

А.О. Мельник, В.А. Голембо, О.Ю. Бочкарьов, О.П. Кусьпісь
Національний університет "Львівська політехніка"
кафедра електронних обчислювальних машин

АВТОНОМНА АДАПТИВНА СИСТЕМА ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ ПОРУШНИКІВ

© Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкарьов О.Ю., Кусьпісь О.П., 2007

Розглянуто підходи до побудови автономної адаптивної системи виявлення та відстеження порушників на основі технології багатоагентних систем. Зокрема запропоновано реалізувати систему у вигляді колективу інтелектуальних вартових агентів, здатних самостійно розв'язувати різні за змістом оптимізаційні задачі, що виникають під час роботи системи, за умов відсутності центрального управління та локальної обмеженої інформаційної взаємодії агентів.

The approaches to the development of autonomous adaptive system of intruder's detection and tracking based on multiagent technology are considered. The system is developed in the form of collective of intelligent guarding agents, which is capable to solve different optimisation tasks without global central control and with local limited inter-agent communication.

Вступ. Проблема охорони території від вторгнення деяких об'єктів (далі "порушників") стає все актуальнішою з огляду на розширення кордонів великих міждержавних утворень, збільшення потоків нелегальної імміграції та глобальну загрозу тероризму. Розглянуто підходи до побудови автономної адаптивної системи виявлення та відстеження порушників (СВВП) на основі технології багатоагентних систем. Зокрема запропоновано реалізувати систему у вигляді колективу інтелектуальних вартових агентів, здатних самостійно розв'язувати різні за змістом оптимізаційні задачі, що виникають під час роботи системи, за умов відсутності центрального управління та локальної обмеженої інформаційної взаємодії агентів. Частина наведених в статті результатів отримана в межах держбюджетної науково-дослідної теми "Конфігуровані вимірювально-обчислювальні мережі інтелектуальних автономних агентів для вирішення задач моніторингу навколишнього середовища" (ДБ/АВАГ) [1-6].

Стан проблеми. Сьогодні існує велика кількість засобів спостереження різного призначення, і ця кількість постійно зростає. Відповідно актуальною є проблема їх ефективного використання, включаючи інтеграцію великої кількості різних систем спостереження в єдину систему. До того ж останнім часом все актуальніше постають проблеми боротьби з тероризмом та захисту кордонів (включаючи проблему нелегальної імміграції). Відповідно існує велика потреба у спеціалізованих системах виявлення та відстеження порушників, які б вирішували ці проблеми.

Загалом концептуальна модель процесу виявлення та відстеження порушників передбачає такі основні об'єкти (таблиця): порушник, територія охорони, система виявлення та відстеження порушників, користувач (власник) СВВП, система сповіщення та зв'язку. При тому СВВП, побудована на основі технології багатоагентних систем [3–5], розглядається як колектив інтелектуальних вартових агентів.

Згідно з базовим сценарієм взаємодії об'єктів концептуальної моделі початково деяка кількість вартових агентів розміщується (наприклад, випадково) в межах деякої території, що підлягає охороні. Після цього за допомогою вбудованих засобів безпроводного зв'язку і відповідного алгоритмічного забезпечення вартові агенти самостійно утворюють єдину децентралізовану систему виявлення та відстеження порушників. Кожний вартовий агент споряджений сенсорною системою, за допомогою якої він здійснює свою основну функцію – виявлення порушника та відстеження його переміщень у своїй зоні відповідальності. Іншою основною функцією вартових агентів є сповіщення свого власника (користувача) про факт виявлення порушника та подальше інформу-

вання про його переміщення. При тому передбачається, що існує деякий віддалений центр (консоль управління), який користується інформацією, що надходить від вартових агентів. Стосовно порушників передбачається, що вони є рухомими, і їх загальна кількість не обмежується одним.

