

О.С. ПИВОВАР, О.О. МИХАЛЬЧУК, І.О. ВЕРЕМІЙЧУК

Хмельницький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ СИГНАЛІВ ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ ДЛЯ СИСТЕМ БЛИЖНЬОЇ НАВІГАЦІЇ МОБІЛЬНИХ РОБОТІВ

Показана можливість використання властивостей сигналів детермінованого хаосу для завдань вимірювання та контролю ближніх відстаней. Запропоновано ряд моделей систем ближньої навігації мобільних роботів на плоских поверхнях із перешкодами на основі застосування генераторів детермінованого хаосу та їх взаємодії під час односпрямованої хаотичної синхронізації. Аналіз запропонованих моделей підтверджує теоретичні обґрунтування щодо збільшення рівня прихованості дії, завадостійкості в умовах адитивних шумових завад та роботи групи подібних систем у складі рою.

Ключові слова: хаос, навігаційні системи, генератор сигналів детермінованого хаосу, хаотична синхронізація.

O. S. PYVOVAR, O. O. MYKHALJCHUK, I. O. VEREMIJCHUK

Khmelnytskyi National University

APPLICATION OF DETERMINED CHAOS SIGNALS IN SHORT-RANGE NAVIGATION SYSTEMS FOR MOBILE ROBOTS

The widespread use of drones as autonomous mobile systems for the production, transport, service, and combat missions requires effective navigation systems in order for them to function effectively in environments with numerous obstacles. Most mobile navigation problems appear in situations when groups of drones are used in a swarm. Solving such problems is linked to the need for the development of orientation systems; such process organically combines the task of measuring and controlling the distance to the obstacles surrounding the mobile mechanism while ensuring the concealment of action and protection against interference. A complex solution to such problems is possible through the use of nonlinear dynamic systems with a chaotic mode of operation in different ways of interaction with the environment and similar navigation systems. The possibility of using deterministic chaos signals to measure and control physical quantities is considered. The classification scheme of features of measuring process in nonlinear dynamic systems with chaotic modes of operation is offered. A number of parameters and characteristics of chaotic generators which should be used in the measurement process are highlighted, their classification is proposed. It is proposed to use 4D deterministic chaos generators for use in short-range drone navigation in two-dimensional plane. Comparative analysis of correlation properties of several 3D and 4D chaotic generators is carried out. The phase variables of the deterministic chaos generators are selected, which correspond to the tasks of navigation on the basis of phase trajectory divergence. It is proposed to use the principles of chaotic synchronization to build a system of short-range navigation of mobile mechanisms in the plane in order to enhance the ability to control the movement of drones in conditions of multi-channel interference and increase noise immunity in drone navigation systems. Computer simulation of the process of synchronization of chaotic generators of Qi-Chen during change of degree of one-way link between the driving and driven chaotic generators, changes of control parameters of the evolution operator in a nonlinear dynamic system, and signal-to-noise ratio of additive interferences is carried out.

Keywords – chaos, navigation systems, generator of signals of deterministic chaos, chaotic synchronization.

Постановка проблеми

Детермінований хаос являє собою надзвичайно поширене та різноманітне явище, що полягає у появі в нелінійних динамічних систем (НДС) неперіодичних процесів з неперервним спектром потужності [1]. Відкриття Е. Лоренцом явища динамічного хаосу в 1961 р і його подальші дослідження стали справжньою науковою революцією наприкінці ХХ століття. Це привернуло увагу фахівців з різних галузей знань своєю елегантністю, широким поширенням у природних та штучних процесах, відносною простотою динамічних математичних моделей, на яких його можна досліджувати чисельним шляхом [2].

Перспективи застосування сигналів детермінованого хаосу (СДХ) пов'язані, у першу чергу, із широкосмуговістю таких сигналів, але перевагою СДХ є не лише широкосмуговість спектру, але і можливість досягнення цієї широкосмуговості для значної тривалості. Тобто генератор хаотичних сигналів (ГХС) створює сигнал із високою інформаційною насиченістю, що органічно єднає його із процесами вимірювання та контролю (ВТК) [3, 4].

Широке застосування мобільних автономних систем – дронів – для вирішення транспортних, а також бойових завдань гостро поставило проблему орієнтації подібних механізмів у просторі, що заповнено перешкодами, особливо в умовах групового застосування в складі рою. Вирішення подібних проблем пов'язане з необхідністю розробки систем орієнтації, що органічно поєднує завдання ВТК оточення мобільного механізму із забезпеченням прихованості дії, захисту від завад та групового застосування. Комплексне вирішення подібних завдань можливе через застосування НДС у різних режимах роботи [5–7].

