

## МОДУЛЬ ІНЕРЦІАЛЬНОЇ НАВИГАЦІЇ АВТОНОМНОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТА ТА АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЙОГО СИГНАЛІВ

*Наведено результати розробки модуля інерціальної навігації автономного мобільного робота та результати експериментальних досліджень спектральних та статистичних характеристик його сигналів. Встановлено, що спектральна щільність сигналу є суттєво нерівномірною, а імовірнісний розподіл відрізняється від нормального. Виділено напрями подальших досліджень щодо створення методів та засобів опрацювання сигналів.*

*Ключові слова: інерціальна навігація, автономний мобільний робот, спектральна щільність, статистична характеристика.*

M. I. KOZLENKO

State Higher Educational Institution "Vasyl Stefanyk Precarpathian National University", Ivano-Frankivsk, Ukraine

## INERTIAL NAVIGATION MODULE OF AUTONOMOUS MOBILE ROBOT AND ANALYSIS OF SIGNAL'S CHARACTERISTICS

*The results of development of the autonomous mobile robot inertial navigation module and results of experimental research of spectral and statistical characteristics of navigation signals have been presented. It has been shown that power spectrum density of the signal can not be approximated by white noise. Probability distribution of the signal values is non normal. The areas for further research and creating of signal processing methods and facilities have been identified.*

*Key words: inertial navigation, autonomous mobile robot, spectral density, statistical characteristic.*

### Вступ

Сфера застосування автономних мобільних роботів на даний час є такою, що швидко розширюється. Розвиток технологій на основі штучного інтелекту дозволяє вирішувати все більш складні задачі в автономному режимі в складних умовах. Надзвичайно важливим питанням під час функціонування робота є визначення його координат та орієнтації в просторі. Отже, проведення досліджень спрямованих на вдосконалення процедур визначення положення та орієнтації автономних мобільних роботів у просторі є актуальним.

### Постановка проблеми в загальному

Наявність інформації про орієнтацію робота у просторі дозволяє компенсувати гравітаційний вплив на його поведінку. Необхідність у простих та надійних засобах визначення положення та орієнтації зумовлює практичне завдання по створенню таких засобів, а також методів та засобів опрацювання сигналів, що надходять від сенсорів. Результативне вирішення цього завдання можливе за умови всебічного дослідження характеристик сигналів, що надходять від сенсорів.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Використання лінійних акселерометрів для визначення орієнтації у просторі, зокрема, кута нахилу описано в [1]. Використання акселерометрів для визначення орієнтації та руху портативних пристроїв міститься у [2]. Застосування лінійних акселерометрів для визначення положення автомобіля описано у [3]. Про необхідність фільтрації сигналів акселерометра можна ознайомитись в [4]. Основні прикладні моменти визначення кута нахилу містяться в багатьох публікаціях, зокрема, в [5]. Робота з акселерометрами фірми STMicroelectronics описана у [6]. Прикладні моменти дослідження характеристик сигналів описано у [7–9].

### Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Раніше невирішеною частиною загальної проблеми є отримання та аналіз спектральних та статистичних характеристик сигналів, що надходять під час функціонування автономних мобільних роботів з датчиків нахилу в якості яких використано лінійні акселерометри, саме цьому і присвячена дана робота.

### Формулювання цілей даної роботи

Отже, об'єктом дослідження є автономні мобільні роботи. Предметом дослідження є сигнали датчика нахилу інерціальної системи, встановленої на роботі. Метою роботи є отримання та аналіз спектральних та статистичних характеристик цих сигналів.

### Викладення основного матеріалу досліджень.

На основі аналізу вимог, що ставляться до таких систем, розроблено мікромодуль, що містить наступні основні вузли: двохосовий датчик кутової швидкості (MEMS-"гіроскоп") типу LPY550AL фірми ST, трьохосовий акселерометр типу LIS302SG, трьохосовий магнітометр типу LSM303DLHC тієї ж фірми, мікроконтролер типу ATXmega32A4 фірми Atmel та стабілізатор живлення типу L78L33AC. Стабілізатор формує напругу живлення значенням 3,3 V з максимальним струмом до 100 mA для живлення усіх компонентів мікромодуля. Мікроконтролер здійснює введення сигналів акселерометра та датчика кутової швидкості за допомогою аналого-цифрового перетворення за 5 каналами зі швидкістю 2 MSPS і введення сигналів магнітометра за допомогою шини I2C. Також мікроконтролер реалізує фільтр Калмана та

програмний інтегратор кутової швидкості, забезпечує доступ зовні до навігаційних даних за інтерфейсами I2C, SPI, UART. Крім того, два сигнали можуть бути виведені в аналоговому форматі зі швидкістю до 1 MSPS. Конфігурування параметрів мікро модуля здійснюється через UART. Забезпечується безпосередній доступ до аналогових виходів сенсорів.

