УДК 528.29

Рачок Р. В.[1], Боровик О. В.[2], Боровик Л. В.[3]

[1]Канд. техн. наук, доцент, докторант докторантури, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна
[2]Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри інженерного забезпечення та технічних засобів охорони кордону, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна
[3]Канд. психол. наук, доцент, доцент кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Актуальність. В охороні кордону використовується система оптико-електронного спостереження, яка представлена сукупністю веж, на яких встановлені радіолокаційні, тепловізійні та відео засоби спостереження. Ефективність виявлення порушників кордону з використанням даної системи суттєво залежить від її функціональної і структурної будови. Функціональна будова системи оптико-електронного спостереження визначається підбором технічних засобів спостереження з урахуванням їх функціональних можливостей. Структурна будова системи залежить від вибору місць розташування веж спостереження з урахуванням фізико-географічних умов місцевості та характеристик технічних засобів спостереження. Недосконаліть науково-методичного апарату в галузі структурної оптимізації побудови системи оптико-електронного спостереження обумовила актуальність дослідження.

Мета. Метою роботи є розробка методу структурної оптимізації розміщення веж системи оптико-електронного спостереження.

Метод. У роботі поставлена задача оптимізації розміщення веж системи оптико-електронного спостереження та запропоновано метод її вирішення, який передбачає максимізацію показника ефективності функціонування системи. Особливістю даного методу є: використання геомоделі з метою зменшення кількості варіантів розміщення веж системи, застосування авторських підходу до вибору кроку дискретизації просторових даних і швидкодіючого алгоритму обчислення показника ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження.

Результати. У роботі показані переваги пропонованого методу в порівнянні з раніше запропонованими підходами щодо вибору раціонального розміщення веж на основі кластерного аналізу. Запропоновано програмно-алгоритмічну реалізацію методу структурної оптимізації системи оптико-електронного спостереження. Наведений опис алгоритмічної і програмної реалізації цього методу. З використанням розробленого програмного забезпечення проведена оптимізація розміщення веж системи оптико-електронного спостереження, визначені рекомендації щодо її структурної будови.

Висновки. Використання запропонованого методу дозволяє провести структурну оптимізацію побудови системи оптико-електронного спостереження за рахунок розстановки веж спостереження з максимізацією показника ефективності функціонування цієї системи. Можливим напрямом удосконалення методу є уточнення результатів з використанням більшої роздільної здатності геомоделі.

Ключові слова: система оптико-електронного спостереження, метод оптимальної розстановки, вежа системи, показник ефективності системи, алгоритм.

НОМЕНКЛАТУРА

ДПСУ – Державна прикордонна служба України;

РЛС – радіолокаційна станція;

СОЕС – система оптико-електронного спостереження;

СІТК – система інженерно-технічного контролю;

ТЗС – технічні засоби спостереження;

C_n^k – число сполук без повторень;

$S_m=\{(x_0,y_0), (x_1,y_1), \ldots ,(x_{nsm-1}, y_{nsm-1})\}$ – множина точок смуги перекриття;

nsm – потужність множини точок смуги перекриття;

$P_i(x,y)$ – ймовірність виявлення цілі i-тою вежею;

T_i – множина «мертвих зон» спостереження для i-тої вежі;

$P_1(x,y)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою РЛС;

$P_2(x,y)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою тепловізійної камери;

$P_3(x,y)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою телевізійної камери;

SRTM – Shuttle radar topographic mission;

R_{ef} – гранична ефективна дальність виявлення цілей;

S_r – множина точок S_m розширена на відстань R_{ef};

S_p – множина на якій здійснюється пошук оптимального рішення;

m – потужність множини S_p;

N – кількість веж спостереження;

W – загальна ефективність спостереження СОЕС;

$R=\{r_{ij}\}$ – множина відстаней між усіма можливими розташуваннями веж;

xv – масив, що містить поточний варіант розстановки веж СОЕС;

r – номер поточної вежі, для якої здійснюється підбір місця розташування;

b – буферна логічна змінна в алгоритмі оптимізації.

ВСТУП

Розвиток України, як суверенної держави, є неможливим без надійної охорони її кордонів. У сучасних умовах ефективна охорона кордонів неможлива без належного інженерного забезпечення, зокрема без системи інженерно-технічного контролю. Побудова СІТК прикордонного відомства передбачає комплексне використання новітніх технічних засобів спостереження (тепловізійного обладнання, сучасних радіолокаційних станцій, відеокамер) і сучасного телекомунікаційного обладнання. Одним з яскравих прикладів такого комплексного використання нових зразків техніки при побудові СІТК є СОЕС. Дана система включає вежі спостереження, на яких встановлені технічні засоби спостереження. Однак

© Рачок Р. В., Боровик О. В., Боровик Л. В., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-4-17

ефективне функціонування даної системи з точки зору виконання основної функції виявлення порушників кордону залежить від досконалості її структурної та функціональної побудови.