Метою статті є розробка та дослідження побудови системи ближньої орієнтації мобільних рухомих автоматів на основі застосування сигналів детермінованого хаосу.

Аналіз останніх джерел

Правильним підбором оператора еволюції (типу НДС) та керуючих параметрів можливо генерувати різні типи вимірювальних сигналів від близьких до синусоїдальних аж до близьких до білого шуму, що відкриває можливості оперативного керування процесом вимірювання для отримання більш коректних результатів в умовах протиріч між оптимальним сигналом та вимірювальним параметром [3].

На основі аналізу стану використання СДХ [1–8] запропонована класифікація факторів та наслідків їх застосування в системах ВТК (рис. 1). Найбільш доцільно використовувати СДХ з точки зору контролю, що пов'язано з наявністю різких порогових процесів в НДС [1, 2, 4]. Наявність порогових ефектів, таких як

поява «вікон прозорості» у біфуркаційних діаграмах, різка зміна форми «атрактора», висока чутливість до початкових значень, пороговий характер появи синхронізації між хаотичними генераторами, різкий перехід від одного різновиду синхронізації до іншого обумовлює можливості використання хаотичної обробки в процесах контролю параметрів фізичних величин [5].



Рис. 1. Наслідки використання сигналів детермінованого хаосу під час вимірювання та контролю

Найбільш важливою особливістю СДХ, пов'язаною із його природою, є висока чутливість до зміни початкових параметрів, що лежить в глибинній природі появи хаотичного режиму, яку часто називають «ефектом метелика» [1, 3]. Якщо функціонально поєднати вимірювальну величину та початкові параметри ГХС, то невелика їх зміна призводить до суттєвих змін у вихідному СДХ, крім того, ці зміни експоненційно збільшуються у часі [2]. За таких умов легко отримати надвисоку чутливість вимірювального приладу [4] зі збільшенням часу обробки. На даний час це є одним із найбільш практично реалізованих переваг використання хаотичної обробки під час ВТК [3–6].

Особливе місце під час вимірювань та контролю займає визначення параметрів та характеристик хаотичних процесів, таких як факт появи різних ступенів «хаотичності» у НДС, ідентифікація атракторів, оцінка показників Ляпунова, ідентифікація типу синхронізації, вимірювання широкосмуговості та кореляційних властивостей тощо [4]. В цьому сенсі розумно використовувати не класичні алгоритми, а підходи, що ґрунтуються на застосуванні тих самих СДХ та нелінійних процесів. Подібні завдання викликають потребу активного розвитку окремого підрозділу метрології – «хаотичні вимірювання», для яких запропоновано класифікацію можливих вимірювальних параметрів та характеристик (рис. 2).

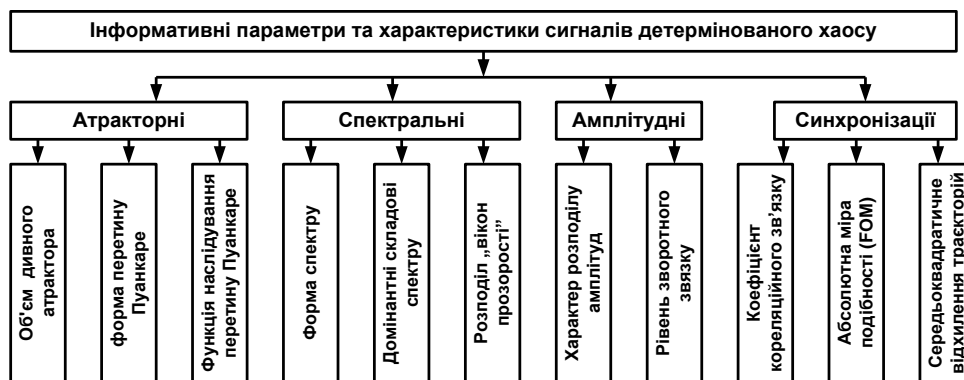


Рис. 2. Вимірювальні параметри під час використання вимірювань на основі сигналів детермінованого хаосу

Найбільш придатними для використання в системах вимірювання відстані в реальному часі серед зазначених на рис. 2 є група спектральних та синхронізаційних параметрів та характеристик, що підтверджується спробами їх використання, описаними у [2, 5, 6], які реалізують більшу частину переваг СДХ.