Об'єкти концептуальної моделі процесу виявлення та відстеження порушників

№	Позначення	Об'єкт концептуальної моделі	Характеристики об'єкта
1	I	Порушник (intruder) – цільовий ("небажаний") об'єкт, об'єкт спостереження	тип порушника; тактика дій порушника; траєкторія руху порушника в Е; кількість порушників; кількісний розподіл порушників по типах
2	E	Територія, що підлягає охороні (зона виявлення та відстеження порушників, зона спостереження)	граничі території; територія з фіксованими (незмінними у часі) чи змінними границями (граничі території динамічно змінюються); площа території; "геометричні" характеристики території
3	S	Система виявлення та відстеження порушників (СВВП)	централізована чи децентралізована; автономна чи під управління людини-оператора; масштаб системи; стаціонарна чи тимчасово розгорнута
4	M	Користувач (власник) системи (центр збору та обробки, консоль управління системою)	кількість консолей управління; статична/мобільна консоль управління; розташування консолі (в межах зони Е, чи поза межами зони Е)
5	A	Вартовий агент	тип вартового агента; тип сенсорної системи вартового агента; тип підсистеми переміщення вартового агента (статичний/мобільний, "тип мобільності"); радіус виявлення порушника сенсорною системою; радіус дії засобів зв'язку; початковий запас енергії
6	K	Колектив вартових агентів	загальна кількість вартових агентів у колективі; кількісний розподіл вартових агентів за різними типами; спосіб інформаційної взаємодії вартових агентів
7	C	Система передачі даних (сповіщення) та інформаційної взаємодії вартових агентів	тип системи (електромагнітна, оптична, акустична); пропускна здатність системи; функція витрат енергії на роботу системи

Отже, до основних завдань СВВП можна зарахувати:

1. Виявлення порушника:
 - 1.1. Виявлення факту вторгнення деякого об'єкта в зону Е;
 - 1.2. Розпізнавання цього об'єкта як порушника;
 - 1.3. Повідомлення користувача (власника) системи про факт виявлення порушника.
2. Відстеження порушника (спостереження за пересуваннями порушника у зоні Е):
 - 2.1. Встановлення біжучого місця розташування порушника в зоні Е;
 - 2.2. Встановлення напрямку та швидкості руху порушника (параметрів траєкторії руху порушника);
 - 2.3. Періодичне повідомлення користувача системи про місце розташування порушника в зоні Е та про параметри траєкторії його руху.

Крім цього перед СВВП стоїть низка додаткових задач, зокрема: 1) приховування факту роботи системи від порушників, 2) протидія деструктивним втручанням порушників у роботу системи, 3) подовження часу роботи СВВП (збереження та поповнення запасів енергії) тощо.

Одним з основних недоліків більшості сучасних СВВП є те, що вони працюють під контролем людини-оператора, тобто людина є "ключовим елементом" і "слабкою ланкою" в таких системах. Іншим недоліком сучасних СВВП можна вважати те, що вони в переважній більшості мають централізовану архітектуру. Відповідно вивід з ладу центра управління призводить до припинення роботи усієї системи. Крім того, сьогодні СВВП, як правило, запрограмовані на виявлення лише певних видів загроз (наприклад, з погляду виявлення порушників – це певні способи подолання порушником підконтрольної зони). Відповідно в разі виникнення нових ("невідомих" для СВВП) типів поведінки порушників, останні не будуть виявлятися системою.

Постановка задачі. Виробити підходи до побудови автономної адаптивної СВВП на основі технології багатоагентних систем з метою забезпечити самостійне розв'язання різних за змістом оптимізаційних задач колективом інтелектуальних агентів-вартових за умов відсутності центрального управління та локальної обмеженої інформаційної взаємодії агентів.

