

УДК 629.735.051:004.7 (043.3)

**МЕТОД ВИМІРЮВАНЬ У БЕЗПРОВІДНИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖАХ
ДАТЧИКАМИ З ПОВІЛЬНИМ ДРЕЙФОМ ПАРАМЕТРІВ**

Торошанко О.С.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
toroshanko@ukr.net*

**МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ
ДАТЧИКАМИ С МЕДЛЕННЫМ ДРЕЙФОМ ПАРАМЕТРОВ**

Торошанко А.С.

*Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
toroshanko@ukr.net*

**METHOD FOR MEASUREMENTS IN WIRELESS SENSOR
NETWORKS WITH SENSORS WITH SLOW DRIFT OF PARAMETERS**

Toroshanko O.S.

*O. S. Popov Odessa national academy of telecommunication,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
toroshanko@ukr.net*

Анотація. Розроблений метод підвищення точності вимірювань у безпроводних сенсорних мережах. Метод заснований на виявленні помилок і корекції результатів вимірювань. Скориговані результати використовуються для фільтрації і прогнозу дрейфу параметрів датчиків. Проаналізовані структури та принципи побудови мобільних агентів в апаратній та програмній реалізації. Запропоновані математичні моделі повільного дрейфу параметрів датчиків у спеціалізованій безпроводній сенсорній мережі, що складається з багатьох сенсорів і пункту збирання даних. При взаємній корекції дрейфу параметрів датчиків знижуються помилки вимірювань і продовжується життєвий цикл ефективного функціонування мережі, що особливо актуальне для мереж, доступ до яких утруднений з різних причин. Запропонований метод заснований на припущенні про просторово-часову кореляцію результатів вимірювань у сусідніх датчиках і відсутність взаємної кореляції процесів дрейфу технічних параметрів.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, радіодатчик, дрейф параметрів, безпошуковий фільтр Калмана, сигма-точки, марковський процес.

Аннотация. Разработан метод повышения точности измерений в беспроводных сенсорных сетях. Метод основан на обнаружении ошибок и коррекции результатов измерений. Скорректированные результаты используются для фильтрации и прогноза дрейфа параметров датчиков. Проанализированы структуры и принципы построения мобильных агентов в аппаратной и программной реализации. Предложены математические модели медленного дрейфа параметров датчиков в специализированной беспроводной сенсорной сети, которая состоит из многих сенсоров, и пункта сбора данных. При взаимной коррекции дрейфа параметров датчиков снижаются ошибки измерений и продлевается жизненный цикл эффективного функционирования сети, что особенно актуально для сетей, доступ к которым затруднен по различным причинам. Предложенный метод основан на предположении о пространственно-временной корреляции результатов измерений в соседних датчиках и отсутствии взаимной корреляции процессов дрейфа технических параметров.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, радиодатчик, дрейф параметров, беспоисковый фильтр Калмана, сигма-точки, марковский процесс.

Abstract. A method for increasing the accuracy of measurements in wireless sensor networks has been developed. The method is based on the detection of errors and correction of measurement results. The corrected results are used to filter and predict the drift of the sensor parameters. Structures and principles of construction of mobile agents in hardware and software representation are analysed. Advantages of group application of agents are: a greater range of action, achieved through the dispersal of agents throughout the work area; an extended set of executable functions, which is achieved by installing on each agent of individual executing devices; higher probability of a task accomplished by the possibility of redistribution of goals among group agents in the event. The necessity of developing methods for automatic calibration of sensors in wireless sensor networks is substantiated. To solve this problem, a method of iterative evaluation and correction of measurement results is proposed. There are offered the mathematical models of slow sensors parameters drift in specialized wireless sensor network, which have a lot of sensors and one sink point. At the mutual correction of sensors parameters drift the errors of measuring are reduced and the life cycle of the effective functioning of network is prolonged. It is especially important for networks, access to which is difficult for some reasons. The method of errors detection and correction of results of sensors measuring in wireless sensory networks is offered. The method is based on supposition about spatio-temporal correlation of measuring results in nearby sensors and absence of cross-correlation of technical parameters drift.

Key words: wireless sensor network, radio sensor, drift of parameters, no search Kalman filter, and sigma-points, Markovian process.