Основні характеристики мікро модуля є наступні: діапазон вимірювання (повна шкала) магнітометра від 1,3 до 8,1 gauss з роздільною здатністю 2 mgauss. Діапазон вимірювання кутових швидкостей від 500 до 2000 degree/sec, шум 0,059 degree/sec/sqrt(Hz), частотний діапазон до 140 Hz. Чутливість акселерометра 0,478 V/g, шум 200 mg/sqrt(Hz). Конструктивно модуль виконано у вигляді друкованої плати з двохстороннім монтажем компонентів. Зовнішній вигляд експериментального зразка подано на рисунку 1.

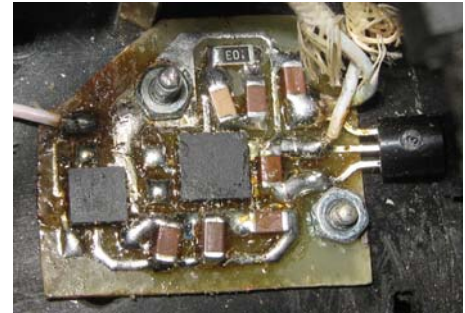


Рис. 1. Зовнішній вигляд експериментального зразка модуля інерціальної навігації

Проведені ходові випробування діючої моделі в масштабі 1:10 автономного транспортного засобу показали стабільну працездатність та прийнятність характеристик.

Вихідні дані для даного дослідження було отримано експериментальним шляхом. Повнопривідний чотириколісний автономний інтелектуальний робот було обладнано даним модулем інерціальної навігації, Сигнал, що відповідає куту нахилу робота за напрямом його руху знімався з відповідного виходу лінійного акселерометра. Сигнал для досліджень багатократно фіксувався за допомогою 16-розрядного АЦП з частотою  $f_s = 48$  кГц (інтервал дискретизації  $T_s = 2,08(3) \cdot 10^{-5}$  с) та спеціально розробленого апаратного і програмного забезпечення для збереження отриманих даних у файлах на комп'ютері.

Приклад часової форми фрагменту сигналу подано на рис. 2.

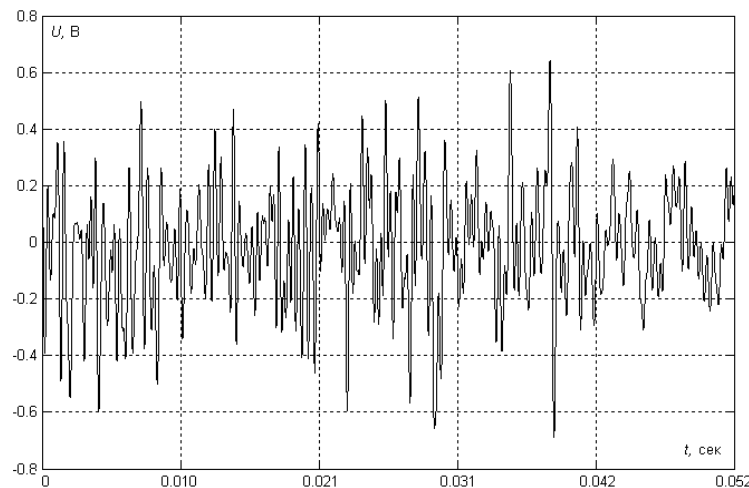


Рис. 2. Приклад часової форми фрагменту сигналу

Дослідження часових, частотних та статистичних характеристик сигналів проведено за допомогою спеціально розробленого раніше [9] у середовищі MATLAB програмного забезпечення.

Для імпорту досліджуваних сигналів у середовище та перетворення їх у вектори було використано вбудований інтерфейс `uiimport`, який дозволяє працювати з широким спектром файлів, зокрема .wav та .txt форматів.