У роботі [1] показано, що потенційні можливості СОЕС не реалізовані повною мірою. Основною причиною цього є нераціональне розміщення веж спостереження. Кращі значення показника ефективності прикриття необхідної смуги перекриття державного кордону можна отримати за рахунок оптимізації структурної побудови СОЕС, яка полягає в оптимальній розстановці веж спостереження.

Метою роботи є розробка методу структурної оптимізації СОЕС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для структурної оптимізації існуючої та перспективних СОЕС в охороні кордону необхідно визначити таке розташування веж системи, при якому досягається максимальне значення показника ефективності її функціонування. Однак з урахуванням розмірів ділянки місцевості, на якій проводиться така оптимізація, та роздільної здатності вихідних даних, загальна потужність множини варіантів можливих розташувань веж має шостий порядок. І хоча загальна кількість веж системи може бути порівняно невеликою (2–10), кількість варіантів їх розташувань навіть для двох веж описуватиметься дванадцятизначною величиною. У випадку більшої кількості веж задача значно ускладнюється. Отже, оскільки вежі є однотипними, достатньо розглянути варіанти сполук без повторень $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$. Проте для вирішення оптимізаційного завдання з використанням доступних засобів обчислювальної техніки ця величина є також надмірною. Все це вимагає визначення підходів до суттєвого скорочення кількості ітерацій та вирішення завдання раціональної розстановки веж СОЕС.

2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Дослідженню раціонального встановлення веж спостереження з урахуванням різноманітних факторів приділяли увагу багато науковців. Більшість з них розглядають цю задачу як задачу покриття. У працях [1–4] розглядались питання раціонального встановлення елементів систем відео-моніторингу. Так, у роботі [1] досліджувалась оптимальність покриття місцевості кругами з різними радіусами. Інший підхід до раціональної розстановки засобів спостереження передбачає проведення покриття кругами однакових радіусів з встановленням їх центрів у вершинах рівносторонніх трикутників [2]. Однак у цих працях розглядались випадки для нескладної форми потрібного району спостереження. Раціональна побудова системи спостереження за лісовим масивом з забороненими областями, який має форму невипуклого багатокутника, розглянута в [3–4]. Однак у цих дослідженнях застосовується евристичний підхід. Необхідний район місцевості покривається рівносторонніми трикутниками або квадратами з подальшим встановленням ТЗС у центри відповідних фігур. У подальшому проводиться коригування їх розміщення для врахування ділянок, в межах яких спостереження не потрібне. Проте в цих дослідженнях не враховуються специфічні фактори, важливі для СОЕС в сфері охорони державних кордонів.

Ряд інших досліджень дотичних до завдань оптимальної розстановки веж присвячено питанням побудови систем зв'язку. Так, питання радіовидимості в умовах складного техногенного рельєфу в населених пунктах розглядалось у [5]. Дослідження [6] присвячене задачі оптимального розміщення телевізійних веж з урахуванням різних критеріїв оптимальності такого розміщення. Оскільки обчислювальна складність повного перебору для вирішення таких оптимізаційних завдань є надто великою, то в [6] були використані методи циклічного покоординатного спуску та динамічного програмування. Однак такі методи в окремих випадках визначають локальний екстремум. Тому оптимальний розв'язок може бути не знайдений. У цьому дослідженні не висвітлено питання врахування рельєфу місцевості, хоча значна увага приділена забезпеченню електромагнітної сумісності. Для СОЕС останній аспект не є актуальним.

Прикордонні аспекти ведення спостереження розглянуті у ряді робіт, зокрема в [7–11]. Дослідження ефективності ведення спостереження прикордонниками з урахуванням рельєфу місцевості та можлива тактика дій контрабандистів проводились в [7–9]. Однак у цих працях основна увага приділена питанням ефективного стиснення інформації про рельєф місцевості. Окрім цього, в цих дослідженнях не враховується комплексне використання різних технічних засобів спостереження. Деякі аспекти застосування таких засобів досліджені в працях [10–11]. У них визначені підходи до оцінки ефективності спостереження з використанням окремих ТЗС. Проте в складі СОЕС комплексно використовуються різні за можливостями ТЗС. Це робить важливою оцінку ефективності їх комплексного функціонування з урахуванням рельєфу місцевості. Така оцінка проведена авторами в [12–13]. Також визначено показник ефективності функціонування СОЕС з точки зору ведення спостереження комплексом веж, що входять до її складу. На основі аналізу результуючої ефективності для різних варіантів побудови СОЕС авторами визначені можливі підходи до її раціональної структурної побудови на основі кластерного аналізу. Однак ці підходи є евристичними і не забезпечують оптимальної розстановки веж. Все це обумовлює актуальність дослідження методу оптимізації структурної побудови СОЕС.

Враховуючи це, метою даної роботи є формування методу оптимального розміщення веж системи оптико-електронного з максимізацією показника ефективності функціонування даної системи.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У [12] процес виявлення цілей СОЕС розглянуто як випадковий. Такий підхід дозволив авторам визначити показник ефективності виявлення порушників кордону в межах необхідної смуги перекриття. Приклад цієї смуги для Білгород-Дністровської ділянки кордону наведено на рис.1.