Виклад основного матеріалу

Принцип дії найбільш простого методу ВТК рівня наближення до перешкоди полягає у органічних властивостях ГХС щодо розбігання траєкторій фазових змінних (ФЗ) у часі: два практично однакові ГХС із часом будуть формувати СДХ різних форм зі слабкою кореляцією між ними. Вимірювання рівня відмінності траєкторій реалізується через визначення автокореляційних функцій (АКФ) між одною або декількома ФЗ одночасно [6]. Очевидно, що для орієнтації мобільних автономних механізмів на плоских поверхнях необхідно застосувати мінімум 3 сенсора наближення (рис. 3а) за різними напрямками.

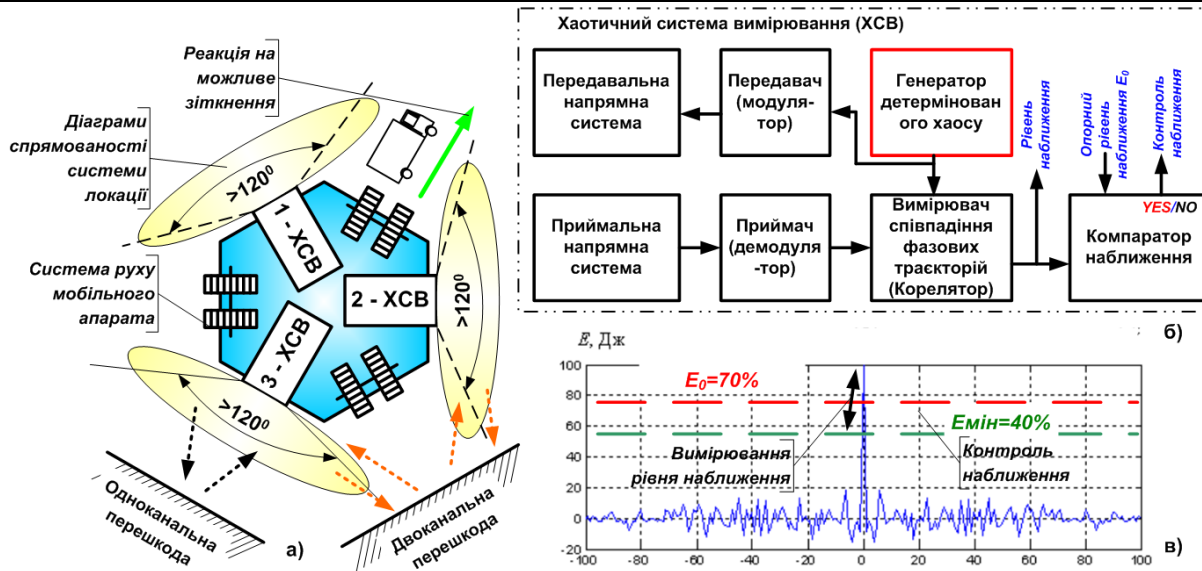


Рис. 3. Схема а), структура каналу б) та АКФ в) сигналу детермінованого хаосу для системи контролю наближення із «розбіганням» фазових траєкторій

Кожний напрямок контролю обробляється СДХ від окремого ГХС через систему випромінювачів, що охоплюють повне коло напрямків (рис. 3а). В найбільш простому випадку ВТК (рис. 3б) здійснюється на основі порівняння зондуючого та відбитого СДХ. У практично однакових ГХС слід обрати ФЗ, найбільш оптимальну із точки зору радіолокаційної АКФ та ВКФ (рис. 3в). Фізична природа каналу (ультразвукова, інфрачервона, тощо) зондування залежить від обраного типу та налаштувань ГХС. Діаграма спрямованості напрямної системи каналу (рис. 3а) для повного кола напрямків обрана дещо більшою 120°. В такому випадку відбиті від двоканальної перешкоди (рис. 3а) СДХ можуть потрапляти в суміжні вимірювальні канали, що створює системну заваду, яка не перевищує, відповідно проведеним дослідженням, 20% максимуму АКФ. ГХС для такої схеми (рис. 3б) можуть бути різних типів та розмірностей НДС, головне, щоб НДС знаходилась в хаотичному режимі (табл. 1).