Спеціалізовані безпроводні сенсорні мережі (БСМ) або мережі радіодатчиків містять значну кількість засобів обробки сигналів (елементів), які часто розміщуються в області спостереження випадковим чином. Крім того, доступ до елементів БСМ може бути важкий або взагалі неможливий (наприклад, для мереж військового або критичного застосування).

Тому при розробці методів обслуговування спеціалізованих БСМ виникає низка вимог і обмежень. Вони обумовлені, зокрема, наступними особливостями [1, 2]:

1. З огляду на випадковість характеру розподілу елементів у просторі, ризик відмов елементів, неконтрольованих змін топології мережі алгоритми і протоколи обміну, що застосовуються, БСМ повинні мати здатність до децентралізованої самоорганізації [3, 4].

2. Окремий елемент має низькі обчислювальні і комунікаційні ресурси. Іншими словами, він здатний зберігати, переробляти і передавати відносно малу кількість інформації за одиницю часу. Типовою причиною служить обмежена ємність джерела енергії.

3. Елементи передають дані на близьких частотах, через що виникають взаємні перешкоди і спотворення даних.

4. Часто елементи не мають індивідуальних ідентифікаторів. В результаті джерела отриманої інформації виявляються анонімними.

5. В процесі експлуатації мережі має місце зміщення оцінок при вимірах [5], викликані дрейфом параметрів датчиків.

Метою статті є дослідження і розробка методу підвищення точності вимірювань датчиків у безпроводних сенсорних мережах шляхом виявлення помилок і корекції поточних результатів. Метод заснований на припущенні про просторово-часову кореляцію результатів вимірювань у сусідніх датчиках і відсутність взаємної кореляції процесів дрейфу технічних параметрів.

Якщо для подолання обмежень організаційного та програмно-алгоритмічного характеру (див. наведені вище п. 1 – 4) в даний час розроблені відповідні методи керування і контролю [6], то проблеми усунення дрейфу параметрів до цього часу повністю не вирішені. Для сенсорних мереж (мереж радіодатчиків) великого масштабу, що містять значну кількість датчиків одноразового застосування, калібрування необхідно проводити досить часто. Вручну проводити калібрування датчиків у такій мережі практично нереально. Отже, необхідно розробляти методи автоматичного калібрування датчиків у сенсорних мережах. Для вирішення цієї проблеми доцільне застосування безпошукового фільтра Калмана з розподіленим мультиагентним керуванням.

Постановка задачі. Розглянемо принципи розподіленого мультиагентного керування комп'ютерними системами. Поняття "агент" дуже близьке до поняття "система". Основними властивостями агентів є:

- автономність роботи в деякому навколишньому середовищі;
- можливість приймати потік вхідної інформації, що надходить від навколишнього середовища;
- можливість обробляти інформацію у реальному часі;
- можливість впливати на навколишнє середовище на основі результатів цього оброблення.

Найбільш часто під агентом розуміють якусь самостійну підсистему, що має можливість мати вплив від зовнішнього світу, визначати свою реакцію на цей вплив і здійснювати цю реакцію [4, 6]. Без взаємодії з іншими агентами для розв'язання будь-якої загальної цільової задачі його існування не має сенсу.

У комп'ютерних системах та мережах під мобільними агентами, як правило, розуміють програмний код, який розділяється на фрагменти [4...6]. При передачі цих фрагментів вихідний обсяг даних може бути зменшений за допомогою ліквідації надлишковості детермінованими методами. Однак тут повинні бути виконані наступні вимоги:

- архітектура сенсорної мережі заснована на інфраструктурному кластерному підході;
- вузли-джерела даних розташовано на відстані одного переходу від ядра кластера;
- надлишковість виникає в даних, які можуть бути об'єднані в один пакет даних з фіксованим розміром.

Основною відмінністю підходу, що базується на принципах мультиагентного керування [4, 7], є відносно низька обчислювальна складність алгоритмів, що його реалізують. Це дозволяє швидко приймати оптимальні або близькі до них рішення в умовах мінливої ситуації.

Переваги групового застосування агентів:

- більший радіус дії, що досягається за рахунок розосередження агентів по всій робочій зоні;
- розширений набір виконуваних функцій, що досягається за рахунок установки на кожен агент індивідуальних виконавчих пристроїв;
- більш висока ймовірність виконання завдання, що досягається за рахунок можливості перерозподілу цілей між агентами групи в разі виходу з ладу деяких із них.

