

DOI: 10.18372/2310-5461.69.20943

УДК 629.735.051:004.7 (043.3)

**О. Г. Варфоломеєва**, канд. техн. наук, доцент  
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій  
<https://orcid.org/0000-0001-7792-5886>  
E-mail: ogvar13@gmail.com;

**Л. В. Дакова**, канд. техн. наук, доцент  
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій  
<https://orcid.org/0000-0001-6104-8217>  
E-mail: Dacova@ukr.net;

**К. О. Домрачева**, канд. техн. наук, доцент  
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій  
<https://orcid.org/0000-0001-6126-7698>  
E-mail: domrachevakat@gmail.com;

**І. І. Торошанко**,  
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій  
<https://orcid.org/0009-0009-6275-1639>  
E-mail: itoroshanko@ukr.net;

## ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНИХ АГЕНТІВ ДЛЯ ЗБОРУ ДАНИХ У ДИНАМІЧНИХ СЕРЕДОВИЩАХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

### Вступ

Безпроводова сенсорна мережа (БСМ) складається з великої кількості радіодатчиків, розташованих (часто випадковим чином) у просторі в околиці спостережуваного об'єкта. Кожен елемент мережі складається із сенсорного, обчислювального та комунікаційного компонентів.

При належній організації інформаційного обміну та алгоритмічному забезпеченні БСМ мають істотні переваги і широку область застосування [1–6]. При розробці алгоритмів функціонування БСМ слід враховувати ряд вимог та обмежень, обумовлених такими особливостями їх використання:

1. Зважаючи на випадковий характер розподілу елементів у просторі, схильності елементів до відмов, а топології мережі до змін, застосовувані алгоритми та протоколи обміну повинні мати здатність до децентралізованої самоорганізації мережі [2, 6–8].

2. Окремий елемент має низькі обчислювальні та комунікаційні ресурси. Типовою причиною є обмежена ємність джерела енергії.

3. В процесі експлуатації з плином часу виникають зменшення точності параметрів датчиків (дрейф параметрів), що призводить до зміщення оцінок при вимірах [1, 9, 10].

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Детальний опис архітектури, орієнтованої для спеціалізованих сенсорних мереж або мереж датчиків, можна знайти в [1–2]. В цих роботах розглянуті загальні принципи побудови і керування сенсорними мережами, питання кластеризації вузлів мережі, використовувани протоколи інформаційного обміну, маршрутизації. Значну увагу приділяється питанням сфер застосування та пов'язаних з цим особливостей їх побудови.

В силу цих особливостей, сенсорні мережі потребують особливої уваги стосовно мінімізації енергоспоживання на більшості рівнів стека протоколів [4, 5], що досягається зменшенням об'ємів керуючої та вимірювальної інформації. Одним з перспективних напрямків досягнення поставленої мети є запровадження механізму спрямованої дифузії і мобільних агентів [6, 7]. При дослідженні сенсорних мереж у якості агента розуміють певний набір елементів програмного коду, розподілених між окремими мережними вузлами (сенсорами).

В роботі [11] дано визначення основних понять стосовно мобільних агентів, які відіграють ключову роль в сенсорних мережах. Поняття «агент» дуже близьке до поняття «система». Основними властивостями агентів є автономність роботи в деякому навколишньому середовищі,

можливість приймати і обробляти потік вхідної інформації, а також впливати на навколишнє середовище на основі результатів цієї обробки. Відзначено, що без взаємодії з іншими агентами для вирішення якої-небудь загальної цільової задачі його існування не має сенсу.

Поняття «мобільний агент» в [4] визначене як комп'ютерна сутність, здатна міркувати, використовувати мережеву інфраструктуру для роботи на іншому віддаленому сайті, шукати та збирати результати, співпрацювати з іншими сайтами та повертатися на домашній сайт після виконання покладених завдань.

Основні напрямки для подальшого розвитку систем управління мобільними агентами розглянуті в публікації [12]. До цих напрямків можна віднести розширення масштабу системи, підвищення стійкості до помилок, оптимізацію механізмів комунікації, а також покращення інтерфейсу користувача для зручнішого управління та моніторингу.

#### **Постановка задачі дослідження**

Ефективним засобом вирішення вказаних питань є використання в алгоритмічному забезпеченні БСМ методу керування з використанням мобільних агентів (МА). Приведемо основні визначення і відправні дані.

**Мобільний агент:** програмний код, який передається між вузлами мережі (радіодатчиками) і здійснює збір результатів вимірів і їх попередню обробку перед пересилкою даних в пункт керування, збору і обробки (ПКЗО). При цьому вихідний обсяг даних може бути зменшено шляхом ліквідації надмірності детермінованими методами і методами стохастичної оптимізації. Вказане рішення забезпечує суттєве зменшення енергетичних витрат на доставку даних в ПКЗО, що особливо важливо для сенсорних мереж з невідновлюваними джерелами енергії. Як впливає з визначень в [2, 3, 11, 12], система керування мобільними агентами (СКМА) – це програмне забезпечення, яке обслуговує чергу завдань і контролює процес їх виконання відповідно до призначення БСМ.