Перевагами запропонованої схеми контролю наближення на основі розбігання фазових траєкторій (рис. 3) є простота та типізація (інтеграція) структурних блоків схеми ВТК, а також слабкі вимоги до стабільності хаотичних режимів та можливість використання ГХС в інтегральному виконанні. Недоліками схеми (рис. 3) є необхідність використання 3-х незалежних ГХС, великий час початкового запуску, що необхідний для «розбігання» траєкторій та достатньо велике відношення сигнал/завада в каналі, не менш як 15...20 дБ.

Таблиця 1

Якісний аналіз 3D ГДХ із квадратичною нелінійністю як елементів системи ближньої навігації

№	Назва за прізвищем автора	Кількість параметрів керування	Характеристика АКФ для фазових змінних	Характеристика попарної ВКФ фазових змінних
1	Rucklidge	2	Неоптимальність змінної Z	Неоптимальність між сигналами Y та X
2	Sprott-Linz C	0	-	Неоптимальність між сигналами Y та X
3	Sprott-Linz H	1	-	Неоптимальність ВКФ між усіма фазовими змінними
4	Qi-Chen	3	Неоптимальність змінної Z	Неоптимальність між сигналами Y та X

Частину недоліків схеми рис. 3 можливо усунути через використання різних ФЗ одного ГХС із не менше як трьома незалежними фазовими змінними X, Y, Z (3D хаотичний осцилятор). На даний час відомо декілька сот моделей таких генераторів різної структури та характеру нелінійності [7]. Серед них для застосування у сенсорах наближення слід обрати такі, що відповідають найбільш оптимальній формі АКФ: найбільше перевищення головного максимуму над вторинними максимумами в зоні високої кореляції [6]. Крім того з точки зору практичного застосування в системах ВТК, модель ГХС має мати більш просту практичну реалізацію із можливістю інтеграції в мікросхемах, а також допускати масштабування.

Відповідно [7] для використання у системах ВТК малих відстаней виділено, складено моделі (Simulink) та проаналізовано характер АКФ та ВКФ ряду перспективних 3D ГХС (табл. 1) із квадратичною нелінійністю. Навіть таке просте дослідження показує, що найкращі кореляційні властивості проявляють ФЗ генераторів із більшим ступенем нелінійності в більшій кількості ФЗ моделі, зокрема, у генераторі Qi-Chen. 3D ГХС загалом не відповідають вимогам щодо АКФ та ВКФ для одногенераторної схеми ВТК по всім ФЗ (табл. 1), але крім 3D хаотичних генераторів існують моделі генераторів вищої розмірності, наприклад, 4D генератор за схемою Lorenz із кубічною нелінійністю (рис. 4) [8]. Аналіз моделі 4D ГХС показав, що такий ГХС спроможний забезпечити оптимальні форми АКФ та ВКФ тільки для трьох ФЗ, що вже достатньо для використання в схемі ВТК (рис. 3) із розбіганням фазових траєкторій.