Такі завдання як, наприклад, масштабне дослідження і зондування поверхні інших планет, збирання складних конструкцій в космосі і під водою, участь в бойових операціях, розмінування територій та ін. можуть ефективно вирішуватися за допомогою мобільних агентів тільки за їх групової взаємодії.

На рис. 1 показаний формат пакета мобільного агента.

Фіксовані атрибути

<i>SinkID</i>	<i>MA SeqNum</i>	<i>FirstSrc</i>	<i>LastSrc</i>	<i>RoundIdx</i>	<i>LastRoundFlag</i>
---------------	------------------	-----------------	----------------	-----------------	----------------------

Змінні атрибути

<i>NextSrc</i>	<i>NextHop</i>	<i>ToSinkFlag</i>	<i>SrcList</i>
----------------	----------------	-------------------	----------------

Призначена для користувача інформація

<i>Processing code</i>	<i>Data</i>
------------------------	-------------

Рисунок 1 – Формат пакета мобільного агента

Дані $SinkID$ і MA_SeqNum використовуються для ідентифікації пакета. При запиті нового пакета дані MA_SeqNum збільшуються на одиницю.

$FirstSrc$ і $LastSrc$ – вузли-джерела, відвідування яких мобільним агентом заплановане в першу й останню чергу відповідно.

$RoundIdx$ – індекс поточного циклу опитування. $LastRoundFlag$ – ознака того, що поточний цикл є останнім у завданні.

$NextSrc$, $NextHop$, $ToSinkFlag$, $SrcList$ – динамічні параметри маршруту міграції мобільного агента. Маршрут міграції вибирається таким чином. Вибираються вузли-джерела $FirstSrc$ і $LastSrc$. Послідовно генеруються номери відвідування кожного з чергових вузлів. Потім відшукується маршрут переходу від джерела до пункту збирання й оброблення.

В осередку $Processingcode$ містяться правила оброблення даних, в осередку $Data$ – накопичуваний результат, який збільшується в процесі міграції мобільного агента від вузла до вузла.

Керування датчиками та контроль дрейфу параметрів вимірювача. Завдяки фрагментації програмного коду теоретично можливо оцінювати не тільки результати вимірювань, але і дрейф параметрів вимірювача (наприклад, координат його розміщення). Отримані оцінки використовуються для корекції і як зворотний зв'язок для наступного кроку оцінки. У той самий час потрібно уникати проблем перехресного керування для датчиків, що отримують керуючі сигнали від незалежних агентів [8].

У даній статті узагальнено умови контролю перехресного керування для спеціалізованих БСМ як мультиагентних динамічних систем, що описуються у класі нелінійних динамічних систем зі спеціальною розподіленою структурою. Датчики розподілені за випадковим законом в обмеженій геометричній області.

На практиці параметри закону розподілу датчиків невідомі, більш того, іноді має місце й непараметрична апріорна невизначеність. Тоді умови контролю запобігання перехресному керуванню встановлюються для загальної системи, подібно до сумісної стійкості для взаємозв'язаних систем. Датчики групуються у фрагменти (кластери) за мірою близькості розташування один до одного. Передбачається, що результати вимірювань є просторово-часовими функціями, а датчики, що знаходяться всередині сегмента, можуть обмінюватися між собою даними вимірів. Кожен агент асоціюється з множиною станів Ω_s .

З плином часу в деяких вузлах при зніманні даних може мати місце дрейф параметрів. При перевищенні деякого рівня величини дрейфу дані, отримувані від мережі, стають недостовірними. Щоб пом'якшити проблему дрейфу в кожному датчику мережі необхідно виявляти і коригувати власний дрейф, використовуючи зворотний зв'язок за даними від сусідніх вузлів. Це пов'язано з тим, що дані від вузлів у межах деякого околу (кластера) корельовані, в той час як кореляція помилок або дрейфу практично відсутня. При виявленні та своєчасній корекції дрейфу параметрів можна домогтися збільшення ефективної тривалості життєвого циклу мережі.

Модель дрейфу описується поліноміальним (1), експоненціальним (2) або гармонійним (3) трендом [4, 9].

$$\varphi_p(t) = \varphi_0 + at + bt^2 + \sigma\varphi(t_i), \quad (1)$$

де $\sigma\varphi(t_i)$ – дискретний білий гауссівський шум; a і b – постійні коефіцієнти, які визначаються експериментально; φ_0 – точне значення параметра.

$$\varphi_{\text{exp}}(t) = \varphi_0 + k \left\{ 1 - \exp \left[\varphi(t_0 - t) + \xi\varphi(t) \right] \right\}, \quad (2)$$

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

$$\varphi_{\text{tr}}(t) = \varphi_0 + \sum_{l=1}^N k_l \sin(l\omega_0 t) + \xi\varphi(t), \quad (3)$$

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.