**Черга завдань:** упорядкований за пріоритетом чи іншими критеріями список завдань, які мають бути виконані СКМА.

**Максимальний час виконання завдання:** Алгоритм функціонування БСМ також визначає максимальний час виконання того чи іншого завдання. СКМА контролює виконання завдань і їх завершення в рамках встановленого часу.

**Моніторинг стану вузлів БСМ:** контроль дрейфу параметрів сенсорних елементів, з якими взаємодіють МА. На основі результатів контролю здійснюється оцінка продуктивності та рівня безпеки сенсорних вузлів і мережі в цілому.

Взаємодія МА з ПКЗО даних: у процесі виконання завдань МА взаємодіють із ПКЗО та між собою, надають в систему керування ПКЗО інформацію про свій поточний стан і отримують оновлені завдання (за необхідності) для виконання завдань БСМ.

*Метою роботи* є розробка рішень щодо способів корегування дрейфу параметрів радіодатчиків, що суттєво підвищує точність і достовірність результатів вимірів, які здійснюються датчиками сенсорної мережі. В онову розглянутих способів покладено використання безпошукових фільтрів Калмана [11]. Аналіз дрейфу параметрів здійснюється одночасно у щільній околиці найближчих датчиків [13].

Запропонована модифікована схема корегування результатів вимірів, в якій використовуються декілька фільтрів Калмана. Це рішення пов'язане з додатковими обчислювальними витратами, однак завдяки використанню паралельних і розподілених обчислень отримується більш швидке зменшення кількості похибок дрейфу, а ефективність алгоритму корекції дрейфу параметрів датчиків для мережі в цілому суттєво зростає.

#### **Модифікований метод мультиагентної взаємодії**

Мережа мультиагентної БСМ базується на використанні багаторівневої архітектури радіодатчиків та зв'язаних з ними інтелектуальних МА. В умовах функціонування сенсорної мережі МА можуть адаптуватися до змінного інформаційного середовища і у разі аварійного переривання з'єднання з ПКЗО працюють в автономному режимі. При відновленні з'єднання накопичена інформація не втрачається і може бути передана в ПКЗО.

В ПКЗО дані (результати вимірів) надходять у закодованому та стислому вигляді, отриманому в результаті роботи МА. Відповідно, на стороні ПКЗО повинна бути передбачена програма декодування цих даних та отримання оціночного значення результатів вимірів.

Організація мультиагентної взаємодії в БСМ з використанням інтелектуальних МА базується на наступних принципах керування [2, 6, 11, 12]:

- кожен МА в групі самостійно формує свої керуючі інструкції у поточній ситуації;
- формування керуючих інструкцій кожним МА здійснюється тільки на основі загального (спільного) завдання, що стоїть перед БСМ. При цьому враховується, власний поточний і попередній стан, а також поточні дії та керуючі інструкції інших МА;
- під оптимальним розуміється такі керуючі інструкції кожного МА в поточній ситуації, які

дають максимально можливе збільшення цільового функціоналу при переході системи з поточного стану в кінцевий;

– оптимальне керування реалізується кожним МА протягом найближчого відрізка часу у майбутньому, на основі якого визначаються нові керуючі інструкції.

Метод мультиагентного керування характеризується відносно низькою обчислювальною складністю алгоритмів [1, 3, 4]. Це забезпечує високу швидкість у прийнятті оптимальних рішень в умовах апріорної невизначеності і змінних ситуацій.

Для стохастичної оптимізації надмірності даних у БСМ може бути застосований керований дифузійний марківський процес  $\xi = \xi(t)$ , перехідна щільність ймовірності  $p(t, x, y)$  якого в  $\varepsilon$ -околиці кожної внутрішньої точки задовольняє зворотному рівнянню Колмогорова [15–17]:

$$\frac{\partial}{\partial t} = Lp, \quad L = \mathbf{A}(x) \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{B}(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2}, \quad \mathbf{B}(x) = \frac{1}{2} \mathbf{R}(x), \quad (1)$$

де  $\mathbf{A}(x)$  – вектор коефіцієнтів зносу розмірністю  $N$ ;  $\mathbf{B}(x)$  – матриця коефіцієнтів дифузії розмірністю  $N \times N$ ;  $\mathbf{R}(x)$  – кореляційна матриця розмірністю  $N \times N$ ;  $a_i(x)$ ;  $b_{ij}(x)$ ,  $i, j = \overline{1, N}$  – безперервні коефіцієнти, причому  $b_{ij}(x) > 0$ .

Для вирішуваної в статті задачі стохастичної оптимізації надмірності даних елементи  $a_i(x)$  вектора  $\mathbf{A}(x)$  визначають середнє відхилення від мінімального за кількістю транзитних вузлів маршруту передачі від джерела даних до ПКЗО. Очевидно, що при щільному і рівномірному просторовому розташуванні радіодатчиків таким маршрутом є пряма лінія.

Вирішення задачі керування полягає в оптимальному виборі величин  $\mathbf{A}(x)$  і  $\mathbf{B}(x)$ , при яких мінімізується обсяг керуючої інформації для простого пошуку оптимального числа маршрутів з обмеженням на енергоспоживання.