Як випливає з рис. 1, форма смуги перекриття є достатньо складною. У зв'язку з цим, при аналізі її зручно представити не складними геометричними фігурами, а множиною точок S_m, що задаються координатами. Оскільки для вирішення задач з охорони кордону інтерес представляє спостереження в межах цієї смуги, запропонований авторами показник ефективності враховує ймовірності виявлення на множині S_m. Однак попередній алгоритм [13] розрахунку показника ефективності передбачав перебір всіх точок ділянки місцевості (в межах контуру рис. 1) з перевіркою їх належності до S_m і подальшим обчисленням ефективності у випадку позитивного результату такої перевірки. З метою вдосконалення алгоритму пропонується визначення множини S_m і проведення розрахунку показника ефективності лише по її елементах.

При оцінці ефективності функціонування СОЕС у [13] враховується перешкоджаючий вплив для спостереження рельєфу місцевості. Для цього формується множина «мертвих зон», тобто визначаються ділянки місцевості, які невидимі для спостереження [13]. Слід відмітити, що в окремих випадках такий підхід є не цілком коректним. За певних умов окремі ділянки місцевості можуть бути невидимими з веж спостереження в околі їх ефективного виявлення і видимими з веж на значному віддаленні. Дана ділянка місцевості в єдиній множині «мертвих зон» помічається як видима. Це призводить до помилкового врахування ефективного спостереження на цій ділянці і незначної помилки завищення при обчисленні показника ефективності (рис. 2).

Рисунок 1 – Приклад см

У зв'язку з цим, рельєф місцевості ще більшою мірою впливає на зменшення ефективності функціонування СОЕС і потребує врахування при оптимізації розміщення веж спостереження. З цією метою пропонується не використовувати окрему єдину для всієї системи множину «мертвих зон», а враховувати видимість кожної ділянки при обчисленні ефективності ведення спостереження з кожної вежі. Таким чином, з урахуванням вищевикладеного і [13], ефективність спостереження з *i*-ї вежі можна представити у вигляді:

$$P_i(x,y)=\begin{cases}1-\overline{P}_{1i}(x,y)\cdot\overline{P}_{2i}(x,y)\cdot\overline{P}_{3i}(x,y),(x,y)\notin T_i\\ 0,(x,y)\in T_i\end{cases}. \quad (1)$$

В (1) індексу *i* вежі спостереження відповідають координати її розміщення. На основі цих координат та координат для всіх точок $(x,y)\in S_m$, можна визначити відстань до вежі і з використанням викладок, що наведені в [12], обчислити ймовірності виявлення цілі різними засобами спостереження. Однак, для обчислення (1) потрібно для *i*-ї вежі знайти множину «мертвих зон». З метою спрощення обчислювальної складності множину T_i можна шукати, як $T_i\in S_m$, оскільки результуюча ефективність розраховується для $(x,y)\in S_m$. Для її знаходження доцільно використати відповідний швидкий алгоритм [14]. Проте навіть при використанні такого алгоритму і врахуванні обмеження $T_i\in S_m$, обчислювальна складність завдання з використанням оригінальної роздільної здатності по висотах з проекту SRTM може бути надзвичайно високою. У зв'язку з цим, пропонується зменшити роздільну здатність даних про рельєф на основі застосування методу просторово-частотного аналізу місцевості і обґрунтування достатнього кроку дискретизації [15].

Таким чином, визначення оптимального розміщення веж спостереження СОЕС пропонується вирішувати як дискретну оптимізаційну задачу.