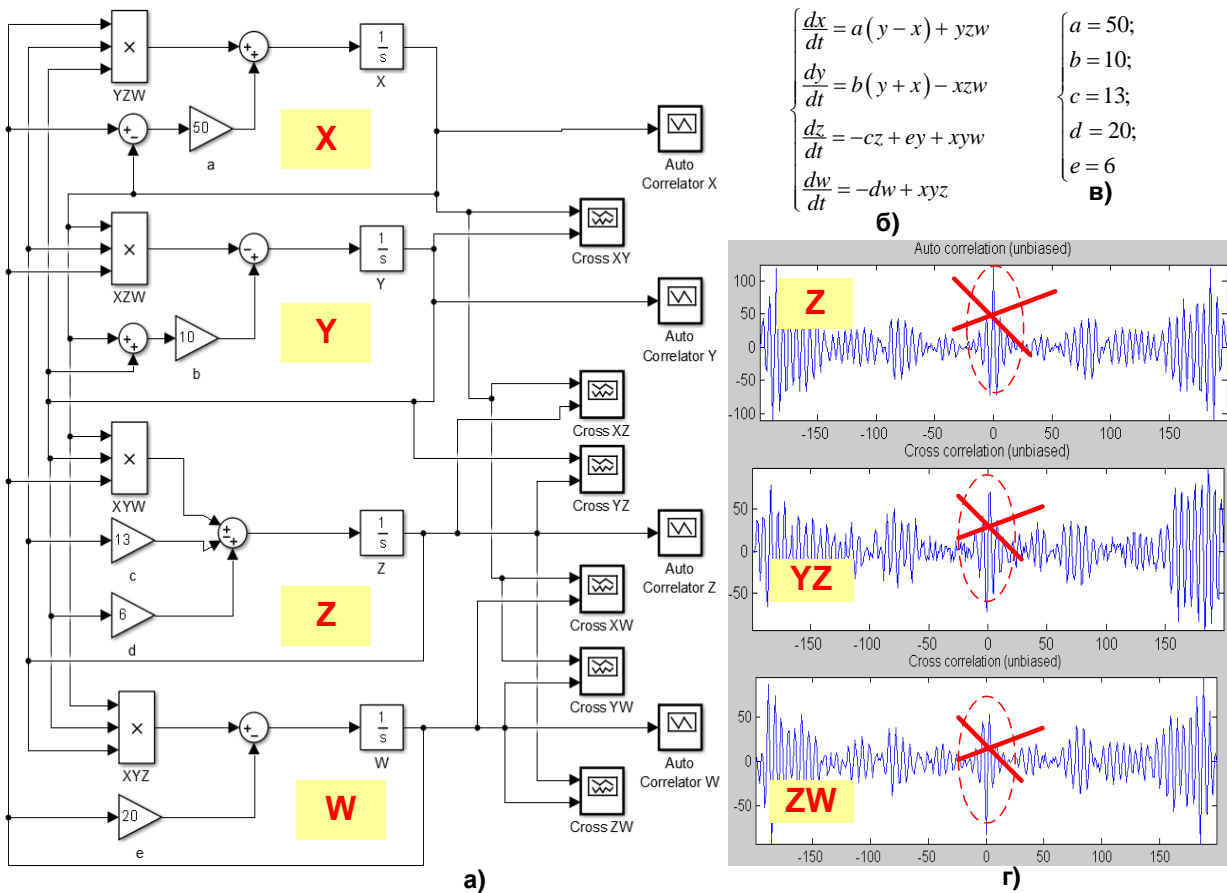


Рис. 4. Функціональна схема а), оператор еволюції б), параметри ініціалізації хаосу в) та неоптимальні АКФ та ВКФ 4D хаотичного генератора

Крім використання лише одного ГХС перевагами одногенераторної схеми ВТК у системах ближньої навігації є миттєва готовність до роботи після ввімкнення (різні ФЗ декорельовані без ефекту «метелика»), зменшена чутливість до системних завад, а також можливість роботи за умови більшого рівня зовнішніх шумів (SNR>10 дБ). Недолік одногенераторної схеми – вища структурна складність самого 4D-генератора. Альтернативою системам ВТК із «розбіганням» фазових траєкторій (рис. 3) є запропонована авторами система ближньої навігації (рис. 5) на основі хаотичної синхронізації (ХС). Характер процесу ХС обернений до процесу «розбігання» фазових траєкторій та може бути використаний для ВТК різних фізичних величин через вплив на біфуркаційні параметри ГХС, силу зв'язку та, у меншій мірі, початкові умови.

Структура системи ВТК наближення на основі ХС у мінімальному варіанті складається з 4-х ідентичних за структурою ГХС, один із яких є опорним, а решта веденими, останні відповідають за свій кут огляду можливих перешкод, як і на рис. 3. Якщо мобільний об'єкт наближається до перешкоди, сила зв'язку (або інший параметр впливу) між опорним та деяким із ведених ГХС зростає і ведений генератор починає відтворювати траєкторію опорного по всім ФЗ. За таких умов система ВТК дронів набуває нової позитивної якості, а саме можливості більш точного реагування на двоканальну перешкоду (рис. 3) через часткову ХС двох ведених ГХС за суміжними каналами (див. рис. 3а). Якщо в випадку використання схеми із розбіганням траєкторій (див. рис. 3б) це призводить до збільшення системних завад, то в схемі із ХС (рис. 5а) – до розширення функціональних можливостей реакції системи керування рухом мобільного робота на перешкоду.