Для БСМ зі щільним просторовим розміщенням датчиків на поверхні або в просторі випадковий процес  $\xi(t)$  можна розглядати як керований стохастичним векторним диференціальним рівнянням такого виду [16, 17]:

$$d\xi(t) = \mathbf{A}[\xi(t)]dt + \mathbf{R}[\xi(t)]d\eta(t), \quad (2)$$

де  $\eta(t) = \frac{\xi(t) - \xi(t_0) - [\mathbf{A}(t) - \mathbf{A}(t_0)]}{\sqrt{|D(t) - D(t_0)|}}$  – процес броунівського руху;

$$|D(t) - D(t_0)| = \int_{t_0}^t \|\mathbf{B}(\tau)\| d\tau;$$

$\|\cdot\|$  – норма матриці.

Таким чином можна зробити висновок, що по суті процес передачі представляє собою процес спрямованої дифузії, що керується мобільними агентами. Об'єктом оптимізації дифузійного процесу (2) є сукупність маршрутів, які вибираються за багатьма критеріями. Як правило, ці критерії в тій чи іншій мірі є досить суперечливими. Найбільш вагомими є такі критерії оптимізації:

– співвідношення величини корисного (користувальницького) трафіку до загальної пропускної спроможності мережі. Це співвідношення характеризує ефективність використання мережі  $\eta_T$ ;

– ефективність використання датчиків  $\eta_E$  яка визначається як загальний об'єм прийнятих в ПКЗО даних до виходу з ладу будь-якого вузла через розряд джерела живлення.

Ефективність використання мережі розраховується за формулою

$$\eta_T = \frac{V_d N_{res}}{V_d N_d^\Sigma + V_s N_s^\Sigma},$$

де  $V_d$  і  $V_s$  – інтегральні обсяги користувальної та службової інформації, відповідно;  $N_{res}$  – загальна кількість прийнятих в ПКЗО нормалізованих інформаційних пакетів;  $N_d^\Sigma$  і  $N_s^\Sigma$  загальна кількість нормалізованих інформаційних та сигнальних пакетів, відповідно.

При розрахунку ефективності використання мережі враховуються також пакети, які передаються через транзитні вузли. Так, якщо для передачі пакета від джерела даних до ПКЗО використано один транзитний вузол (дві каналні ланки), вважається, що в мережі передано два пакети – «корисний» пакет і пакет ретрансляції. Зауважимо, що до загального трафіку реальної мережі входять також пакети, що передаються повторно при виявленні в них спотворень під час передачі.

Затримка передачі пакета від джерела до ПКЗО для звичайної спрямованої дифузії (СД)  $\tau_{dd}$  із врахуванням всіх можливих затримок в БСМ визначається наступним чином [6]:

$$\tau_{dd} = \frac{\tau_e}{n_p} + \left( \frac{s_d + s_h}{d_{MAC}} + \tau_c + \tau_a \right) (N_h + n_h), \quad (3)$$

де  $\tau_e$  – середній час формування маршруту передачі;  $n_p$  – кількість пакетів, що передаються;

$s_d$  і  $s_h$  – об'єми даних і заголовка в пакеті, відповідно;  $d_{MAC}$  – затримка даних у середовищі перенесення;  $\tau_c$  і  $\tau_a$  – середні затримки керування та доступу, відповідно;  $N_h$  – число каналних ланок оптимального маршруту з мінімальним числом вузлів;  $N_h + n_h$  – середня кількість ланок по всіх допустимих маршрутах.

Якщо кількість пакетів, що передаються до ПКЗО, набагато більше одиниці, вираз (3) спрощується:

$$\tau_{dd} \approx \left( \frac{s_d + s_h}{d_{MAC}} + \tau_c + \tau_a \right) (N_h + n_h). \quad (4)$$

Затримка передачі пакета від джерела до ПКЗО для спрямованої дифузії з мобільними агентами (СДМА)  $\tau_{ma}$  визначається як

$$\tau_{ma} = \sum_{k=1}^K \left( \tau_{ama} + \frac{s_d}{\tau_p} + \frac{s_{ma,k} + s_{pc} + s_h}{d_{MAC}} + \tau_c \right), \quad (5)$$

де  $K$  – кількість вузлів-джерел;  $\tau_{ama}$  – затримка передачі даних мобільним агентом до ПКЗО;  $\tau_p$  – коефіцієнт, який визначає витрати часу на обробку;  $s_{pc}$  – загальний обсяг доставлених даних;  $s_{ma,i}$  – розмір даних мобільного агента на  $k$ -му вузлі.

На основі виразів (3), (4), (5) отримані порівняльні характеристики клієнт-серверної архітектури (CS) і системи з мобільними агентами (МА) для середніх витрат енергії (рис. 1) і затримки передачі даних (рис. 2) з різними загальними обсягами. В роботах [3, 4, 15] показано, що для отримання прийнятних для практичного використання результатів розрахунки і моделювання доцільно проводити для мережі, що складається із 50...200 сенсорів. В нашому дослідженні розрахунки проводились для БСМ з використанням 18 мобільних агентів з об'ємом програмного коду приблизно в 10...12 разів менше об'єму переданих даних.