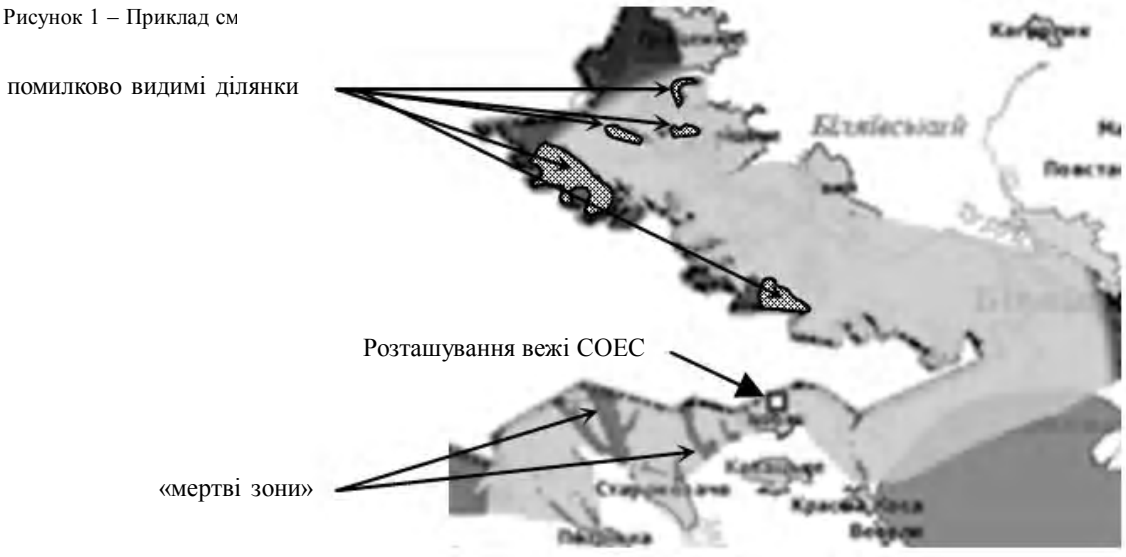


Рисунок 2 – Помилки при використанні єдиної множини «мертвих» зон

Оскільки в певних умовах спостереження ТЗС характеризуються граничною ефективною дальністю R_{ef}, то розглядати розміщення веж спостереження на більшій за R_{ef} відстані видається недоцільним. У зв'язку з цим, з використанням методів геообробки на основі множини S_m шляхом її розширення визначається множина S_r (рис. 3).

Однак, оскільки смуга перекриття знаходиться поряд з лінією державного кордону, множина S_r, утворена точками, які знаходяться на відстані не більшій за R_{ef} від будь якої точки $(x,y)\in S_m$, географічно може виходити за межі держави. На цих ділянках розміщення веж є неможливим. Тому наступним елементом геомоделі (рис. 3) є знаходження перетину множини S_r з множиною точок, що належать території України. Остання операція дещо зменшує потужність остаточної множини S_p, на якій шляхом перебору здійснюється пошук оптимального рішення.

Таким чином, для вирішення оптимізаційного завдання потрібно знайти таке розміщення N веж спостереження СОЕС на множині S_p (рис. 4), щоб максимізувати загальну ефективність W ведення спостереження всією системою:

$$W = \frac{\sum\limits_{(x,y)\in S_m} \left(1-\prod\limits_{i=1}^{N}(1-P_i(x,y))\right)}{nsm}. \qquad (2)$$

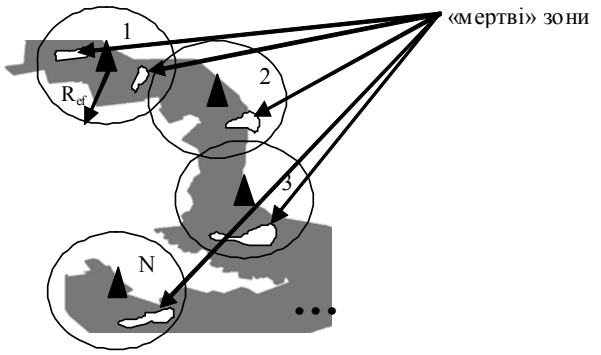


Рисунок 4 – Схематичне представлення оптимізаційного завдання

Слід відмітити, що необхідність урахування «мертвих зон», які специфічні для кожного варіанту розміщення вежі, значно ускладнює завдання.

Оскільки вежі СОЕС є однотипними, то при проведенні перебору такі варіанти розміщення, як наприклад {1,237,8} і {237,8,1}, є тотожними і їх потрібно уникати (у фігурних дужках вказані порядкові номери елементів множини S_p, які представляють собою точки з координатами). Відповідно до цього, варіанти розташувань веж описуються сполуками без повторень. Загальна кількість варіантів розстановки описується виразом для знаходження сполук без повторень:

$$C_N^m = \frac{N!}{m!(N-m)!}. \qquad (3)$$

Для варіанту району розміщення СОЕС на Білгород-Дністровській ділянці кордону m=375. У випадку кількості веж N=4, $C_{375}^4 = 810855375$. Для кожного з цих варіантів потрібно обчислити (2) і за критерієм його максимальності визначити найкращий варіант розміщення веж СОЕС. Обчислення (2) потребує визначення «мертвих зон», що, в свою чергу, є складним обчислювальним завданням. Тому для можливості вирішення задачі структурної оптимізації побудови СОЕС з використанням звичайних засобів обчислювальної техніки необхідно максимально спростити обчислювальну складність алгоритму обчислення (2). З цією метою пропонується визначення всіх $P_i(x,y)$ провести попередньо зі збереженням у масиві перед здійсненням перебору варіантів розстановки веж.

Іншим підходом до суттєвого зменшення самого числа варіантів, для яких проводиться обчислення (2), є уникнення наперед малоефективних варіантів розстановки, при яких різні вежі розміщуються на невеликій відстані (співмірній з R_{ef}). Для зменшення обчислювальної складності відстані між всіма варіантами можливих розташувань веж обчислюються завчасно і зберігаються у масиві $R=\{r_{ij}\}$, де r_{ij} – відстань між i-м і j-м елементом S_p (ці елементи представляють можливі розміщення веж спостереження).