Автокореляційна функція цього фрагменту обчислена за допомогою наступної процедури:

```

B=A;
for j=1:1:length(A)
    ac(j)=0;
    if(j~=1) shift
    end
    for i=1:1:length(A)
        ac(j)=ac(j)+A(i)*B(i);
    end
end
end

```

Процедура `shift`, що реалізує зміщення масиву на один відлік:

```

C=B;
for i=1:1:length(B)-1
    C(i+1)=B(i);
end
C(1)=0;
B=C;

```

Візуалізація автокореляційної функції:

```

plot(ac)
grid on

```

Графік автокореляційної функції розглянутого фрагменту сигналу представлено на рис. 3. Як можна побачити, автокореляційна функція загасає швидко, що свідчить про наявність суттєвого впливу високочастотної випадкової складової в досліджуваному сигналі. Обчислена експонента Херста для дискретизованого часового ряду складає 0,0507, що свідчить про антиперсистентність ряду.

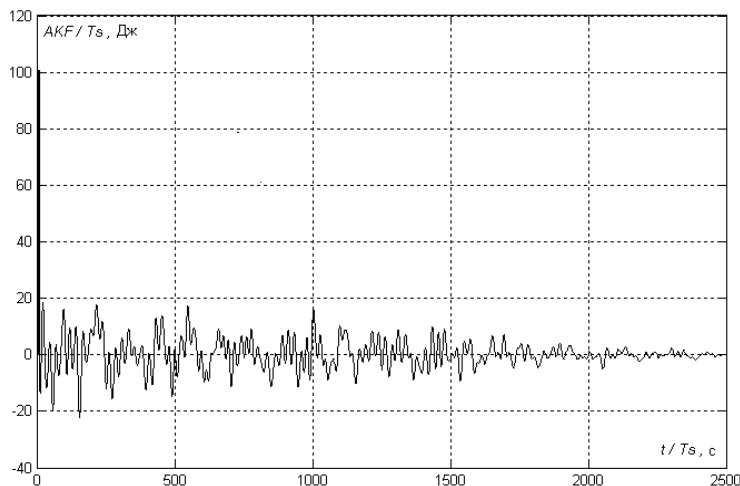


Рис. 3. Автокореляційна функція фрагменту сигналу

Частотний спектральний аналіз сигналів проведено у відповідності до перетворення Фур'є, шляхом розрахунку дискретного перетворення з подальшим обчисленням спектральної щільності енергії. Для обчислення перетворення Фур'є було використано вбудовану функцію `fft(A)`, яка реалізує дискретне перетворення вектора (масиву)  $A$ . Результатом її роботи є спектральна щільність амплітуд, у вигляді вектора комплексних чисел. Для зміщення елемента, що відповідає нульовій частоті в центр масиву використано вбудовану функцію `fftshift(A)`. Отримана однобічна спектральна щільність енергії розглянутого фрагменту сигналу представлена на рисунку 4.

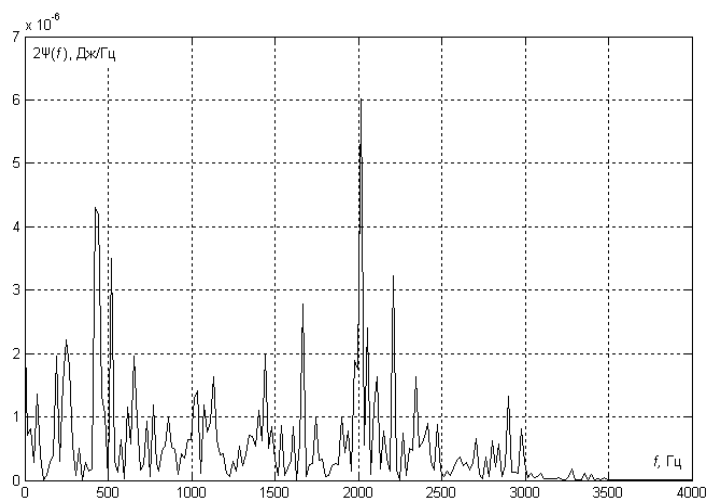


Рис. 4. Однобічна спектральна щільність енергії фрагменту сигналу

Для визначення спектральної щільності енергії та повної енергії сигналу розроблено процедура `esd(A)`, що організована у вигляді `m`-файла і має наступний вигляд:

```

A=filename.data; % для WAV-файлу filename - назва файла
Fsam=filename.fs
T=1/Fsam
N=length(A);
F=1/(N*T)
A=(abs(T*fft(A))).^2;
A(N/2+2:N)=[];
A=A.*2;
Energy=sum(A)*F