Як показано у [4], задача емпіричного апріорного оцінювання коефіцієнтів дрейфу в (1)...(3) є досить складною і трудомісткою. Для її розв'язання потрібно виконати експериментальні дослідження великого обсягу. Тому при дослідженні методів калібрування датчиків з використанням моделей виду (1)...(3) простіше отримати асимптотичні оцінки ефективності за вибраних відповідним чином граничних значень даних коефіцієнтів. Грунтуючись на цих вихідних даних, можна побудувати алгоритм корекції дрейфу параметрів датчика у процесі його функціонування.

Ітеративна оцінка і корекція результатів з використанням двоетапної процедури.

Виходячи з фізичних міркувань, кореляційна функція реальних потоків даних має нульову першу похідну при нульовому просторовому зсуві. Використовуємо цей висновок для обґрунтування виду кореляційної функції на основі феноменологічного підходу. У рамках цього підходу для однорідного й ізотропного просторового розподілу датчиків використовуємо кореляційну функцію виду

$$R(x) = \sigma_{\xi}^2 \exp \left[-\frac{|x|}{l_a} + \frac{|x|}{l_a} \exp \left(-\frac{|x|}{l_b} \right) \right], \quad (4)$$

де l_a і l_b – так звані характеристичні інтервали між датчиками поверхні.

При $l_a \gg l_b$ кореляційна функція на інтервалі $|x| \approx (2...3)l_b$ досить точно апроксимується експонентною функцією $r_h(x) \approx \exp[-|x|/l_a]$.

При $|x| \ll l_b < l_a$ функція $r(x) = r''(0) \frac{x^2}{2}$, що відповідає гауссівській функції, розкладеній в ряд Маклорена з утриманням членів до квадратичного включно. Легко показати, що $r'(0) = 0$, а $r''(0) = -\frac{2}{l_a l_b}$.

Нарешті, привабливою властивістю даної кореляційної функції є саме її двомасштабність – наявність двох формально незалежних параметрів l_a і l_b , які можна змінювати у широких межах. Це дозволяє використовувати кореляційну функцію для широкого діапазону просторових розподілів датчиків зі згущеннями й великими розривами, у тому числі й штучного походження (наприклад, деякі датчики спеціально відключені, їх енергетичний ресурс вичерпаний або вони фізично ушкоджені).

Задача керування полягає в оптимальному виборі величин $A(x)$ і $B(x)$, за якого мінімізується обсяг трафіка для простого пошуку оптимального числа маршрутів з обмеженням на енергоспоживання та з урахуванням асиметрії якості зв'язку між послідовними вузлами.

Після початкового конфігурування мережі (виявлення, обмін даними про географічні координати сусідів і т.п.) всі вузли починають періодичне передавання пакетів даних у точку збирання. У точці збирання обчислюються оцінки коефіцієнтів кореляції між пакетами, що надійшли різними маршрутами, і розраховуються постійні l_a і l_b .

Як модель механізму маршрутизації застосовується дифузійний марковський процес [10], перехідна щільність ймовірності якого в ε -околі кожної внутрішньої точки задовольняє зворотному рівнянню Колмогорова:

$$\frac{\partial}{\partial t} = Lp; \quad L = A(x) \frac{\partial}{\partial x} + B(x) \frac{\partial^2}{\partial x^2}; \quad B(x) = \frac{1}{2} R(x). \quad (5)$$

Результати розрахунків підставляються в модель (5), яка використовується в завданні керування дифузійним процесом [10, 11]:

$$d\xi(t) = A[\xi(t)]dt + R[\xi(t)]d\eta(t), \quad (6)$$

де $\eta(t) = \frac{\xi(t) - \xi(t_0) - [A(t) - A(t_0)]}{\sqrt{|D(t) - D(t_0)|}}$; $|D(t) - D(t_0)| = \int_{t_0}^t \|B(\tau)\| d\tau$ – процес броунівського руху; $\|\cdot\|$ – норма матриці.