Фрагмент основного алгоритму перебору сполук веж без повторень з уникненням їх близького розміщення і використанням рекурсії наведений на рис. 5. Рекурсив-

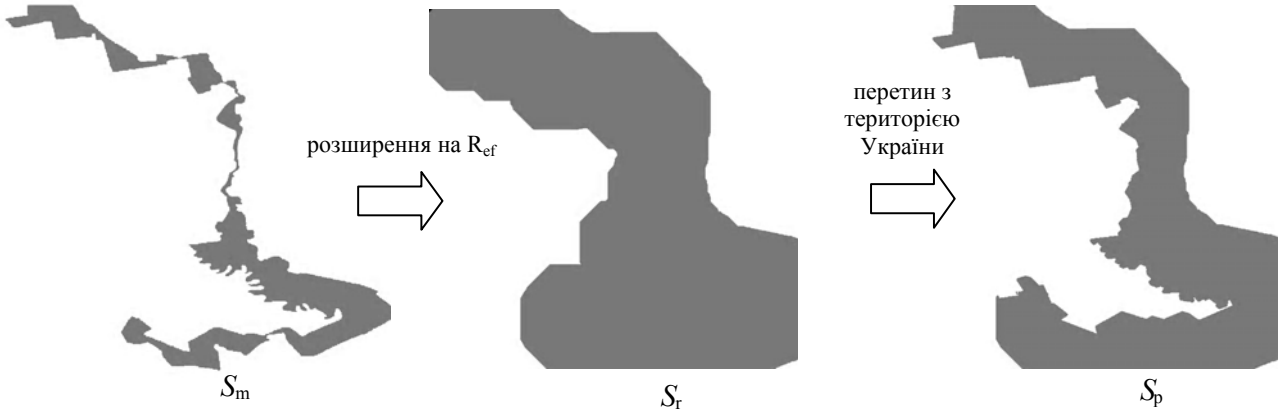


Рисунок 3 – Геомодель визначення множини S_p, на якій проводиться пошук оптимального розміщення веж СОЕС

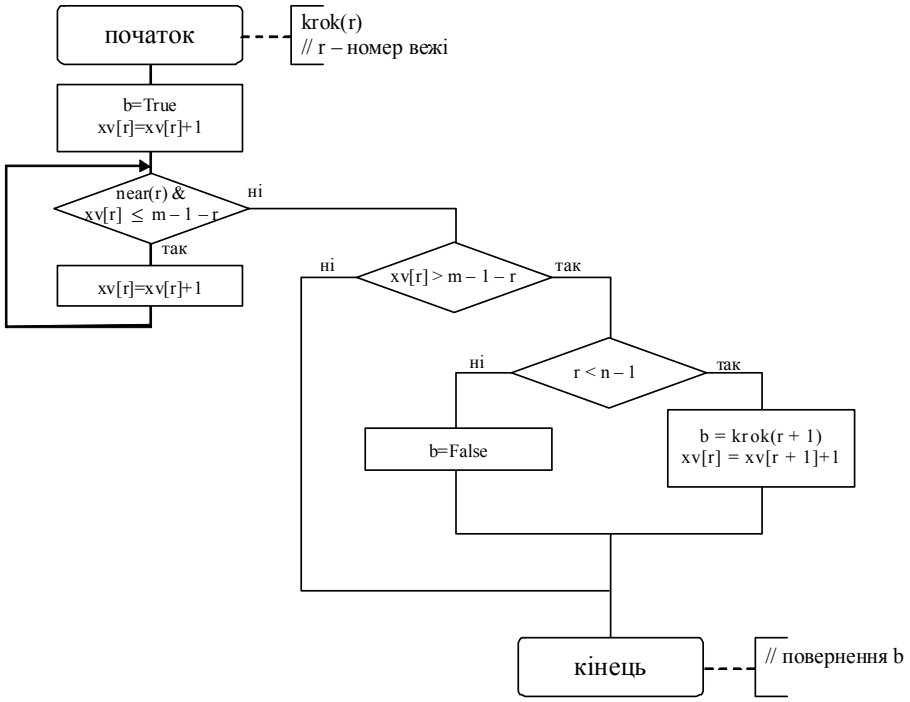


Рисунок 5 – Блок-схема фрагменту алгоритму обчислення ефективності прикриття необхідної смуги перекриття

на функція, представлена на рис. 5, забезпечує визначення наступного варіанту сполук при проведенні перебору. Її аргумент R визначає номер вежі СОЕС, яка потребує зміни місця (номера елементу множини S_p). З основного алгоритму функції передається r=0, однак при визначенні наступного варіанту в алгоритмі рис. 5 функція викликає рекурсивно сама себе для старших розрядів, які відповідають іншим вежам спостереження. На початку алгоритму перевіряється умова взаємної близькості веж спостереження. Для цього викликається функція near(r), яка реалізує таку перевірку. З метою збільшення швидкодії у даній функції вибираються відповідні значення з попередньо обчисленого масиву відстаней між всіма парами можливих розташувань веж S_p. У випадку, якщо поточне розташування r-ї вежі є значно меншим за ефективну відстань спостереження, ця функція повертає істинне значення. У цьому випадку положення вежі змінюється на наступне. Так продовжується до стану віддалення поточної вежі на значну відстань від інших, або до досягнення кінцевого для перебору значення. В останньому випадку, який виявляється наступною перевіркою умови, проводиться рекурсивний виклик функції для наступної вежі і ініціалізація нового положення поточної вежі в залежності від положення наступної.

