaining stable measurements. At the same time, the gyroscope may be more effective in measuring translational movements. The selection of sensor sensitivities and proper parameter tuning are crucial aspects. A developed system is capable of effectively filtering and measuring the angle of an object, and the use of a complementary filter improves measurement accuracy. The proposed approach can be successfully utilized for accurately detecting the angle of position of a measurement setup in defect inspection of underground pipelines.

Keywords: MEMS, accelerometer, gyroscope, angle, complementary filter, calibration, LabView.