Розв'язання задачі. Вибір технології багатоагентних систем для побудови СВВП зумовлений метою, по-перше, зробити цю систему автономною, тобто здатною виконувати свої функції самостійно без втручання людини-оператора, та, по-друге, адаптивною, тобто здатною виявляти нові типи поведінки порушників та шукати найкращі за низкою обраних критеріїв способи виявлення та відстеження за цих умов. Крім того за рахунок децентралізації управління в такій системі досягається надвисока надійність її роботи. За рахунок відсутності центра управління автономна система спостереження відрізняється надвисокою надійністю. Вона продовжує працювати доти, доки хоча б один агент залишається в робочому стані.

Концепція самоорганізації. Для досягнення зазначеної мети запропонована концепція самоорганізації багатоагентної системи виявлення та відстеження порушників [3]. У межах цієї концепції передбачено, що за рахунок набуття досвіду (самонавчання) та проведення натурних експериментів (планування, організація, аналіз результатів) з вивчення різних аспектів поведінки порушників автономна адаптивна СВВП буде здатна цілеспрямовано реагувати на зміни 1) "поведінки" об'єктів спостереження (порушників); 2) мети (цільової функції) роботи системи (з боку користувача); 3) зовнішніх умов виявлення та відстеження порушників.

При цьому з точки зору надійності та якості роботи автономної адаптивної СВВП треба окремо вказати на проблему нестачі інформації про кількість та тактику дій (переміщень) потенційних порушників. Специфіка ситуації полягає в тому, що порушник максимально зацікавлений в тому, щоб залишитись непоміченим для системи спостереження (тут можна вказати на аналогічні міркування про взаємини гравців в межах математичної теорії ігор). Спираючись на це, можна припустити, що передбачити наперед всі можливі способи вторгнення та подолання порушником (або групою порушників) території, яка охороняється, неможливо. Саме тому ми пропонуємо використати технологію багатоагентних систем, яка, крім усього іншого, містить методи автономного цілеспрямованого подолання нестачі інформації про об'єкт спостереження та управління (яким в цьому випадку є порушник). Таким чином основним "предметом" (рушієм) самоорганізації Колективу вартових агентів є тактика дій порушників та зміни в навколишньому середовищі, в якому відбувається виявлення та відстеження переміщень цих порушників (наприклад, тимчасове різке погіршення якості радіозв'язку між вартовими агентами). Інакше кажучи, передбачається, що колектив вартових агентів буде здатний на основі вивчення свого супротивника та середовища знаходити найефективніші за деякою системою критеріїв способи виявлення та відстеження порушників.

Формальний опис роботи СВВП. Нехай ми маємо N статичних вартових агентів $\{A_i(R_{s,i}, R_{c,i})\}$, $i=1, \dots, N$, де $R_{s,i}$ – радіус надійного виявлення порушника сенсорною підсистемою i -го агента, $R_{c,i}$ – радіус дії засобів безпроводного зв'язку i -го агента (прийом-передача). Нехай в перший момент часу ($t=0$) вартові агенти розміщені випадково в двовимірному обмеженому метричному просторі території E , що підлягає охороні, де кожен з них може займати лише один дискрет цього простору.

Відповідно розглядається множина початкових координат вартових агентів $\{A_i(x_i, y_i)\}$, $i=1, \dots, N$, які у випадку статичних вартових агентів залишаються незмінними. Нехай загальна кількість дискретів території, що підлягає охороні, дорівнює M і $M \gg N$. Нехай також територія, що підлягає охороні, обмежується многокутником P з кількістю вершин $L < N$ і множиною координат вершин многокутника $V_k(x_k, y_k)$, $k=1, \dots, L$.

Припустимо, що на територію E з-поза її меж відбувається вторгнення K порушників $\{I_j\}$ в моменти часу $t_{inv,j}$, $j=1, \dots, K$ (час вторгнення). При тому будемо вважати, що $K \ll N$. Відповідно початкові координати порушників $\{I_j\}$ належать сторонам многокутника P . Припустимо також, що в кожний наступний після вторгнення момент часу кожний порушник здійснює переміщення в E , змінюючи свої біжучі координати $r_{j,t} = I_j(x_{j,t}, y_{j,t})$, $j=1, \dots, K$, $t > 0$, і через деякий час $t_{st,j}$ (час перебування) залишає E назавжди (тобто "останні" координати порушників так само належать сторонам многокутника P). До того ж переміщення порушника в E описується деякою функцією $r_{j,t+1} = f(r_{j,t}, t)$.