Такий алгоритм забезпечує перебір всіх варіантів сполук без повторень з проріджанням варіантів за рахунок аналізу близькості веж. Слід відмітити, що такий підхід суттєво зменшує загальну кількість ітерацій за рахунок відкидання наперед малоефективних варіантів розташування веж (немає сенсу розміщувати дві вежі поруч). Однак в окремих випадках при невідповідному співвідношенні смуги перекриття, кількості веж і ефективної дальності технічних засобів спостереження можливі випадки, коли таке неефективне близьке розташування веж СОЕС може забезпечити дещо краще значення показника ефективності. Тому при використанні такої модифікації алгоритму мова має йти не про оптимальне (з точку зору максимальності показника W), а про раціональне розташування веж СОЕС. Якщо потрібен перебір всіх сполук, в алгоритмі рис. 5 прибирається перевірка першої умови (залишається права частина алгоритму).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для реалізації методу оптимізації розстановки веж СОЕС (у тому числі і алгоритму рис. 5) було розроблене відповідне програмне забезпечення. Структурно воно містить дві програми. Перша програма на основі попередньо встановленого кроку дискретизації інформації про рельєф місцевості з використанням просторово-частотного аналізу і множини S_p, представленої у графічному форматі, проводить розрахунок «мертвих зон» для кожного можливого варіанту розташування вежі СОЕС. Ці варіанти зберігаються в визначеному каталозі як сукупність графічних файлів, імена яких відповідають координатам розміщення веж. Оскільки проведення такого розрахунку може бути тривалим, алгоритм першої програми реалізує послідовне продовження розрахунку після попередньої зупинки. Основна оптимізаційна програма, головне вікно якої представлене на рис. 6, реалізує головні функції визначення оптимальної та раціональної розстановки веж СОЕС.

У даній програмі передбачене насамперед зчитування смуги перекриття, яка задається у графічному форматі. Далі реалізується процедура зчитування попередньо обчислених «мертвих зон» і здійснення з їх використанням розрахунку показника ефективності для кожного варіанту розташування веж. Для цього застосовується вираз (1). В ході обчислень використовуються вихідні дані, які задаються в нижній частині вікна програми рис. 6. Після розрахунків за формулою (1), стають доступними

кнопки для виклику процедур оптимізації розстановки веж. Оскільки оптимізація може зайняти значний час, алгоритмом передбачене періодичне зберігання поточного стану. Після припинення роботи програми процес розрахунків можливо продовжити з останнього збереженого варіанту.

Програма тестувалась на обчислювальній платформі з центральним процесором Intel Core 2 Duo E6300 (тактова частота 1,86 ГГц) та 3 Гб оперативної пам'яті. У роботі досліджувалась Білгород-Дністровська ділянка кордону, в межах якої розгорнута існуюча СОЕС. Слід відмітити, що попередні дослідження показали низьку ефективність для поточної структурної будови цієї системи.

Потужність множини S_p становила m=374. Для випадку оптимальної розстановки двох веж СОЕС загальне число сполук без повторень за виразом (3) становило 69751 варіант. Початковий час обчислень становив близько 10 хвилин, що відповідало приблизно 116 ітераціям (обчислення варіантів сполук і відповідних їм ефективностей СОЕС за (2)).

Після вдосконалення програмної реалізації алгоритму за рахунок переходу до цілочисельного однобайтного представлення ймовірності з її масштабуванням час на оптимізацію було скорочено до 6 хвилин. Це відповідало майже двохста ітераціям за секунду.

Подальше прискорення роботи проведене за рахунок модернізації алгоритму за рахунок виключення з перебору наперед неефективних варіантів поруч розташованих веж. Такий підхід дозволив для двох веж зменшити число ітерацій з 69751 до 52875 для малих цілей (відповідає невеликим значенням R_{ef}) та до 22922 для великих цілей (відповідає великим значенням R_{ef}). Для останнього варіанту скорочення числа варіантів більш ніж у 3 рази дозволило досягнути значного зменшення витрат часу, фактично до менш ніж 2-х хвилин. Слід відмітити, що в усіх випадках при однакових умовах спостереження результат оптимізації був ідентичним. Для малих цілей він представлений на рис. 7. У правій частині рис. 7 представлені результати перевірки отриманого варіанту у програмі для оцінки ефективності функціонування СОЕС, запропонованої авторами раніше. Як випливає з рисунку, числові значення показника в цілому близькі. Однак більша точність розрахунку цього показника потребує більше однієї секунди лише для одного варіанту розміщення веж СОЕС.