```

Візуалізація отриманих результатів здійснюється за допомогою вбудованих засобів. Для автоматичного відображення графіків спектральної щільності енергії з бажаними параметрами використовується наступна процедура:

```

B=1:1:N/2+1;
V=B-1;
V=V.*F;
plot(B,A,'k-')
grid on

```

Як можна побачити з рис. 4. спектральна щільність енергії є суттєво нерівномірною в широкій смузі частот і має яскраво виражені максимуми на певних частотах, що може бути пояснено механічним впливом двигунів робота, що створюють вібрацію, властивостями поверхні якою рухався робот, наводками від силових ланцюжків, шумом тракту передачі сигналу та іншими факторами. Корисна інформація міститься у низькочастотній області представленого сигналу. В умовах експерименту частота зміни нахилу складала менше 1 Гц (за даними виробника датчика він здатен працювати в смузі до 140 Гц). В той же час, можна побачити, що сигнал, що надходить від датчика до пристрою оброблення має значно ширший спектр. Тому, очевидно, що сигнал перед використанням слід фільтрувати. Також слід враховувати, що шумова (завадна) компонента сигналу не може бути апроксимована білим шумом, що слід брати до уваги при визначенні характеристик та параметрів фільтра.

Гістограма емпіричного розподілу значень сигналу показана на рисунку 5. Як можна побачити характер розподілу суттєво відрізняється від нормального. Було проведено тестування вибірки з 333056 семплів на нормальність за допомогою тестів Жарка-Бера (тестова статистика  $7,7202 \cdot 10^5$ ), Колмогорова-Смірнова (статистика 0,3835) та Ліллієфорса (статистика 0,1052) при широківживаному значенні рівня значущості 5%. Усі тести показали, що можна відкинути гіпотезу про нормальність розподілу. Таким чином, слід вважати недоцільним застосування широківживаного в системах інерціальної навігації фільтра Калмана для опрацювання сигналу, оскільки розподіл шуму відрізняється від нормального.

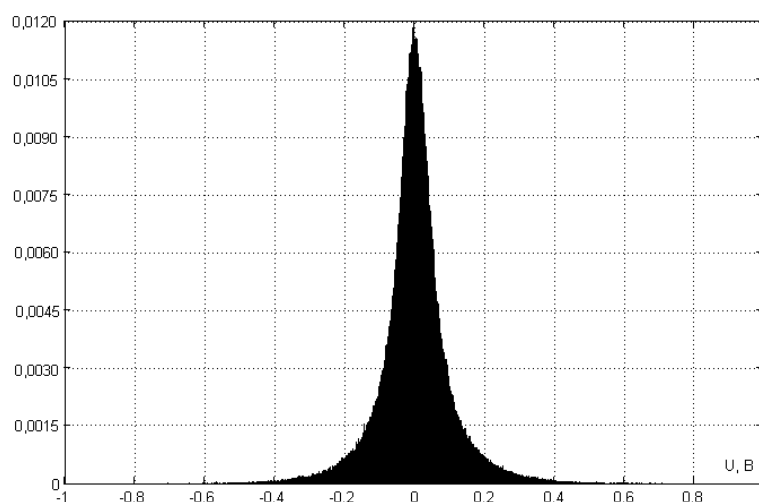


Рис. 5. Гістограма емпіричного розподілу значень сигналу

### Висновки

Встановлено, що сигнал, що надходить від модуля інерціальної навігації мобільного робота є суттєво антиперсистентним. Спектральна щільність енергії шумової компоненти сигналу є суттєво нерівномірною і не може бути представлена у вигляді білого шуму. Ймовірнісний розподіл шуму відрізняється від нормального. Оптимізація таких сигналів потребує розробки спеціалізованих засобів.