Керований дифузійний процес (6), по суті, являє собою набір маршрутів із багатокритеріальною стохастичною оптимізацією [11, 12]. Обрані наступні критерії оптимізації:

а) ефективність використання мережі ηT – відношення обсягу корисного трафіка до загального обсягу трафіка в мережі;

б) ефективність використання датчиків ηE – загальне число прийнятих точкою збирання пакетів даних до виходу з ладу будь-якого вузла через розрядження 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 й V_s – інтегральні обсяги користувальної та службової інформації відповідно; N_{res} – загальне число нормалізованих пакетів даних у точці збирання; N_d^Σ і N_s^Σ – загальне число нормалізованих пакетів даних і сигнальних пакетів відповідно.

Кожний пакет, переданий через транзитний вузол, враховується окремо. Так, якщо пакет передається у точку збирання даних через один транзитний вузол (два прольоти), вважаємо, що в мережі передано два пакети даних – “корисний” пакет і пакет ретрансляції.

Тому, чим більше значення ηT , тим більш ефективно протокол маршрутизації використовує пропускну здатність каналу зв’язку. Для простоти вважаємо, що всі пакети даних і сигнальні пакети мають фіксовані розміри, які задаються в параметрах моделі мережі. При ідеальному каналі зв’язку величини N_d^Σ і N_s^Σ включають тільки “корисні” пакети даних і пакети ретрансляції. При реальному каналі зв’язку до N_d^Σ і N_s^Σ входять пакети, передані повторно через втрати при доставлянні.

Маючи результати [4], розглянемо метод корекції дрейфу в реальному часі для застосування в БСМ. Процедура корекції складається з двох етапів.

На першому етапі для передбачення результатів вимірювань g_{mn}^* використовується навчальний вектор регресії, що містить як вихідні дані скориговані результати вимірювань, отримані від сусідніх датчиків.

На другому етапі застосовується фільтр Калмана для рекурсивної корекції дрейфу в зчитаних даних g_{mn} з використанням вихідних значень f_{mn}^* вектора регресії для визначення скоригованих результатів вимірювань g_{mn}^* .

Процедура прогнозу складається з двох фаз – навчання та робочої. На фазі навчання результати вимірювань, зібрані протягом початкового періоду розгортання (навчальний набір даних), використовуються для моделювання функції $\varphi(\cdot)$. В процесі робочої фази “навчена” модель $\varphi(\cdot)$ використовується для передбачення подальших результатів вимірювання f_{mn}^* .

Передбачається, що дані навчання (зібрані протягом початкових періодів розгортання) вільні від будь-якого дрейфу і можуть використовуватися для навчання в кожному вузлі. Це припущення обґрунтовано тим, що датчики зазвичай калібруються перед розгортанням.

Набір навчальних даних в m -му датчику позначимо $G_m = \{G_{m-1}, G_m\}$, де

$$G_{n-1} = (g_{k,n-1}), k = 1, 2, \dots, m-1, m+1, \dots, M; \quad G_n = (g_{mn}), m = 1, 2, \dots, M.$$

Модель, отримана на основі допоміжного вектора регресії [13], використовується протягом робочої фази для передбачення подальших фактичних вимірювань f_{mn}^* . Для вимірювання дрейфу датчика обчислюється різниця між результатом вимірювання і модельним значенням компонента вектора регресії f_{mn}^* , яке використовується як опорне. В [4] ця різниця вводиться в одну з модифікацій фільтра Калмана, яку названо фільтром Калмана з випадковим пошуком (ФКВП), спільно з g_{mn} для оцінювання скоригованих результатів g_{mn}^* і величини дрейфу d_{mn} .

У даній статті пропонується удосконалити ФКВП шляхом перекриття можливого діапазону значень дрейфу $D_{mn}^* = |d_{mn \max} - d_{mn \min}|$.

На рис. 2 зображена структурна схема системи корекції дрейфу в БСМ з безпошуковим фільтром Калмана (БПФК). На ній представлені етапи виявлення помилок і процедура корекції одночасно в m датчиках мережного сегмента.

Алгоритм оцінювання параметрів гладкого дрейфу відрізняється від розробленого в [4] тим, що водночас розраховуються похибки, обумовлені дрейфом параметрів сусідніх датчиків у щільній сукупності. Звичайно, це потребує паралельних обчислень, отже, додаткових обчислювальних витрат, але саме завдяки розпаралелюванню слід очікувати більш швидкого зменшення похибок. Завдяки цьому глобальна ефективність алгоритму корекції зростатиме.

