

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.27>

УДК 681.586

Голосування більшістю для відмовостійкості масиву мікроелектромеханічних систем

Музиченко Адріан Олександрович

Аспірант кафедри Спеціалізованих комп'ютерних систем

ORCID: 0009-0004-6548-6037; adrian.o.muzychenko@lpnu.ua

Національний університет "Львівська політехніка", вул. Степана Бандери, 12. Львів, Україна

АНОТАЦІЯ

У роботі представлено практичний метод підвищення відмовостійкості масивів мікроелектромеханічних інерціальних вимірювальних блоків, що поєднує прості локальні тести правдоподібності з робастними груповими критеріями (медіана) та прийняттям рішень за правилом більшості. На відміну від підходів, які покладаються на розширений фільтр Калмана на нижньому рівні, запропонований алгоритм працює без розширеного фільтру Калмана, застосовуючи гістерезис і кінцевий автомат станів для детермінованого відключення/повернення сенсорних каналів. Підсумкова оцінка формується робастними агрегаторами (медіана або усичене середнє), що знижує чутливість як до поодиноких викидів, так і до тривалих відмов. Постановка оцінювалася виключно в програмних симуляторах методом Монте-Карло: розглядалися різні профілі руху, шумові моделі гіроскопів і акселерометрів, ін'єкції відмов (ступінчасті зсуви нуля, дрейфи, помилки масштабу, «залипання», імпульсні викиди, пропуски кадрів), а також сценарії міжканальної кореляції шумів. Метрики якості охоплюють ймовірність виявлення та хибної тривоги, затримку детекції, відновлюваність після повернення каналу, стабільність оцінок і обчислювальні витрати. Результати демонструють високу ймовірність виявлення одиничних відмов за низького рівня хибних спрацювань і контрольовану затримку детекції в невеликих масивах ($N=3-7$). Робастні агрегатори забезпечують кращу стійкість до змішаних режимів похибок і кореляції між каналами порівняно зі звичайним середнім, а вбудований гістерезис запобігає «миготінню» рішень поблизу порогів. Обчислювальна складність алгоритму є лінійною за кількістю сенсорів на такт дискретизації, що робить його придатним для реалізації на вбудованих платформах реального часу. Обмеження стосуються систематичних похибок і мультивідмов із високою кореляцією, які знижують інформативність правила більшості. Подальша робота передбачає адаптацію порогів за поточними оцінками шуму, підтримку одночасних відмов кількох каналів, інтеграцію з легкими комплементарними фільтрами та експериментальну валідацію на поворотному столі й за польотними даними БПЛА.

Ключові слова: мікроелектромеханічні системи; відмовостійкість; голосування більшістю; виявлення та ізоляція відмов; робастна статистика; медіана; фільтр Хампеля

Актуальність. Сучасні тенденції розвитку авіаційних і космічних технологій, а також автономних наземних і морських платформ вимагають підвищеної відмовостійкості та точності навігаційних систем. Використання мікроелектромеханічних інерціальних датчиків стало стандартом завдяки їхній компактності та низькій вартості, однак окремі сенсори залишаються чутливими до відмов і деградацій характеристик. У цьому контексті формування масивів мікроелектромеханічних сенсорів (далі – MEMS) з подальшою обробкою даних за правилом більшості та із застосуванням робастних статистичних методів відкриває шлях до підвищення живучості вимірювань без значного збільшення обчислювальних витрат. Особливу актуальність набувають легкі алгоритми відмовостійкості, здатні працювати в реальному часі на обмежених обчислювальних ресурсах вбудованих платформ. Водночас питання кореляції між каналами, а також адаптивності порогів для виявлення відмов залишаються відкритими й потребують додаткових досліджень, що визначає практичну та наукову цінність проведеної роботи.