Перед колективом вартових агентів ставиться задача виявити кожний факт вторгнення з затримкою не більше ε_1 , тобто вимагається, щоб $t_{dt,j} - t_{inv,j} < \varepsilon_1$, для всіх $j=1, \dots, K$, де $t_{dt,j}$ – час виявлення факту вторгнення j -го порушника, і сповістити про кожний факт вторгнення з затримкою не більше ε_2 , тобто вимагається, щоб $t_{nt,j} - t_{dt,j} < \varepsilon_2$, для всіх $j=1, \dots, K$, де $t_{nt,j}$ – час сповіщення користувача про факт вторгнення j -го порушника. Крім того від колективу вартових агентів вимагається встановити траєкторію переміщення j -го порушника в E у вигляді функції $\varphi(r_{j,t}, t)$ як відображення функції $f(r_{j,t}, t)$, мінімізувавши різницю між ними згідно з деяким заданим показником точності ε_3 .

Методика побудови автономної адаптивної СВВП. Для розв'язання задачі розробки автономної адаптивної СВВП можна запропонувати таку послідовність етапів розробки: 1) розробка моделей (сценаріїв, способів) роботи автономних адаптивних СВВП; 2) постановка та розв'язання задач в межах розроблених моделей; 3) розробка алгоритмів колективної поведінки вартових агентів; 4) розробка апаратної платформи вартового агента; 5) розробка програмної платформи вартового агента (розробка алгоритмічного та програмного забезпечення); 6) розробка програмного забезпечення консолі управління (консолі користувача); 7) розробка методів тестування та дослідження роботи автономної адаптивної СВВП. Внаслідок виконання цих етапів розробки будуть отримані: 1) способи (моделі, сценарії) використання автономних систем спостереження (включаючи відповідні способи оцінки ефективності їх роботи); 2) апаратна платформа: реалізація вузлів вартового агента на основі принципів адаптивних архітектур (adaptive hardware); 3) програмна платформа: реалізація алгоритмів колективної поведінки агентів системи спостереження на основі принципів самоорганізації (реалізація базових алгоритмів колективної поведінки, реалізація координаційного простору тощо); 4) програма консолі управління (призначення: конфігурація системи, отримання інформації про об'єкти спостереження); 5) засоби тестування та контролю роботи автономних систем спостереження (зокрема засоби 2D і 3D візуалізації); 6) засоби захищеного (безпроводного) зв'язку (криптозахист, розпізнавання "свій-чужий"); 7) методи оптимізації процесів енергоспоживання (з урахуванням режимів: рухомий/нерухомий, "сплячий"/активний та різних режимів потужності передавача); 8) методи об'єднання інформації а) від наземних (контактних) та дистанційних (спутникових) засобів спостереження; б) від просторово рознесених засобів спостереження; в) від засобів спостереження різної фізичної природи; 9) методи побудови СВВП на основі наявних (доступних) засобів (з точки зору використання існуючих систем зв'язку, джерел живлення, засобів пересування (концепція використання "всього, що рухається") [7]).

Колективне виявлення порушників. Для підвищення надійності та ефективності виявлення порушників можна скористатись методами теорії аналізу сцен [8]. До того ж особливість полягає в тому, що на відміну від класичної постановки задачі аналізу сцен, вона розв'язується колективом вартових агентів. Зокрема виконання процедури аналізу сцени ініціюється вторгненням деякого об'єкта в зону охорони. Ця процедура виконується спільними зусиллями тих вартових агентів, які оточують підозрілий об'єкт (мається на увазі, що він потрапляє в зону видимості їхніх сенсорних систем). Виконання цієї процедури передбачає обмін інформацією між відповідними вартовими агентами та колективний пошук спільного (узгодженого) рішення стосовно підозрілого об'єкта.