Рисунок 6 – Головне вікно програми для визначення оптимальної та раціональної розстановки веж СОЕС

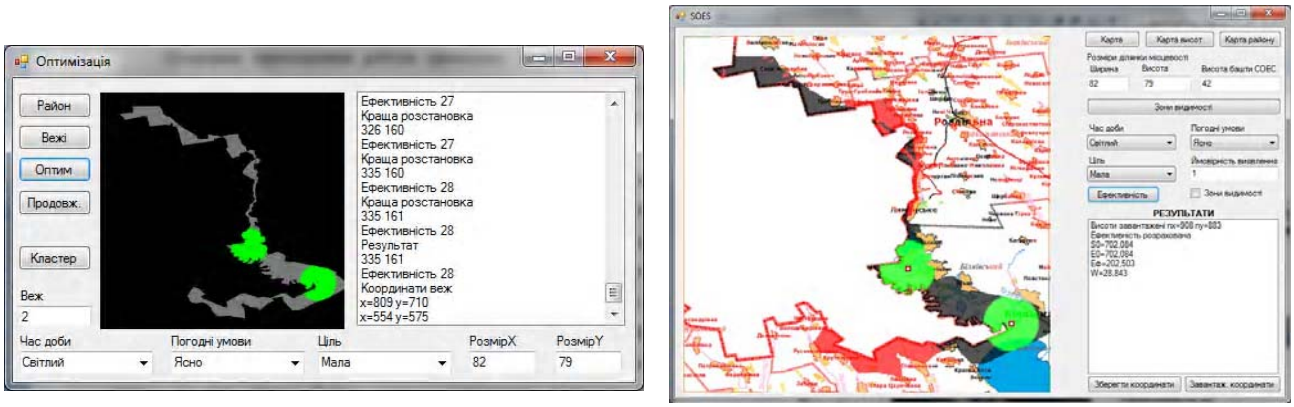
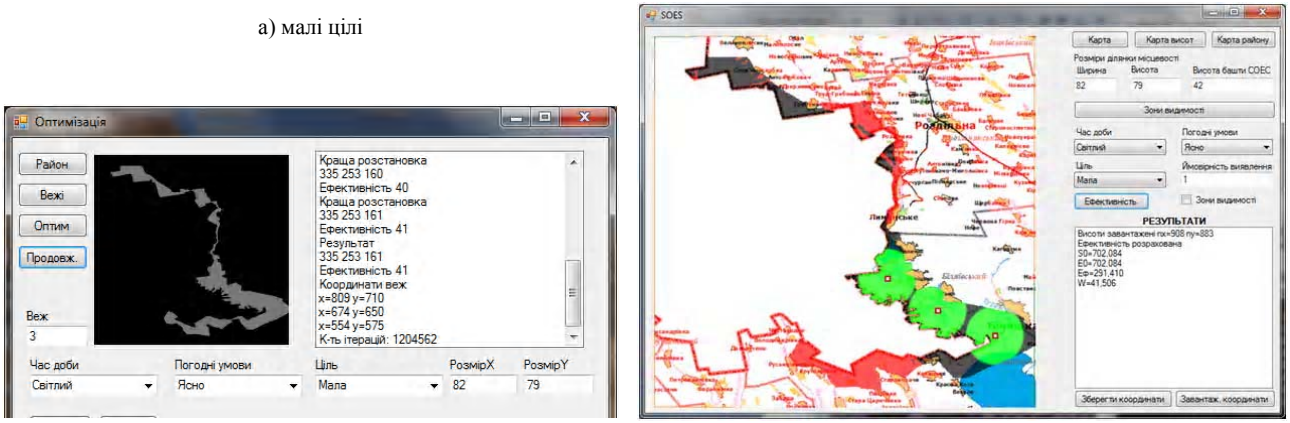


Рисунок 7 – Розстановка двох веж у випадку виявлення малих цілей

Для трьох цілей загальна кількість сполук вже складає 8649124. Для малих цілей використання модифікованого алгоритму дозволило його зменшити до 1204562. На обчислення результату (рис. 8а) при цьому витрачено трохи менше 3-х годин. Однак для великих цілей за рахунок використання алгоритму рис. 5 число ітерацій скоротилось до 490325 (більш ніж у 17 разів). Це дало можливість менш ніж за годину вирішити задачу розстановки трьох веж СОЕС (рис. 8б). Оптимізація без зменшення числа ітерацій потребувала близько однієї доби.

Для 4-х веж обчислювальна складність оптимізаційної задачі значно зростає. У зв'язку з цим, розрахунки проводились лише для випадку великих цілей (з великим R_{ef}) і використанням модифікованого алгоритму перебору сполук. Процес обчислень зайняв майже дві години. Результати розрахунків представлені на рис. 9