**Перспективи подальших досліджень**

Основними напрямками подальшого дослідження є створення методів та засобів оптимального опрацювання сигналів датчиків модуля. Зокрема, автор вважає перспективним створення спеціалізованих фільтрів на базі сучасних програмованих систем на кристалі.

**Література**

1. Бузыкканов С. Датчик наклона на основе твердотельного акселерометра / С. Бузыкканов // Современная электроника. – 2004. – № 2. – С. 42–45.
2. Jiayang Liu, Lin Zhong, Jehan Wickramasuriya Venu Vasudevan. uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications. *Pervasive and Mobile Computing*. Vol. 5. Issue 6. December, 2009. P. 657–675.
3. Клец Д. М. Применение акселерометров в качестве элементов контрольно-измерительной системы автомобиля / Д. М. Клец // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – Луганськ : Видавництво Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля, 2012. – № 9 (180). Ч. 1. – ISSN 1998–7927.
4. Пестов Е. Распознавание движения мобильного устройства / Е. Пестов // *International Journal of Open Information Technologies*. – 2013. – № 1(3). – С. 5–10.
5. Mark Pedley. Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. Document Number: AN3461 Rev. 6, 03/2013 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN3461.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf)
6. Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer. Application note AN3182. Doc ID 17289 Rev 1. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00268887.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00268887.pdf)
7. Козленко М. І. Характер та симетрія функцій правдоподібності при демодуляції шумоподібних сигналів в мобільній робототехніці / М. І. Козленко // Вісник Хмельницького національного університету (технічні науки). – Хмельницький : ХНУ, 2013. – № 6 (207). – С. 135–139.
8. Козленко М. І. Ефективність застосування ймовірнісних характеристик при формуванні широкосмугових випадкових сигналів в телекомунікаційних та комп'ютерних системах / М. І. Козленко // Вісник Хмельницького національного університету (технічні науки). – Хмельницький : ХНУ, 2012. – № 4 (191). – С. 118–125.
9. Козленко М. І. Ефективність використання частотної смуги при формуванні широкосмугових сигналів в розподілених комп'ютерних та телекомунікаційних системах / М. І. Козленко // Проблеми інформаційних технологій. – Херсон : ХНТУ, 2012. – № 1 (011). – С. 115–120.

**References**

1. Buzykanov S. Tilt sensor based on solid-state accelerometer / S. Buzykanov // *Modern electronics*. - 2004. - № 2. - pp. 42-45.
2. Jiayang Liu. uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications / Jiayang Liu, Lin Zhong, Jehan Wickramasuriya Venu Vasudevan // *Pervasive and Mobile Computing*. – vol. 5. – issue 6. – December, 2009. – P. 657-675.
3. 3 Klets D.M., (2012) Application of accelerometers as an element of control and measuring system of the car / D.M. Klets // *Visnik of the Volodymyr Dahl east Ukrainian national university*, no. 9 (180), part 1.
4. Pestov E. Motion detection of mobile device / E. Pestov // *International Journal of Open Information Technologies*. - 2013. - № 1 (3). - pp 5 -10.
5. Mark Pedley. Tilt Sensing Using a Three-Axis Accelerometer. Document Number: AN3461 Rev. 6, 03/2013 [http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app\\_note/AN3461.pdf](http://www.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN3461.pdf)
6. Tilt measurement using a low-g 3-axis accelerometer. Application note AN3182. Doc ID 17289 Rev 1. [http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application\\_note/CD00268887.pdf](http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/application_note/CD00268887.pdf)
7. Kozlenko M. I. The character and symmetry of the likelihood functions of the spread spectrum signals demodulation in mobile robotics. *Herald of Khmelnytsky National University. Technical science. Khmelnytsky*. 2013. Issue 6. pp. 135-139.
8. Kozlenko M. I. The efficiency of probability characteristics using in forming of the spread spectrum signals in telecommunication and computer systems. *Herald of Khmelnytsky National University. Technical science. Khmelnytsky*. 2012. Issue 4. pp. 118-125.
9. Kozlenko M. I., (2012) "Frequency resource using of the spread spectrum signals forming in the distributed computer and telecommunication systems", *The problems of information technologies*, no 1 (011), pp. 115-120.

Рецензія/Peer review : 10.10.2014 р.

Надрукована/Printed :29.11.2014 р.  
Рецензент: к.т.н., доц. І.М. Лазарович