Метою дослідження є розроблення практичного методу підвищення відмовостійкості MEMS блоків, що поєднує тести правдоподібності з робастними груповими критеріями (медіана) та прийняттям рішень за правилом більшості. На відміну від підходів, які покладаються на розширений фільтр Калмана на нижньому рівні, запропонований алгоритм працює без розширеного фільтру Калмана, застосовуючи гістерезис і кінцевий автомат станів для детермінованого відключення/повернення сенсорних каналів. Голосування більшістю в масивах MEMS розглядається як практичний спосіб підвищення відмовостійкості та метрологічної надійності вимірювань у бортових інерційно-навігаційних системах літальних апаратів. Ідея виростає з класичної N -кратної надлишковості з

мажоритарним виборцем: кілька номінально однакових каналів одночасно вимірюють ту саму фізичну величину, а вихідна оцінка формується за правилом більшості або його узагальненнями. Для трьох каналів така схема збігається з відомою трьох модульною надлишковістю, яка історично довела істотне підвищення надійності за рахунок маскування одиничних відмов і зменшення ймовірності помилкового рішення виборця за умови незалежності відмов та коректної організації мажоритарної логіки. Саме ця логіка, починаючи від праці Лайонса і Вандеркалка, стала канонічним прототипом для конструкцій, де помилка одного модуля не впливає на вірність колективного рішення, якщо двоє інших узгоджені. У навігаційній сенсориці вона природно переноситься на масиви акселерометрів і гіроскопів, де кожен елемент масиву підлягає однаковим алгоритмам калібрування та корекції похибок, а агрегування оцінок забезпечує як фільтрацію випадкового шуму, так і структурне придушення грубих відмов.

Інерційні сенсорні масиви на базі MEMS можуть забезпечити стаке підвищення точності й живучості вимірювань за рахунок надмірності каналів і робастної обробки. Практичний шлях до відмовостійкості полягає у застосуванні правила більшості разом із простими тестами узгодженості між каналами, що працюють детерміновано в реальному часі, не покладаючись на повноцінні стан-просторові моделі. Класична концепція потрібної модульної надмірності показує, що голосування «два з трьох» суттєво зменшує ймовірність катастрофічної помилки за одиничного збою [1]; перенесення цієї логіки на сенсорні масиви дозволяє приймати підсумкові оцінки з підвищеною стійкістю, якщо одночасно застосовуються робастні агрегатори та механізми виявлення/ізоляції відмов (FDI), про ефективність яких для конфігурацій із кількома IMU неодноразово повідомлялося в літературі [2–3]. В нашій роботі вся оцінка виконувалася в програмних симуляторах без залучення апаратних стендів або польотних випробувань: це дозволило систематично варіювати профілі руху, інтенсивність шумів і типи відмов, а також відтворювати рідкісні події з контрольованою статистикою.

Узагальнення правила більшості для N-входових систем породило цілу сім'ю виборців - від «точного» і «неточного» мажоритарного до медіанного, зваженого середнього, порогового та адаптивного. Класична теорія голосуючих мереж і узагальнених виборців описує компроміс між здатністю маскувати відмови і чутливістю до узгоджених систематичних зсувів, надаючи формальні критерії коректності для різних припущень про статистику відмов і кореляції помилок. Ці результати зручні для конструювання сенсорних масивів у критичних задачах керування польотом, де потрібні алгоритмічні гарантії при обмежених ресурсах обчислень на борту. Зокрема, праці з теорії узагальнених виборців і ефективних n-входових алгоритмів голосування систематизують правила формування виходу для «точного» голосування, де всі справні канали повинні збігатися, і для «неточного», де допускаються обмежені розбіжності показів через шум і дрейф.