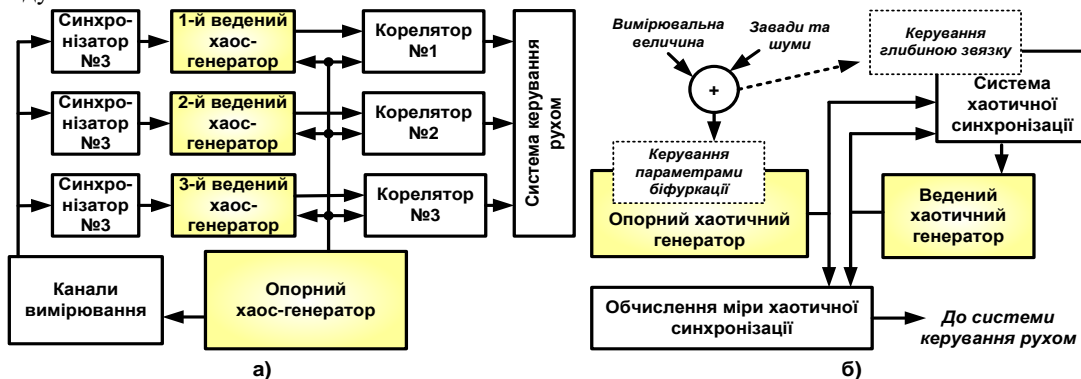


Рис. 5. Структурна схема а) та схема вимірювання б) системи ближньої навігації основі хаотичної синхронізації

Контроль ідентичності СДХ веденого та опорного ГХС може бути реалізовано за розрахунками декількох досить різних мір, у самому простому випадку застосовується метричний коефіцієнт відмінності:

$$\Delta M = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \left[(x_{1j} - x_{2j})^2 + (y_{1j} - y_{2j})^2 + (z_{1j} - z_{2j})^2 \right]}, \quad (1)$$

де x_{1j}, x_{2j} – вибірки порівнювальних сигналів; N – кількість вибірок для забезпечення достатньої точності обчислення міри синхронізації (100...1000) [7]. Залежність метричного коефіцієнту (1) від десинхронізації до повної ХС, пропорційна силі зв'язку або значенню параметра оператора еволюції НДС (рис. 6), саме дозволяє проводити не лише контроль наближення, але і вимірювання рівня наближення. Така залежність характерна не лише для метричного коефіцієнту відмінності, але і для інших мір визначення ідентичності: коефіцієнту кореляції, максимізації взаємного спектру, рівня співпадіння фігур тощо [7].

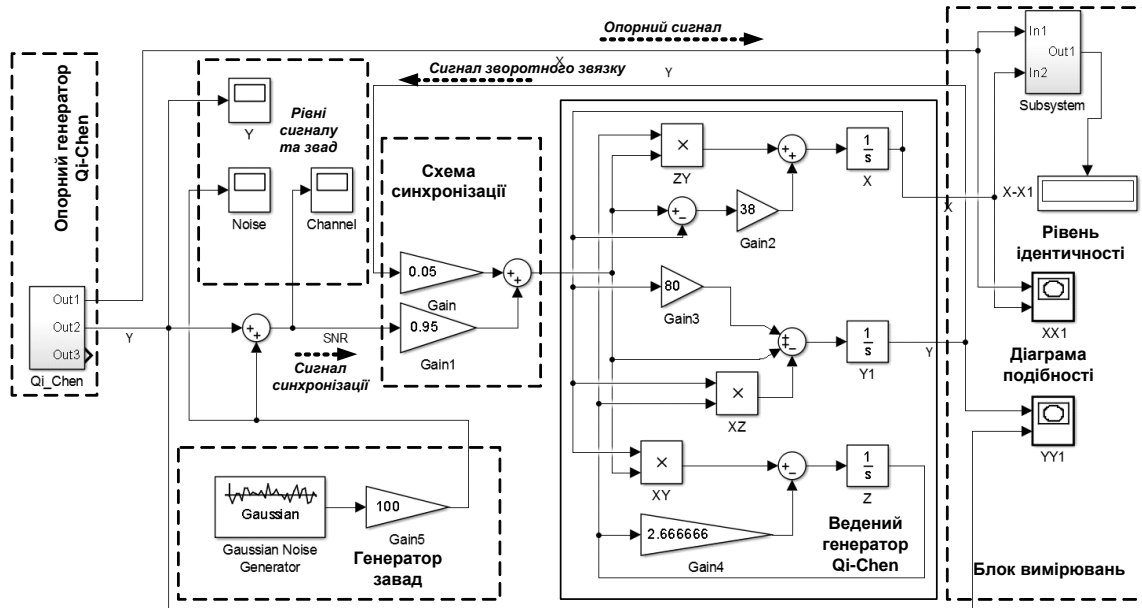


Рис. 6. Модель процесу хаотичної синхронізації між хаотичними генераторами Qi-Chen