На рис. 1 і 2 для БСМ із 200 сенсорів суцільною лінією зображені графіки МА1 для алгоритму мобільних агентів і графіки CS1 для клієнт-серверного алгоритму. Пунктирною лінією зображені відповідні графіки МА2 і CS2 для мережі, що складається із 100 сенсорів. Як видно із приведених рисунків при збільшенні часу спостережень для обох випадків графіки практично співпадають.

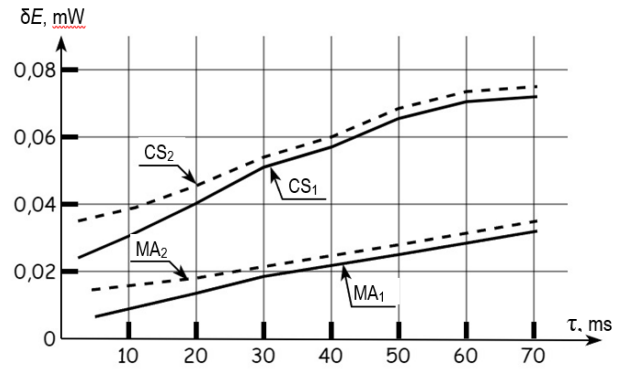


Рис. 1. Залежність середніх витрат енергії від часу спостережень

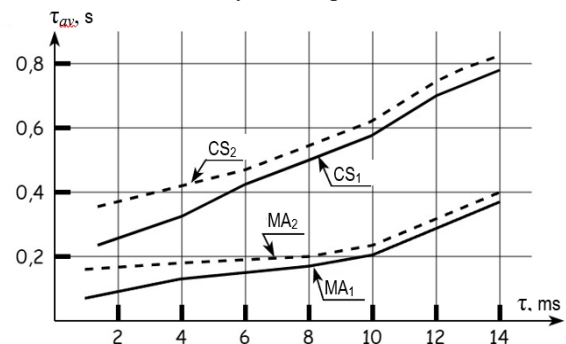


Рис. 2. Залежність затримки доставки даних від затримки доступу мобільних агентів

### Задача корегування дрейфу параметрів радіодатчиків

Як було зазначено у вступній частині статті в процесі експлуатації БСМ з плином часу втрачається точність параметрів датчиків (дрейф параметрів), що призводить до зміщення оцінок при вимірах [1, 2, 8–10]. В цьому випадку можна передбачати і корегувати результати вимірів одного з датчиків, враховуючи дані розташованих в найближчій просторовій околиці вузлів.

В роботі [10] для калібрування датчиків запропоновано застосування тестових посилок та оцінювання відгуку мережі, в якому приводиться дійсне значення параметра. Подальший розвиток цього методу представлений роботі [13] і він дістав назву спрямованого калібрування. Порівняння очікуваного та поточного відгуку служить основою для пошуку та усунення лінійного дрейфу. Розглянуті в [10, 13] методи виявились надто дорогими і часто непридатними для використання для БСМ мереж великого масштабу [8–10]. Завдання калібрування в сенсорних мережах слід розглядати як завдання статистичного оцінювання параметра в масштабах мережі [2, 15].

Моделі дрейфу можна описати поліноміальним, експоненціальним чи гармонійним (тригонометричним) трендами або їх комбінаціями [2, 5, 6].

Поліноміальний тренд представляється у вигляді:

$$\varphi_p(t) = \varphi_0 + at + bt^2 + \sigma\varphi(t_i), \quad (6)$$

де  $\sigma\varphi(t_i)$  – дискретний білий гаусівський шум;  $a$  і  $b$  – постійні коефіцієнти, що визначаються експериментальним шляхом;  $\varphi_0$  – точне значення параметра.

Експоненціальний тренд має вигляд

$$\varphi_{\text{exp}}(t) = \varphi_0 + k \left\{ 1 - \exp[\varphi(t_0 - t) + \xi\varphi(t)] \right\}. \quad (7)$$

де  $k$  – масштабний коефіцієнт;  $t_0$  – момент початку дрейфу параметрів.

Тригонометричний тренд описується виразом

$$\varphi_{tr}(t) = \varphi_0 + \sum_{l=1}^N k_l \sin(l\omega_0 t) + \xi\varphi(t), \quad (8)$$

де  $k_l = k_0 / l$  або  $k_l = k_0 \exp(-l^2 / l_0)$ ;  $k_0$ ,  $l_0$  – масштабні коефіцієнти, що підбираються експериментально.

Вирази (6), (7), (8) є основою для розробки алгоритму корекції дрейфу параметрів сенсорних датчиків в БСМ. Вхідними даними алгоритму є сегмент БСМ, що містить  $M$  датчиків. Нехай  $h_m(t)$ ,  $m = \overline{1, M}$  є дійсним вихідним параметром. Позначимо параметр, що вимірюється  $m$ -м датчиком в дискретний момент часу  $n$  в даній точці простору як  $g_{mn}$ . Скорегований параметр позначимо як  $g_{mn}^*$ . Якщо всі датчики відкалібровані безпомилково,  $g_{mn} = h_m(t_n) = h_{mn}$ . Для подальшої обробки передається отриманий вимір  $g_{mn}^* = g_{mn}$ .