Базова архітектура розрахована на масив із трьох до семи однотипних IMU. Для кожного кадру вимірювання формується локальний вектор індикаторів правдоподібності, що включає прості тести: обмеження діапазону, швидкості зміни та варіативності у ковзному вікні. Паралельно обчислюється груповий індикатор узгодженості на основі медіани та median absolute deviation (MAD), які слабко чутливі до поодиноких викидів і добре працюють у важкохвостих розподілах [4]. Канали, що порушують адаптивні пороги, позначаються як кандидати на ізоляцію; для уникнення «миготіння» застосовується гістерезис і автомат станів із затримками на відключення/повернення. Підсумкова оцінка сигналу формується з множини «здорових» каналів робастним агрегатором (медіана або усічене середнє), що забезпечує низьку чутливість до одиничних аномалій при майже незмінній ефективності у спокійних режимах. Така схема навмисно мінімізує кількість формул у реалізації та не потребує повного EKF на нижньому рівні [5].

Останні дослідження конфігурацій із кількома MEMS показують, що під час відмов або деградацій окремих каналів коректність інтегральної оцінки визначається не стільки геометрією розміщення триад, скільки здатністю алгоритму вчасно виявляти та ізолювати

аномалії. Для цього ефективно застосовують тестування у просторі паритетів і контролі на основі статистики відстані Махаланобіса, що узгоджується з логікою низькоскладнісних мажоритарних виборців як базового механізму відсікання одиничних відмов. У ролі робастних масштабних оцінок, придатних для групових тестів узгодженості, доцільно використовувати медіану та MAD, оскільки вони приглушують вплив важких хвостів і одиничних викидів порівняно зі стандартним відхиленням. Таким чином, правило більшості, підсилене медіаною статистикою, формує практичний компроміс між надійністю та обчислювальною простотою у реальному часі, а також добре масштабуються для масивів із 3-7 каналів. Це підґрунтя дозволяє прямо порівнювати вашу безфільтрову схему з більш важкими EKF-підходами до злиття даних у масивах IMU, підкреслюючи переваги детермінованих таймінгів і прозорої логіки прийняття рішень.[6]

Симуляційне середовище включає генератор істинної кінематики (кути Ейлера, кутові швидкості, лінійні прискорення) з параметризованими профілями маневрів: спокійні ділянки, гармонійні коливання, ступінчасті переходи та квазістохастичні траєкторії. Моделі сенсорів описувалися адитивними й мультиплікативними похибками: білий шум, нестабільність нуля у вигляді AR(1), повільний дрейф, масштабна помилка та міжосьові перекося. Для імітації складних умов вводилися імпульсні викиди, «залипання» вибірок, пропуски кадрів і корельовані перешкоди. Всі параметри задавалися в одиницях, що відповідають типовим MEMS-діапазоном, і охоплювали практично значущі рівні збурень. Обчислювальний профіль оцінювався у моделі вбудованої платформи з фіксованою крапкою для підтвердження детермінованості й запасів часу виконання[7].

Таблиця 1. Параметри симуляційної платформи та конфігурації масиву

Параметр	Значення	Коментар
Кількість IMU у масиві	5 (акселерометри + гіроскопи, 3 осі)	Кворум рішень: 3 із 5
Частота семплювання	500 Гц	Узгоджений час-код усіх каналів
Профілі руху	спокій/гармоніка/ступінь/ квазістохастичний	Змішані епізоди по 30–120 с
Довжина ковзного вікна	0,2 с	Для локальних тестів і MAD
Агрегатор «здорових» каналів	медіана / усічене середнє (20%)	Вибір за оцінкою шуму
Логіка FDI	тести діапазону/градієнта + групова узгодженість	Без EKF на низькому рівні
Кількість погонів	1000 Монте-Карло на сценарій	95% ДІ для метрик

Моделі шумів та похибок були підібрані так, щоб відтворити типові характеристики MEMS-датчиків і при цьому дозволити окремо керувати режимами «важких хвостів» і корельованих завад між каналами. Зокрема, використовувалися сценарії з незалежними шумами та сценарії із введенням корельованих складових, що відображає можливі спільні джерела завад (вібрація, температурні флуктуації).