Застосування методу ВТК на основі ХС зручне саме для вимірювання малих дальностей також і з позицій характеру виникнення режиму повної ХС лише за умови сильного зв'язку, а сильний зв'язок виникає саме на малих відстанях. Для перевірки працездатності вказаного підходу у середовищі Matlab (Simulink) проведено аналіз роботи процесу ХС для ГХС Qi-Chen в умовах зміни відношення сигнал/шум (SNR), параметрів оператора еволюції та глибини взаємодії опорного та веденого генераторів за моделлю, представленою на рис. 6.

За результатами моделювання (рис. 7) встановлено, що ХС веденого та опорного ГХС за умови ідентичності параметрів біфуркації відбувається навіть на фоні адитивних шумів та завад, що співмірні з рівнем хаотичного синхронізуючого сигналу (рис. 7б). Залежність рівня синхронізації від усіх вимірювальних параметрів можливо розбити на 3 зони: А – зона повної синхронізації, де нормована міра ідентичності приймає значення, близькі до нуля; В – перехідна зона, де реалізується режим часткової синхронізації; С – зона десинхронізації, де фазові траєкторії розходяться та значення міри ХС приймає великі значення.

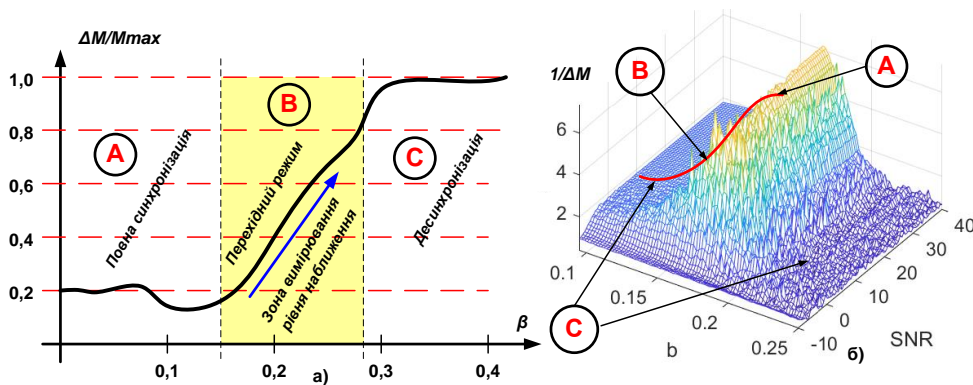


Рис. 7. Залежності рівня ідентичності під час синхронізації генераторів Qi-Chen від сили зв'язку а), біфуркаційного параметра та відношення сигнал/шум б)

Процес вимірювання малих дальностей слід проводити у перехідній зоні В (рис. 7а), де фіксується монотонна залежність (псевдолінійна) значення обраної міри ідентичності СДХ. Перевагами системи ближньої навігації, що ґрунтується на принципі ХС, є: можливість роботи за умов високого рівня шумів; розширення функціональних можливостей через можливість ідентифікації та вимірювання відстаней до двоканальної перешкоди; висока чутливість до апаратних та нелінійних спотворень у каналах вимірювання; висока прихованість дії через використання широкосмугових зондуючих СДХ. Серед недоліків слід відзначити збільшену апаратну складність через використання мінімум 4-х хаотичних генераторів та схеми синхронізації, а також більш складну програмну або апаратну процедуру визначення міри синхронізації.

Робота схеми ВТК (рис. 5а) можлива також у складі рою рухомих автоматів, якщо налаштувати параметри суміжних систем таким чином, щоб взаємна синхронізація не відбувалась. В цьому випадку особливо привабливими є НДС із великою кількістю параметрів (Qi-Chen), маніпуляцією якими можливо встановити зони відсутності взаємної ХС за умови однакового оператора еволюції. Це відкриває можливості для побудови інтегральних схем систем ближньої навігації групи мобільних роботів на базі використання СДХ.

Висновки

1. Розглянуто можливості використання сигналів детермінованого хаосу для вимірювання та контролю фізичних величин, запропоновано класифікаційні схеми особливостей вимірювального процесу та інформаційних вимірювальних параметрів.