Для оцінювання скорегованої величини  $g_{mn}^*$  кожен датчик знаходить передбачене значення  $f_{mn}^*$  як функцію результатів скоригованих вимірів, отриманих ближніми сенсорами на попередньому кроці:

$$f_{mn}^* = \psi(g_{mn}^*), \quad k = 1, M; \quad k \neq m. \quad (9)$$

Передбачена величина зіставляється з вимірною величиною  $g_{mn}$  та передбачуваним дрейфом  $d_{mn}$ , внаслідок чого отримуємо скорегований вимір датчика  $g_{mn}^*$ . На практиці кожен вимір крім дрейфу  $d_{mn}$  містить шуми та завади. Вважається що при початковому розгортанні БСМ всі датчики відрегульовані при їх виготовленні в заводських умовах і їх дрейф практично нульовий.

Завдання полягає у розрахунку дрейфу для кожного датчика з використанням передбаченої величини  $f_{mn}^*$ .

В БСМ корекція дрейфу здійснюється в реальному часі і складається із двох етапів. На першому етапі для передбачення вимірів  $g_{mn}^*$  використовується навчальний вектор регресії. Вхідними даними вектора є скореговані виміри найближчих датчиків. На другому етапі отримуються скореговані результати вимірів  $g_{mn}^*$ .

Ефективним способом рекурсивної корекції дрейфу  $g_{mn}$  є застосування фільтра Калмана з використанням вихідних значень  $f_{mn}^*$  вектора регресії [9, 14]. У фазі навчання для моделювання функції  $\varphi(\cdot)$  використовується навчальний набір даних, сформованих для початкового періоду розгортання БСМ. В процесі робочої фази навчена модель  $\varphi(\cdot)$  використовується для передбачення наступних результатів  $f_{mn}^*$ . Вважається, що початковий навчальний набір не містить дрейфу (калібрування при виготовленні) і може використовуватися для навчання в кожному вузлі.

Початковий набір навчальних даних у  $m$ -му датчику позначимо як  $G_{tr} = \{G_{n-1}, G_n\}$ , де  $G_{n-1} = (g_{k,n-1})$ ,  $k = 1, 2, \dots, m-1, m+1, \dots, M$ ,  $G_n = (g_{mn})$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ .

Модель, отримана на основі допоміжного вектора регресії, використовується протягом робочої фази для передбачення наступних фактичних вимірів  $f_{mn}^*$ . Для вимірювання дрейфу датчика обчислюється різниця між результатом вимірювання  $g_{mn}$  та модельним значенням компонента вектору регресії  $f_{mn}^*$ , яке використовується як опорний. Ця різниця спільно з  $g_{mn}$  вводиться в фільтр Калмана з випадковим пошуком (ФКВП) [9, 13] для оцінювання скоригованих результатів  $g_{mn}^*$  і величини дрейфу  $d_{mn}$ .

Зауважимо, що основною задачею для отримання найбільш точного вихідного значення  $h_{mn}$  є коректна оцінка вимірною значення  $g_{mn}$ . Математично вимога щодо повільності змін  $g_{mn}^*$  і  $d_{mn}$  формулюється як

$$g_{mn}^* = g_{m,n-1}^* + \xi_{mn}; \quad d_{mn} = d_{m,n-1} + \zeta_{mn},$$

де  $\xi_{mn}, \zeta_{mn}$  – випадкові процеси виду корельованого гаусівського шуму з нульовим математичним очікуванням і дисперсіями  $\sigma_\xi^2, \sigma_\zeta^2$  відповідно.

**Вдосконалена модель фільтру Калмана з випадковим пошуком**

Подальше вдосконалення ФКВП здійснюється шляхом перекриття можливого діапазону значень дрейфу  $D_{mn}^* = |d_{mn\max} - d_{mn\min}|$ . Корегування дрейфу здійснюється одночасно в  $m$  датчиках БСМ або мережного сегмента.

На рис. 3 зображена структурна схема системи корекції дрейфу в БСМ на основі вдосконаленого безпошукового фільтру Калмана.

Запропонований алгоритм оцінювання величини дрейфу відрізняється від розглянутого вище рішення тим, що дрейф параметрів аналізується одночасно у щільній околиці найближчих датчиків.

Це рішення пов'язане з додатковими обчислювальними витратами і потребує паралельних обчислень. Однак, завдяки розпаралелюванню отримуємо більш швидке зменшення кількості похибок дрейфу, а ефективність алгоритму корекції для БСМ суттєво зростає..