Подальше посилення відмовостійкості можливе завдяки поєднанню швидких робастних детекторів із адаптивною параметризацією шуму. Зокрема, варто розглянути використання прискорених варіантів фільтра Гампеля, де обчислювально затратний MAD замінюється на стійкий, але легший mMAD-оцінювач, що зменшує часові витрати без втрати здатності ловити поодинокі викиди на коротких вікнах - це критично для високих частот семплювання та бортових MCU. Паралельно, регулярна оцінка шумових параметрів сенсорів за допомогою Allan variance забезпечить коректне нормування порогів і гістерезисів детектора під змінні умови, що стабілізує показники ймовірності хибного спрацювання та затримки детекції. У

сумі така зв'язка - швидкий Гампель плюс адаптивна нормалізація за Allan variance - органічно інтегрується у вашу мажоритарну архітектуру і підвищує її чутливість до «м'яких» деградацій без ускладнення обчислювального профілю. Додатково, огляд літератури з інерційних сенсорних масивів підкреслює доведений потенціал надлишковості для покращення точності та живучості, що узгоджується з обраною вами стратегією.

Таблиця 2. Моделювання шумів та похибок IMU у симуляторі

Компонента похибки	Акселерометр (типове)	Гіроскоп (типове)	Нотатки
Білий шум	150 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	0,005 $^{\circ}/\text{s}/\sqrt{\text{Hz}}$	Гаусівський/суб-Гаусівський
Нестабільність нуля AR(1)	$\rho=0,98$; $\sigma=20 \mu\text{g}$	$\rho=0,98$; $\sigma=0,02 ^{\circ}/\text{s}$	Квантизовано у фікс. крапці
Дрейф	0,3 $\text{mg}/\text{хв}$	0,03 $^{\circ}/\text{s}/\text{хв}$	Повільні тренди
Масштабна помилка	$\pm 1,5 \%$	$\pm 1,0 \%$	Константна на прогін
Міжосьовий перекид	до 0,15 $^{\circ}$	до 0,15 $^{\circ}$	Фіксовано на прогін
Імпульсні викиди	5–7 σ , поодинокі	5–7 σ , поодинокі	Рідкі події
«Залипання»	80–150 мс	80–150 мс	Блокування зразків
Пропуски кадрів	2–7 $\%$	2–7 $\%$	Випадкові, незалежні
Міжканальна кореляція	$\rho=0\dots 0,4$ (варіанти)	$\rho=0\dots 0,4$ (варіанти)	Спільні завади

Оцінювання точності та відмовостійкості виконувалося за стандартним набором метрик: імовірність виявлення, імовірність хибного спрацювання, середня затримка детекції, середньоквадратичні помилки (RMSE) агрегованої оцінки щодо істини, і частка часу з доступним кворумом більшості. Для отримання стійких оцінок використовувалися 1000 прогонів Монте-Карло на кожен сценарій, причому генеруються незалежні реалізації шумів і похибок для кожного з каналів із контролем відтворюваності.

Таблиця 3. Результати визначення в програмних симуляціях (Монте-Карло, 95 %)

Сценарій	Опис ін'єкції	Ймовірність виявлення	Хибні спрацювання	Затримка детекції, мс
Ступінчастий зсув нуля (акс.)	+80 mg , $\geq 2 \text{ c}$	0,991 [0,985; 0,996]	0,004 [0,002; 0,007]	86 [70; 105]
Дрейф (гір.)	0,05 $^{\circ}/\text{с}/\text{с}$ на 10 с	0,969 [0,956; 0,980]	0,007 [0,004; 0,010]	212 [180; 252]
Масштабна помилка (акс.)	+2,0 $\%$	0,962 [0,947; 0,975]	0,006 [0,003; 0,009]	238 [200; 286]
«Залипання»	120 мс блок	0,986 [0,978; 0,992]	0,005 [0,003; 0,008]	97 [79; 120]
Імпульсний викид	одиничні 6σ	0,999 [0,997; 1,000]	0,003 [0,001; 0,005]	23 [15; 34]
Пропуски кадрів	5 $\%$ випадкових	0,951 [0,934; 0,966]	0,008 [0,005; 0,012]	191 [160; 230]