2. На основі комп'ютерного моделювання ряду хаос-генераторів показано, що для систем ближньої навігації доцільно використовувати хаотичні генератори не менш як із 4-а фазовими змінними. Запропоновано для побудови системи ближньої навігації мобільних механізмів на площині застосувати властивості односпрямованої хаотичної синхронізації між опорним та веденим генераторами, що забезпечує підвищену прихованість дії, можливість визначення ближніх відстаней, розширення функціональних можливостей та високий рівень завадостійкості.

Література

1. Кузнецов С.П. Динамический хаос / Кузнецов С.П. – М. : Изд-во Физматлит, 2001. – 296 с.
2. Прикладне застосування теорії хаотичних систем у телекомунікаціях : монографія / [Ю. Я. Бобало, С. Д. Галюк, М. М. Климаш, Р. Л. Політанський] ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет "Львівська політехніка". – Львів; Дрогобич : Коло, 2015. – 184 с.
3. Мачехин Ю. П. Физические основы метрологии нелинейных динамических систем / Ю. П. Мачехин, Ю. С. Курской // Украинский метрологический журнал. – 2017. – № 1. – С. 8–10.
4. Метод параметричних вимірювань з використанням генератора хаотичних коливань / В.Ю. Кучерук, В.С. Маньковська // Вісник Інженерної академії України. – 2009. – № 1. – С. 116–120.
5. Fortuna L., Rizzo A., Frasca M., Branciforte M., Bartolone M. System for Detecting Distances Using Chaotic Signals. US Patent № 6738313. 2003. P. 11.
6. Sobhy M. I., Shehata A.R. Chaotic Radar Systems. Microwave Symposium Digest. IEEE MTT-S International. 2000. P. 1701–1704.
7. Голевич О. Б. Впорядкування ансамблів хаотичних сигналів та способи їх використання в надширокосмугових телекомунікаційних / О. Б. Голевич О. С. Пивовар, І. В. Троцишин // Цифрові технології. – Одеса, 2015. – № 17. – С. 181–191.
8. Guoyuan Qi, Shengzhi Du, Guanrong Chen, Zengqiang Chen, Zhuzhi Yuan. On a Four-dimensional Chaotic System. Chaos, Solitons and Fractals. 2005. No. 23. P. 1671–1682.

References

1. Kuznecov S.P. Dinamicheskij haos / Kuznecov S.P. – M. : Izd-vo Fizmatlit, 2001. – 296 s.
2. Prykladne zastosuvannya teorii khaotychnykh system u telekomunikatsiakh : monohrafiia / [Yu. Ya. Bobalo, S. D. Haliuk, M. M. Klymash, R. L. Polytanskyi] ; Ministerstvo osvity i nauky Ukrainy, Natsionalnyi universytet "Lvivska politehnika". – Lviv; Drohobych : Kolo, 2015. – 184 s.
3. Machehin Yu. P. Fizicheskie osnovy metrologii nelinejnyh dinamicheskikh sistem / Yu. P. Machehin, Yu. S. Kurskoj // Ukrainskij metrologicheskij zhurnal. – 2017. – № 1. – S. 8–10.
4. Metod parametrychnykh vymiryuvan z vykorystanniam heneratora khaotychnykh kolyvan / V.Iu. Kucheruk, V.S. Mankovska // Visnyk Inzhenernoi akademii Ukrainy. – 2009. – № 1. – S. 116–120.
5. Fortuna L., Rizzo A., Frasca M., Branciforte M., Bartolone M. System for Detecting Distances Using Chaotic Signals. US Patent № 6738313. 2003. P. 11.
6. Sobhy M. I., Shehata A.R. Chaotic Radar Systems. Microwave Symposium Digest. IEEE MTT-S International. 2000. P. 1701–1704.
7. Holeyvych O. B. Vporiadkuvannya ansambliy khaotychnykh syhnaliv ta sposoby yikh vykorystannia v nadshyrokosmuhovykh telekomunikatsiinykh / O. B. Holeyvych O. S. Pyvovar, I. V. Trotsyshyn // Tsyfrovii tekhnolohii. – Odesa, 2015. – № 17. – S. 181–191.
8. Guoyuan Qi, Shengzhi Du, Guanrong Chen, Zengqiang Chen, Zhuzhi Yuan. On a Four-dimensional Chaotic System. Chaos, Solitons and Fractals. 2005. No. 23. P. 1671–1682.

Рецензія/Peer review : 13.11.2019 р.

Надрукована/Printed : 02.01.2020

Рецензент: д.т.н., проф. Полікаровських О.І.