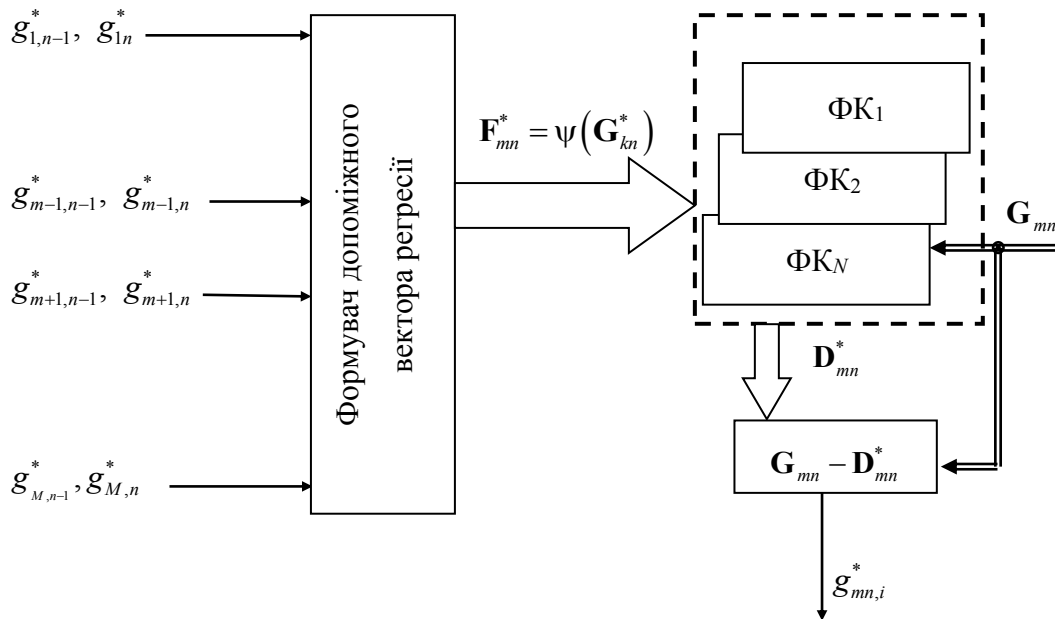


Рисунок 2 – Структурна схема системи корекції дрейфу

Розглянемо наступну модифікацію фільтра Калмана (БПФК). Як і в [4], він складається з повторюваних кроків. У n момент m датчиком вироблено вимір g_{mn} . У датчик введено передбачене значення f_{mn}^* для корекції результату вимірювання за скоригованими вимірами всіх навколишніх датчиків у сегменті на попередньому етапі. З використанням передбаченого значення спільно зі значенням виробляються коректне зчитування g_{mn}^* й оцінка значення дрейфу d_{mn}^* . Після цього датчик посилає скоригований вимір g_{mn}^* своїм

сусідам. Кожен вузол збирає скориговані вимірювання від сусідів і знову обчислює f_{mn}^* і т.д. Необхідно відзначити, що головне завдання – коректно оцінити вимірне значення g_{mn} , яке є оцінкою вихідного істинного значення h_{mn} . Припущення про повільності змін g_{mn}^* і d_{mn} сформулюємо математично в наступному вигляді:

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

де ξ_{mn} , ζ_{mn} – випадкові процеси виду корельованого гауссівського шуму з нульовим математичним очікуванням і дисперсіями σ_ξ^2 , σ_ζ^2 відповідно.

Даний метод заснований на знаходженні статистики випадкового вектора Y , який піддається нелінійному перетворенню $Y = \Psi(X)$. Вектор X – випадковий вектор розмірністю N . Його вектор математичних очікувань X^* , а коваріційна матриця – R_X . Щоб знайти статистику, використовуючи перетворення $\Psi(\cdot)$ з ваговими функціями, введеними в роботі [4], необхідно виконати наступні операції:

1) Вибираються $(2L + 1) \times (2L + 1)$ (де L – розмірність вектора X) детермінованих вагових коефіцієнтів (так званих сигма-точок) $\sigma_i = \{v_i, x_i\}$, область значень яких повністю охоплює істинне математичне очікування і коваріацію випадкового вектора X .