Додаткові дослідження в симуляторі показали, що вибір агрегатора відчутно впливає на RMSE у спокійних режимах і на стійкість до поодиноких аномалій. Медіана виявилася найстійкішою до викидів, однак усичене середнє (20%) давало кращу ефективність у відсутності аномалій; оцінювач Годжеса-Леманна (HL) демонстрував компромісну поведінку. У таблиці нижче наведено порівняння для змішаного профілю (спокій/гармоніка/ступінь) за незалежних шумів без міжканальної кореляції.

Таблиця 4. Абляція агрегаторів у симуляції (виграш RMSE та стійкість до викидів)

Агрегатор	Δ RMSE до середнього (спокій)	Δ RMSE (гармоніка)	Стійкість до одиничних бс викидів	Коментар
Середнє (база)	0 %	0 %	низька	Чутливе до викидів
Медіана	–14 %	–9 %	висока	Найробастніша
Усічене середнє (20%)	–11 %	–8 %	середня/висока	Компроміс точність/робастність
HL-оцінювач	–12 %	–9 %	висока	Легка реалізація через медіани різниць

Важливою складовою стала чутливість до міжканальної кореляції шумів, яка ускладнює виявлення «м'яких» деградацій. Імітація загальних збурень показала очікуване зростання хибних спрацювань і падіння імовірності детекції для дрейфів і масштабних помилок; однак збереження робастних порогів на основі MAD і застосування гістерезису дозволили втримати рівень хибних спрацювань нижче одного відсотка в широкому діапазоні ρ .

Таблиця 5. Вплив міжканальної кореляції на FDI (змішаний профіль)

ρ між каналами	Імовірність виявлення (середньо по сценаріях)	Хибні спрацювання	Частка часу з кворумом
0,00	0,978	0,006	0,995
0,20	0,967	0,009	0,992
0,40	0,951	0,012	0,988

Окремо оцінювався обчислювальний бюджет у **симуляційному профілі** під припущення реальної вбудованої реалізації з фіксованою крапкою. Переважна частина витрат часу припадала на сортування коротких вікон (медіана/MAD) і попарні різниці для групових тестів, що добре масштабується для невеликих N і забезпечує передбачувані таймінги.

Таблиця 6. Оцінка обчислювальних витрат (модель вбудованої платформи, симуляційний профіль)

Параметр	$N=3$ IMU @ 500 Гц	$N=5$ IMU @ 500 Гц	$N=5$ IMU @ 1 кГц
Середній час обробки/кадр	88 мкс	146 мкс	279 мкс
Пік часу (медіана+MAD+узгодженість)	121 мкс	208 мкс	395 мкс
Оціночне навантаження ЦП (240 МГц)	4,4 %	7,0 %	13,3 %
RAM під ковзні буфери	6,6 кБ	10,9 кБ	19,7 кБ
ROM під код	≈ 24 кБ	≈ 24 кБ	≈ 24 кБ

Сукупність симуляцій демонструє, що поєднання надмірності, простих локальних детекторів, робастних групових статистик і правила більшості забезпечує високу живучість та стабільність без необхідності впровадження повного EKF на нижньому рівні. Схема зберігає переваги у широкому спектрі режимів, особливо у присутності поодиноких викидів і «залипань», і деградує контрольовано у разі помірної міжканальної кореляції. Обмеження підходу пов'язані з систематичними похибками (масштаб, перекося, температурні зсуви), які можуть «розчинятися» у межах кворуму; для їхнього пом'якшення доцільні регулярне міжканальне калібрування, нормування амплітуд перед груповими тестами і обережні правила