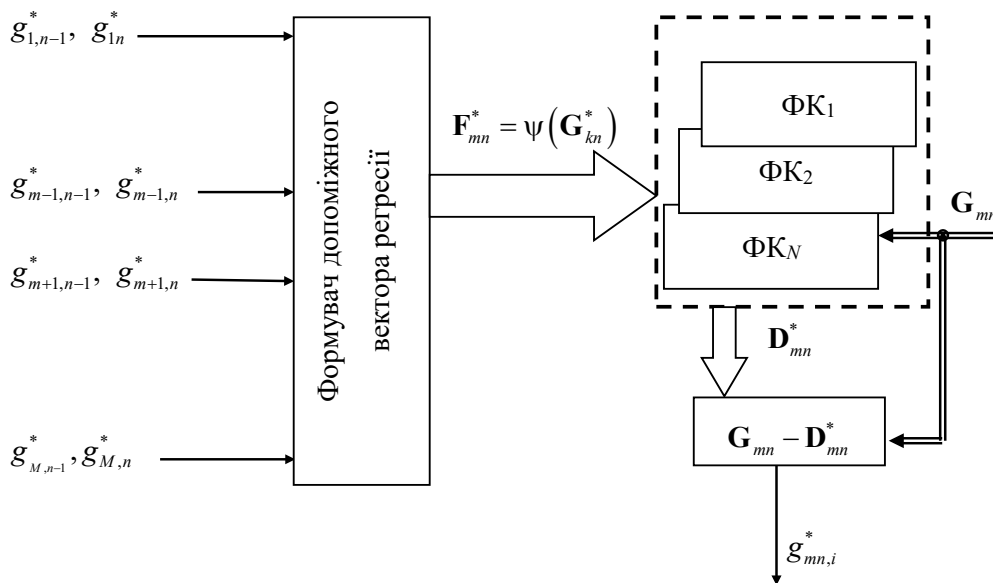


Рис. 3. Структурна схема системи корекції дрейфу

Реалізація методу полягає у знаходженні статистичних даних випадкового вектора  $Y$ , над яким здійснюється нелінійне перетворення  $Y = \Psi(X)$ . Вектор  $X$  – випадковий вектор, коваріаційна матриця якого визначена як  $R_X$ , а вектор математичних очікувань  $X^*$ . Для формування статистичних даних згідно перетворенню  $\Psi(\cdot)$  вибираються  $(2L + 1) \times (2L + 1)$  детермінованих вагових коефіцієнтів (сігма-точок)  $\sigma_i = \{v_i, x_i\}$ , область значень яких повністю охоплює істинне математичне очікування і коваріацію випадкового вектора  $X$  ( $L$  – розмірність вектора  $X$ ).

Алгоритм відбору сігма-точок в зазначеній області значень (істинне математичне очікування і коваріація) описується рівняннями:

$$\begin{cases} x_0 = x^*, & c_0 = \lambda / (\lambda + L), & c_{0i} = \frac{\lambda}{\lambda + L} + (1 - a^2 + b); \\ x_i = x^* + [\sqrt{(\lambda + L)P}]_i, & c_i = \frac{1}{2(\lambda + L)}; \\ x_{L+i} = x^* - [\sqrt{(\lambda + L)P}]_{L+i}, & c_{L+i} = \frac{1}{2(\lambda + L)}, \end{cases}$$

де  $\lambda_s = \alpha^2 (L + k_s)$ ;  $L$  – розмірність вектора  $X$  (параметр масштабу),  $i = 1, \dots, L$ ;  $\alpha$  – розмір околиці сігма-точки навколо математичного очікування  $X^*$ ;  $k_s$  – другий параметр масштабу, який в вихідному стані встановлюється рівним нулю;  $P$  – параметр, що використовується для введення апріорних даних про розподіл  $X$ . Оптимальна величина цього параметру для гаусівського розподілу  $P = 2$ .

Член  $\left(\sqrt{(\lambda + L)P}\right)_i$  – представляє собою квадратні корені з елементів матриці коваріацій

$$\|(\lambda + L)P\|.$$

Тут  $\alpha = 0,001$ ;  $\beta = 0$ ;  $k = 0$ ;  $P = 2$ .

Алгоритм оцінювання стану БСМ і корегування дрейфу параметрів  $m$ -го датчика в найближчій околиці датчиків приведено на рис. 4. Для оцінювання результатів вимірювання  $G_{mn}^*$  використовується БПФК. Алгоритм є рекурсивним і працює безперервно протягом всього життєвого циклу датчика та БСМ.



Рис. 4. Алгоритм корегування дрейфу параметрів  $m$ -го датчика

## Висновки

В представленій роботі розглянуто особливості функціонування необслуговуваних безпроводових сенсорних мереж з випадковим стохастичним розташуванням елементів у просторі. Проаналізовано і сформульовано основні вимоги до їх побудови:

а) Здатність до децентралізованої самоорганізації мережі, що пояснюється випадковим взаємним розташуванням датчиків, можливими неконтрольованими змінами топології, а також відмовами елементів в процесі експлуатації мережі;

б) Низькі обчислювальні та комунікаційні ресурси через обмежену ємність невідновлюваних джерел живлення радіодатчиків. Актуальною постає задача розробки і використання енергозберігаючих технологій;

в) В процесі експлуатації виникає непередбачуваний дрейф параметрів датчиків і зменшення точності вимірів.

Для забезпечення отримання об'єктивних оцінок вимірів необхідно в реальному часі проводити постійнодіюче автокалібрування датчиків.

1. Для вирішення задачі енергозбереження проведений аналіз детермінованих і стохастичних методів з використанням мобільних агентів. Для усунення обмежень детерміністського підходу пропонується застосовувати спосіб керованої спрямованої дифузії, заснований на теорії марківських процесів. Розроблений вдосконалений метод керування мережею, в якому поєднані детермінований і стохастичний метод.