Колективне розпізнавання. Після виявлення факту присутності деякого об'єкта в зоні охорони перед вартовими агентами постає завдання розпізнати чи стосується цей об'єкт категорії порушників. Відтак постає важлива проблема зменшення хибних (помилкових) спрацювань СВВП. Одним з найперспективніших підходів до вирішення цієї проблеми є використання виділених з "образу" об'єкта простих класифікаційних ознак. Зокрема у роботі [9] розглянуто можливості використання простих ознак для формування, так званих, "зорових скелетів" об'єктів на основі їх фото- або відеозображень. Узагальнюючи цю ідею, можна запропонувати універсальніший підхід до формування "скелетів" на основі простих ознак різної фізичної природи, отриманих за допомогою відповідних сенсорів внаслідок різних типів впливу підозрілого об'єкта на зовнішнє середовище (йдеться, наприклад, про висоту хвилі на воді, яку підняв об'єкт; розмір та форму його тіні; характер вібрацій землі, яку спричинив об'єкт тощо). При цьому на базі отриманих ознак можна складати як однорідні, так і різномірні "скелети" підозрілих об'єктів (наприклад, однорідний "зоровий скелет", різномірний "зорово-слуховий скелет" об'єкта тощо). Отримані в такий спосіб "скелетні" образи підозрілих об'єктів можуть колективно аналізуватись вартовими агентами з використанням деякого набору простих правил (наприклад, за аналогією до двох перших "заповідей" з твору Джорджа Оруела "Animal Farm": "Будь-хто на двох ногах – це ворог. Будь-хто на чотирьох ногах або з крилами – це друг").

Колективне відстеження порушників. Для розв'язання задачі колективного відстеження траєкторії руху порушника можна запропонувати такий підхід на основі використання нерухомих вартових агентів. У разі вторгнення порушника в зону охорони вартові агенти самостійно формують навколо нього "коло супроводу" певної форми (рис. 1). Ця форма залежить від розміщення тих вартових агентів, які виявили порушника. При тому під час пересування порушника в межах охоронної зони "коло супроводу" рухається разом з ним за рахунок спільних узгоджених дій вартових агентів щодо "ланцюжкової" активації наступних учасників "кола супроводу" (в такий спосіб "коло супроводу" пересувається, у той час як агенти залишаються нерухомими).

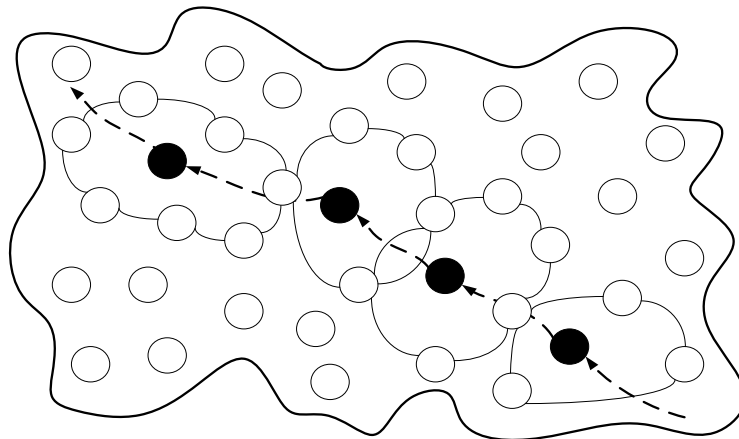


Рис. 1. Колективні дії вартових агентів супроводження порушника

Способи зменшення енерговитрат. Як можливі шляхи вирішення проблеми ефективного управління енергоспоживанням СВВП розглянемо такі пропозиції.