2) Для охоплення області існування статистик (математичного очікування і коваріації) змінної Y здійснюється функціональне перетворення $\Psi(\cdot)$ сигма-точок. Схема відбору точок описується рівняннями наступного вигляду:

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

де $\lambda_s = \alpha^2 (L + k_s)$; L – параметр масштабу, $i = 1, \dots, L$; α визначає околицю сигма-точки навколо математичного очікування X^* і зазвичай являє собою малу позитивну величину; k_s – другий параметр масштабу, який у вихідному стані встановлюється рівним нулю; β – параметр, що використовується для введення апріорних даних про розподіл X .

Оптимальна величина β для гауссівського розподілу $\beta = 2$.

Член $\left(\sqrt{(L + \lambda)P} \right)_i$ – i -й стовпчик, елементами якого є квадратні корені з елементів матриці коваріацій $\|(L + \lambda)P\|$. Тут $\alpha = 0,001$; $= 0$; $k = 0$; $\beta = 2$.

Розглянемо задачу оцінювання параметрів і стану системи стосовно до задачі корекції дрейфу. Для оцінювання результату вимірювання G_{mn}^* m датчика в n момент часу використовується БПФК. Розмірність L вектора G_{mn}^* дорівнює двом; є п'ять сигма-точок для кожного m датчика. Алгоритм фільтрації полягає в наступному.

Початок. k момент часу, i датчик.

Крок 1. У датчик вводиться прогнозований скоригований результат вимірювання

$$f_{mn}^* = \Psi(g_{j,n-1}^*), \quad j = \overline{1, n}, \quad j \neq m.$$

Крок 2. Зчитується черговий результат вимірювань $g_{mn} = r_{mn}$.

Крок 3. Обчислюється дрейф результату вимірювань δg_{mn}^* .

Крок 4. По елементах вектора $\mathbf{G}_{mn} = [g_{m,n-1} \quad d_{m,n-1}]^T$ знаходяться сигма-точки $s_{pi} = \{c_i, g_{mn,i}\}$.

Крок 5. Значення сигма-точок перераховуються через функцію змінних стану $\psi(\cdot)$.

Крок 6. У БПФК обчислюється векторна оцінка скоригованого вимірювання. Результат передається сусіднім датчикам. У свою чергу, отримуються результати від сусідніх датчиків.

Крок 7. До кроку 1.

Таким чином, алгоритм є рекурсивним і працює безперервно протягом всього життєвого циклу БСМ.

Розроблений метод виявлення помилок і корекції результатів вимірювань датчиків у БСМ, заснований на припущенні про просторово-часову кореляцію результатів вимірювань у сусідніх датчиках і відсутність взаємної кореляції процесів дрейфу технічних параметрів. Математичною базою методу є безошукова фільтрація Калмана. Параметри фільтра встановлюються на основі результатів попереднього кореляційно-регресійного аналізу статистик вимірювань та дрейфу параметрів датчиків.

Для моделювання просторово-часової кореляції використовуються допоміжні вектори регресії, за рівняннями якої обчислюється прогноз майбутніх результатів вимірювань.

Векторні прогнози дані використовуються в БПФК для оцінювання дійсних значень вимірюваних величин. Алгоритм за своєю суттю є векторним і децентралізованим, тому матриці коваріацій близькі до діагонально-домінантних. Обчислення відбувається рекурсивно протягом всього життєвого циклу БСМ для автономних сегментів, які вмішують кінцеві набори датчиків. Отже, через застосування алгоритмів даного типу можливості розширюваності та масштабованості мереж не обмежуються. Це особливо актуально для спеціалізованих мереж з обмеженим фізичним доступом, в яких не передбачені технічне обслуговування, поточний контроль і заміна сенсорів, що відмовили.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Yu-Chee Tseng. Location Tracking in a wireless sensor network by mobile agents and its data fusion strategies / Yu-Chee Tseng, Sheng-Po Kuo, Hung-Wei Lee, Chi-Fu Huang // The Computer Journal. – 2004. – Vol. 47. – № 4. – P. 448–460.
2. Bandyopadhyay S. An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks / S. Bandyopadhyay, E. Coyle // Proceedings of IEEE INFOCOM. – April, 2003. – P. 1713–1723.
3. Siljak D. D. Decentralized control of complex systems / D. D. Siljak. – Academic Press, Inc. – San Diego, CA, 1991. – 527 p.
4. Виноградов Н. А. Повышение точности измерений в беспроводных сенсорных сетях путем коррекции дрейфа параметров датчиков / Н. А. Виноградов, А. С. Торошанко // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. – 2012. – Т.10. – № 4. – С. 14–20.
5. Bychkovskiy V. A collaborative approach to in-place sensor calibration / V. Bychkovskiy, S. Megerian, D. Estrin, M. Potkonjak // Int. Workshop on Information Processing in Sensor Networks. – 2003. – P. 301–316.
6. Abdelkader Outtagarts. Mobile Agent-based Applications: a Survey / Abdelkader Outtagarts // International journal of computer science and network security. – 2009. – V.9. – № 11. – P. 331–339.
7. Stipanovic D.M. Multi-agent avoidance control using an M-matrix property // D.M. Stipanovic, S. Shankaran, C. J. Tomlin // Electronic journal of linear algebra. A publication of the International linear algebra society. – May, 2005. – V.12. – P. 64–72.
8. Julier S. The scaled unscented transformation / S. Julier // American control conference. – 2002. – № 6. – P. 4555–4559.
9. Qi H. Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks / H. Qi, Y. Xu, X. Wang // Proceedings of the IEEE. – 2003. – Vol. 91. – № 8. – P. 1172–1183.