Показано, що в процесі керування з використанням мобільних агентів підтримується оптимальна швидкість передачі з обмеженнями на енергоспоживання датчиків. Розроблений узагальнений метод мінімізації об'єму пучка маршрутів по критеріях швидкості доставки з обмеженням на енергоспоживання.

2. Проведено аналіз способів корекції дрейфу параметрів і автокалібрування датчиків в реальному часі. Розроблений метод виявлення помилок і корекції результатів вимірювань датчиків в БСМ, заснований на припущенні про просторово-часову кореляцію результатів вимірювань у сусідніх датчиках і відсутність взаємної кореляції процесів дрейфу технічних параметрів.

Розглянуті рішення щодо способів корегування дрейфу параметрів радіодатчиків, в основу яких покладено використання безпошукових фільтрів Калмана. Отримані аналітичні вирази для обчислення прогнозних майбутніх результатів вимірювань для оцінювання дійсних значень вимірюваних величин. На основі отриманих прогнозних значень вимірів від найближчих сусідніх датчиків здійснюється взаємна корекція власних вимірів датчика.

Запропонована модифікована схема корегування результатів вимірів, в якій використовуються декілька фільтрів Калмана. Аналіз дрейфу параметрів здійснюється одночасно у щільній околиці найближчих датчиків. Це рішення пов'язане з додатковими обчислювальними витратами,

однак завдяки використанню паралельних і розподілених обчислень отримується більш швидке зменшення кількості похибок дрейфу, а ефективність алгоритму корекції дрейфу параметрів датчиків для мережі в цілому суттєво зростає.

### ЛІТЕРАТУРА

- [1] Roy Radhika Ranjan. Handbook of Mobile Ad Hoc Networks for Mobility Models. Springer Science+Business Media, LLC, 233 Spring Street, NY 10013, USA, 2011. 1103 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6050-4>
- [2] Barabash Oleg, Valentyn Sobchuk, Andrii Sobchuk, Andrii Musienko, and Oleksandr Laptiev. Topological Aspects of Designing Functionally Robust Wireless Sensor Networks. *Advanced Information Systems*. 2025. 9(4), P. 28–38. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2025.4.05>
- [3] Jie Zhang, and Haibo Pu. Fast Data Acquisition Algorithm for Remote Monitoring System of Smart Home. *International Journal of Computers and Applications*. Volume 44, 2022, Issue 8. 9 p. <https://doi.org/10.1080/1206212X.2019.1667092>
- [4] Abdelkader Outtagarts. Mobile Agent-Based Applications: a Survey. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*. Vol. 9, No. 11, November 2009. PP. 331–339. [http://paper.ijcsns.org/07\\_book/200911/20091149.pdf](http://paper.ijcsns.org/07_book/200911/20091149.pdf)
- [5] David Rodriguez-Castellanos, Marco Blas-Valdez, Gualberto Solis-Perales, and Marco Antonio Perez-Cisneros. Neural Robust Control for a Mobile Agent Leader–Follower System. *Appl. Sci*. 2024, 14(13), 5374. 15 p. <https://doi.org/10.3390/app14135374>
- [6] Waseem A., Sethi P., and Chauhan N. Secured Directed Diffusion Using Mobile Agents. *International Journal of Computer Applications*. July 2013. Vol. 73. No. 21. – PP. 32–36. <https://doi.org/10.5120/13020-0184>
- [7] Petrivskiy Volodymyr, Viktor Shevchenko, Serhii Yevseiev, Oleksandr Milov, Oleksandr Laptiev, Oleksii Bychkov, Vitalii Fedoriienko, Maksim Tkachenko, Oleg Kurchenko, and Ivan Oprisky. Development of a Modification of the Method for Constructing Energy-Efficient Sensor Networks Using Static and Dynamic Sensors. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 1, №9 (115), 2022. PP. 15–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252988>
- [8] Bychkovskiy V., Megerian S., Estrin D., and Potkonjak M. A Collaborative Approach to In-Place Sensor Calibration. *Int. Workshop on Information Processing in Sensor Networks*. 2003. PP. 301–316. <https://doi.org/10.5555/1765991.1766012>
- [9] Balzano L., and Nowak R. Blind Calibration of Networks of Sensors: Theory and Algorithms. *Networked Sensing Information and Control*. Springer US. 2008. – PP. 9–37. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-68845-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-68845-9_1)
- [10] Taylor C., Rahimi A., Bachrach J., Shrobe H. and Grue A. Simultaneous Localization, Calibration, and Tracking in an Ad Hoc Sensor Network. *Proceedings of 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN06)*. 2006. PP. 27–33. <https://doi.org/10.1145/1127777.1127785>
- [11] Козелкова Е. С., Горошанко Я. И., Харлай Л. А. Управление потоками данных в цифровых телекоммуникационных сетях с разнородным трафиком. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації»*. 2016. № 849. С. 210–217.
- [12] Яровий О. В., Завгородній В. В. Розробка структурної схеми системи управління мобільними агентами. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023, Том 34(73), № 4. С. 124–128. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/20>
- [13] Feng J., Megerian S., and Potkonjak M. Model-Based Calibration for Sensor Networks, *Sensors*. 2003. PP. 737–742.
- [14] Hoadley B. A Bayesian Look At Inverse Linear Regression. *J. of the American Stats. Association* 65(329). 1970. PP. 356–369.
- [15] Catherine Forbes, Merran Evans, Nicholas Hastings, and Brian Peacock. *Statistical Distributions: 4-th Edition*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2011. 212 p.
- [16] Alessandro Di Giorgio, Antonio Pietrabissa, Francesco Delli Priscoli, and Alberto Isidori. Linear Differential-Algebraic Systems. *IEEE Control Systems Letters*. 2018, Vol. 2, No. 3. PP. 477–482. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2018.2841805>
- [17] Erdman J. M. Exercises and Problems in Linear Algebra. *Portland State University*. July 13, 2014. 196 p.