З метою економії енергії в ситуаціях, коли виникає необхідність сповістити користувача про виявленого порушника, можна запропонувати використовувати режим "самопожертви" агента, за аналогією із самопожертвою бджоли, яка жалить (передбачається, що порушник здатний виявляти джерела радіохвиль і знищувати їх, відповідно агент, який виходить на зв'язок, ризикує бути знищеним). Такий агент обирається, наприклад, шляхом жеребкування з підмножини тих агентів, що брали участь у виявленні порушника. При тому агент, що переходить в режим "самопожертви", переключається в режим віддаленого радіозв'язку з користувачем. Всі інші агенти працюють в

енергозберігаючому режимі з обмеженим радіусом зв'язку. Режим "самопожертви" агента доцільно також використовувати в ситуації, коли витрати енергії на відсилання повідомлення про виявлення порушника дорівнюють біжучому запасу енергоресурсів кожного з агентів (наприклад, після тривалого терміну їх автономної роботи). У цій ситуації "самопожертва" агента полягає в тому, що після відсилання повідомлення, він припиняє свою роботу внаслідок вичерпання власного енергоресурсу.

Значної економії енергоресурсів можна досягти за рахунок використання в роботі вартового агента режиму резервного очікування (standby mode). У цьому режимі відбувається тимчасове від'єднання у агента деякої обмеженої кількості енерговитратних сенсорів (наприклад, двох із трьох сенсорів: акустичного та сейсмічного, залишивши працювати інфрачервоний). Останній у разі появи інформації про підозрілий об'єкт "будить" інші сенсори, що забезпечує об'єктивнішу оцінку ситуації, що склалася.

Економії енергії можна досягнути також шляхом розподілу усіх агентів на "пасіонарних" (тобто тих, що розташовані по периметру території, що охороняється) та "субпасіонарних" (тобто тих, що розташовані всередині цієї території) (рис. 2). При тому "пасіонарні" агенти, які виступають першою лінією охорони, споживають більше енергії, на відміну від "субпасіонарних", які в цей час можуть знаходитись в режимі резервного очікування. У межах цього підходу для підвищення надійності роботи СВВП можна використовувати декілька ліній охорони.

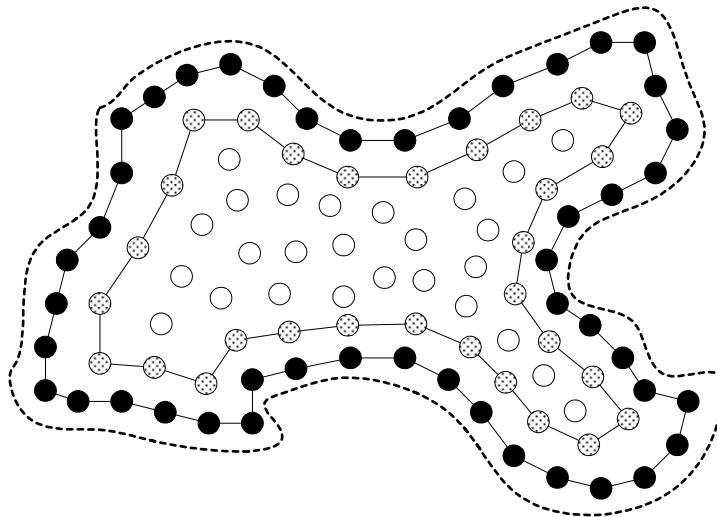


Рис. 2. Приклад дворівневої лінії охорони

Переключення окремого вартового агента в режим "пасіонарного" відбувається у разі припинення роботи інших агентів внаслідок втрачання ними запасів енергії або внаслідок пошкодження цих агентів порушником (рис. 3). До того ж першими вичерпають свій енергоресурс вартіві агенти першої лінії охорони, після чого їх роль почнуть перебирати на себе інші вартіві агенти (рис. 3).