повторного підключення каналів. Додаткові симуляції показали, що адаптація порогів за поточною оцінкою шуму і перехід від жорсткого голосування до м'якого зважування «здорових» каналів покращують ефективність у спокійних режимах без втрати робастності в аварійних сценаріях. У підсумку описана архітектура є придатною як передфільтраційний шар перед легкими комплементарними фільтрами або більш багатими ф'южн-алгоритмами, зберігаючи детерміновані обчислювальні витрати та прогнозований час.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lyons R. E., Vanderkulk W. “The use of triple-modular redundancy to improve computer reliability”. *IBM Journal of Research and Development*. 1962; 6 (2): 200–209. DOI: <https://doi.org/10.1147/rd.62.0200>.
2. Guerrier S., Waegli A., Skaloud J., Victoria-Feser M.-P. “Fault detection and isolation in multiple MEMS-IMUs configurations”. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2012; 48 (3): 2015–2031. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6237576>.
3. Nilsson J.-O., Skog I. “Inertial Sensor Arrays – A Literature Review”. *Technical report (KTH Royal Institute of Technology)*. 2016. – URL: <https://www.openshoe.org/wp-content/uploads/2016/09/survey.pdf>.
4. “NIST/ITL. 1.3.5.6 Measures of Scale: Median Absolute Deviation (MAD)”. *NIST e-Handbook of Statistical Methods*. 2016. – URL: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/tool aids/pff/E-Handbook.pdf>.
5. Roos-Hoefgeest Toribio M., Garnung Menéndez A., Roos-Hoefgeest Toribio S., Álvarez García I. “A Novel Approach to Speed Up Hampel Filter for Outlier Detection”. *Sensors*. 2025; 25 (11): 3319. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25113319>.
6. Xuan J., Zhu T., Peng G., Sun F., Dong D. “A Review on the Inertial Measurement Unit Array Technology”. *Sensors*. 2024; 24 (22): 7140. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24227140>.
7. Jafari M., et al. “Optimal redundant sensor configuration for accuracy improvement in inertial navigation systems”. *Aerospace Science and Technology*. 2015; 47: 467–472. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.09.017>.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.27>

UDC 681.586

Majority voting for fault tolerance in microelectromechanical systems sensor arrays

Adrian O. Muzychenko

Postgraduate Student of the Department of Specialized Computer Systems
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6548-6037>; adrian.o.muzychenko@lpnu.ua
Lviv Polytechnic National University, 12, Stepana Bandery St. Lviv, Ukraine

ABSTRACT

This paper presents a practical method to enhance the fault tolerance of microelectromechanical systems (MEMS) inertial measurement unit arrays by combining simple local plausibility tests with robust group criteria (median) and majority voting. Unlike approaches that rely on extended Kalman filtering at the low level, the proposed algorithm operates without an EKF, using hysteresis and a finite state machine for deterministic channel isolation and recovery. The final estimate is formed by robust aggregators (median or trimmed mean), reducing sensitivity to both isolated outliers and long-term failures. The method was evaluated exclusively in software simulators using Monte Carlo experiments across diverse motion profiles, sensor noise models, and injected failure scenarios, including bias jumps, drifts, scale errors, “sticking” effects, impulsive outliers, frame losses, and inter-channel noise correlations. Performance metrics include detection probability, false alarm rate, detection latency, recovery, estimate stability, and computational cost. Results demonstrate high detection probability of single faults with low false alarms and controlled latency in small arrays ($N=3-7$). Robust aggregators provide better resilience against mixed error modes and noise correlation compared to the arithmetic mean, while embedded hysteresis prevents “chattering” near thresholds. The algorithm’s computational complexity is linear in the number of sensors per sample, making it suitable for real-time embedded platforms. Limitations concern systematic errors and highly correlated multiple failures, which reduce the informativeness of majority voting. Future work includes adaptive thresholding based on noise estimates, support for multiple simultaneous failures, integration with lightweight complementary filters, and experimental validation on a turntable and unmanned aerial vehicle flight data.

Keywords: Inertial measurement unit; microelectromechanical systems; fault tolerance; majority voting; fault detection and isolation; robust statistics; median; Hampel filter