**Варфоломесєва О. Г., Дакова Л. В., Домрачева К. О., Торошанко І. І.**  
**ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНИХ АГЕНТІВ ДЛЯ ЗБОРУ ДАНИХ У ДИНАМІЧНИХ**  
**СЕРЕДОВИЩАХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ**

*Розглядається проблема збору результатів вимірювань та оптимізації трафіку в сенсорних мережах із щільним покриттям території. Розв'язання задачі базується на декореляції даних, тобто усуненні їх надмірності. Проведено аналіз детермінованих та стохастичних методів із використанням мобільних агентів. Для усунення обмежень детермінованого підходу запропоновано застосувати метод керованої спрямованої дифузії, заснований на теорії керованих марковських процесів. Розроблено вдосконалений метод управління мережею, що поєднує детермінований та стохастичний підходи. У процесі управління з використанням мобільних агентів підтримується оптимальна швидкість передачі даних з обмеженнями на енергоспоживання датчиків. Розроблено узагальнений метод мінімізації обсягу пучка маршрутів за критерієм швидкості доставки з обмеженнями на енергоспоживання.*

*Розроблено метод виявлення помилок та корекції результатів вимірювань датчиків у бездротових сенсорних мережах, заснований на припущенні про просторово-часову кореляцію результатів вимірювань сусідніх датчиків та відсутність взаємної кореляції процесів дрейфу технічних параметрів. Математичною основою методу є фільтр Калмана без пошуку. Отримано аналітичні вирази для обчислення прогнозованих майбутніх результатів вимірювань. У фільтрі Калмана без пошуку використовуються векторні дані прогнозу для оцінки фактичних значень вимірюваних величин. Запропоновано модифіковану схему корекції результатів вимірювань, в якій дрейф параметрів аналізується одночасно в щільному оточенні найближчих датчиків. Це рішення пов'язане з додатковими обчислювальними витратами, однак завдяки паралелізації досягається швидше зменшення кількості помилок дрейфу, а ефективність алгоритму корекції дрейфу параметрів датчиків для мережі в цілому значно зростає.*

**Ключові слова:** сенсорні мережі, мобільний агент, енергоспоживання сенсорів, дрейф параметрів сенсорів, алгоритм корекції дрейфу, фільтр Калмана.

**Varfolomeeva O., Dakova L., Domracheva K., Toroshanko I.**  
**THE USE OF MOBILE AGENTS FOR DATA COLLECTION IN DYNAMIC**  
**SENSOR NETWORK ENVIRONMENTS**

*The problem of measurement results gathering and optimizing traffic in sensor networks with dense coverage of the territory is considered. The solution to the problem is based on data decorrelation, i.e., the elimination of their redundancy. An analysis deterministic and stochastic methods using mobile agents is carried out. To eliminate the limitations of the deterministic approach, it is proposed to apply the method of controlled directed diffusion, based on the theory of controlled Markov processes. An improved network control method has been developed, which combines the deterministic and stochastic methods. In the control process using mobile agents, the optimal transmission rate is maintained with restrictions on the energy consumption of sensors. A generalized method for minimizing the volume of the bundle of routes by the criteria of delivery speed with restrictions on energy consumption has been developed.*

*A method for detecting errors and correcting sensor measurement results in the wireless sensor networks has been developed, based on the assumption of spatiotemporal correlation of measurement results in neighboring sensors and the absence of mutual correlation of drift processes of technical parameters. The mathematical basis of the method is the Kalman non-search filtering. Analytical expressions for calculating the predicted future measurement results have been obtained. Vector forecast data are used in the Kalman non-search filter to estimate the actual values of the measured quantities. A modified measurement result correction scheme is proposed, in which the parameter drift is analyzed simultaneously in a dense neighborhood of the nearest sensors. This solution is associated with additional computational costs, however, due to parallelization, a faster reduction in the number of drift errors is obtained, and the efficiency of the sensor parameter drift correction algorithm for the network as a whole significantly increases.*

**Keywords:** sensor networks, mobile agent, sensor energy consumption, sensor parameter drift, drift correction algorithm, Kalman filter.

Дата першого надходження: 23.12.2025 р.

Дата прийняття до друку: 10.03.2026 р.

Дата публікації: 27.04.2026 р.