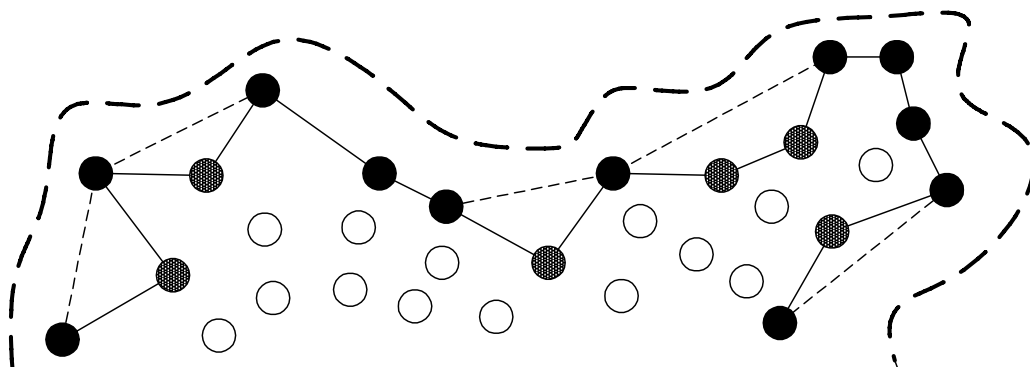


Рис. 3. Приклад переключення ліній охорони

Висновки. Розглянуто підходи до побудови автономної адаптивної системи виявлення та відстеження порушників (СВВП) на основі технології багатоагентних систем. Зокрема запропоновано реалізувати систему у вигляді колективу інтелектуальних вартових агентів, здатних самостійно розв'язувати різні за змістом оптимізаційні задачі, що виникають під час роботи системи, за умов відсутності центрального управління та локальної обмеженої інформаційної взаємодії агентів. Розглянуто стан проблеми, зокрема сформульовані три основні недоліки сучасних СВВП: 1) робота під управлінням людини-оператора, 2) жорстка (негнучка) програма роботи, 3) централізованість (і як наслідок вразливість). Для вирішення цих проблем запропоновано концепцію самоорганізації багатоагентної системи виявлення та відстеження порушників. Наведено також формальний опис роботи СВВП та методику побудови автономної адаптивної СВВП. Обговорено питання, пов'язані з колективним виявленням порушника, колективним розпізнаванням, колективним відстеженням порушників та способами зменшення енерговитрат.

1. Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю. Система розподілених контактних вимірювань на основі автономних мобільних інтелектуальних агентів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", 2001, № 437. – С.14–20. 2. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю. Нові принципи побудови вимірювально-обчислювальних мереж на основі інтелектуальних агентів // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Комп'ютерні системи та мережі", 2003, № 492. – С.100–107. 3. Мельник А.О., Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю., Кусьніс О.П. Проблема самоорганізації багатоагентної системи виявлення та відстеження порушників // Вісн. Нац. ун-ту „Львівська політехніка”. – 2005 – № 548 – С.11–15. 4. Melnyk A., Golembo V., Botchkariov A., Kuspis O. Multiagent system for intruders' detection and tracking: tasks and solutions // Konferencja "Aktualne Problemy w Elektrotechnice i Informatyce", Ameliówka, 17–18 czerwca, 2005, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. – pp. 109–114. 5. Melnyk A., Golembo V., Botchkariov A., Kuspis O. Development of multi-agent systems for intruders' detection and tracking // Proceeding of the 3-rd International Conference ACSN-2007, Advanced computer systems and networks: design and application, Lviv Polytechnic National University, September 20-22, 2007. – p. 109–110. 6. Melnyk A., Golembo V., Bochkaryov A., Multiagent approach to the distributed autonomous explorations // Proceedings of NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS-2007), Edinburgh, UK, 2007. 7. Голембо В.А., Бочкар'єв О.Ю., Кусьніс О.П. Проблема організації переміщення мобільного вимірювального агента у складі розподіленої системи автономних досліджень // Вимірювальна техніка та метрологія. – 2007. – № 67. 8. Duda R., Hart P., Pattern recognition and scene analysis, New York, 1973. 9. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004.