10. Дынкин Е. Б. Управляемые марковские процессы и их приложения / Е. Б. Дынкин, А. А. Юшкевич. – М: Наука, 1975. – 338 с.
11. Floudas C. A. Encyclopedia of optimization. – [2-d ed]. C. A. Floudas, P. M. Pardalos. – Springer science+businessmedia, LLC, 2009. – 4645 p.
12. Mauricio G. C. Resende. Handbook of optimization in telecommunications / Mauricio G.C. Resende, Panos M. Pardalos. – Springer science-business media, Inc, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA. – 2006. – 1134 p.
13. Hoadley B. A Bayesian look at inverse linear regression / B. Hoadley // Journal of the American Statistical Association. – 1970. – 65(329). – P. 356–369.

REFERENCES:

1. Yu-Chee Tseng, Sheng-Po Kuo, Hung-Wei Lee and Chi-Fu Huang. "Location tracking in a wireless sensor network by mobile agents and its data fusion strategies." *The Computer Journal* 47 4: (2004): 448-460.
2. Bandyopadhyay S., Coyle E. "An energy-efficient hierarchical clustering algorithm for wireless sensor networks." *Proceedings of IEEE INFOCOM* (2003): 1713-1723.
3. Siljak D. D. "Decentralized control of complex systems." *Academic Press, Inc.-San Diego, CA* (1991): 527
4. Vinogradov N. A., Toroshanko, A. S. "Increase of exactness of measurements in wireless sensory networks by the correction of drift of sensors parameters." *Visnyk Derzhavnoho universytetu informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii*, 10(4), (2012): 14-20
5. Bychkovskiy V., Megerian S., Estrin D., Potkonjak M. "A collaborative approach to in-place sensor calibration." *Int. Workshop on Information Processing in Sensor Networks* (2003): 301-316.
6. Abdelkader Outtagarts. "Mobile agent-based applications: a survey." *International Journal of Computer Science and Network Security* V9 11 (2009): 331-339.
7. Stipanovic D.M., Shankaran S., Tomlin C. J. "Multi-agent avoidance control using an M-matrix property." *Electronic journal of linear algebra. A publication of the international linear algebra society* 12 (2005): 64-72.
8. Julier S. "The scaled unscented transformation" *American Control Conference* 6 (2002): 4555-4559.
9. Qi H., Xu Y, Wang X. "Mobile-agent-based collaborative signal and information processing in sensor networks." *Proceedings of the IEEE* 91 8 (2003): 1172-1183.
10. Дынкин Е. Б., Юшкевич А. А. "Guided Markovian processes and their applications." *Moskva: Nauka* (1975): 338.
11. Floudas C. A., Pardalos P. M. "Encyclopedia of optimization." *Springer Science+BusinessMedia, LLC* (2009): 4645.
12. Mauricio G.C. Resende, Panos M. Pardalos. "Handbook of Optimization in Telecommunications." *Springer Science+Business Media, Inc, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA* (2006): 1134.
13. Hoadley B. "A Bayesian look at inverse linear regression." *Journal of the American Statistical Association* 65(329) (1970): 356–369.