а) малі цілі



б) великі цілі

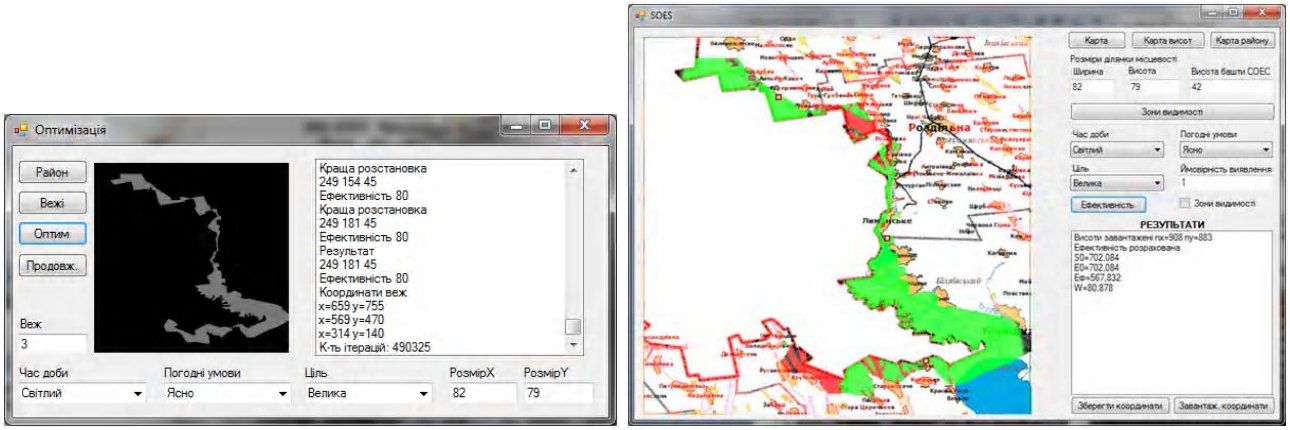


Рисунок 8 – Розстановка 3-х веж СОЕС

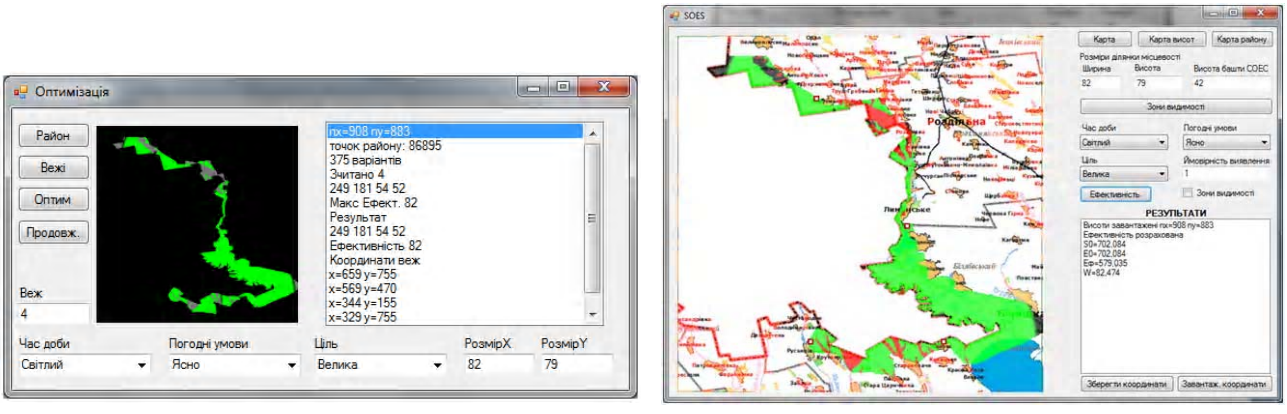


Рисунок 9 – Розстановка 4-х веж СОЕС при виявленні великих цілей

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Слід відмітити, що авторським колективом за участі авторів даної роботи раніше було запропоновано підхід до раціональної розстановки веж спостереження на основі використання кластерного аналізу. Однак такий підхід є більшою мірою евристичним. І хоча він і забезпечував в цілому непогані результати, про їх оптимальність стверджувати було не можливо. Суть підходу полягала в розбитті множини S_m на задану кількість кластерів з визначенням їх центрів. Для цього використовувався класичний метод кластерного аналізу K-Means. Однак оскільки цей метод використовує випадкову початкову вибірку, окремі результати його застосування можуть дещо відрізнятись. З метою уникнення цього було запропоновано декілька вдосконалених методик, які до вирішення оптимізаційного завдання в даному дослідженні забезпечували найкращі результати.

Порівняння результатів вирішення оптимізаційного завдання з результатами найкращих варіантів раціональної розстановки веж СОЕС, отриманих з використанням методів кластеризації, наведені у табл. 1.

З даних, наведених у табл. 1, випливає, що очікувано кращі результати по результуючому показнику ефективності СОЕС W забезпечує запропонований в даному дослідженні метод. По великих цілях, в умовах невеликої кількості веж для досліджуваної масштабної ділянки, природно забезпечується значно вища ефективність функціонування СОЕС.

При використанні кластеризації з метою раціональної розстановки 4-х веж переважно отримувались результати з значно меншими значеннями W. Однак один з варіантів, обумовлених випадковою початковою розстановкою кластерів, забезпечив ефективність близьку до оптимальної рис. 10.

Таблиця 1 – Оцінювання ефективності СОЕС

Кількість веж	Ціль	W раціональна,%	W оптимальна,%
2	мала	17,3	28,8
2	велика	53,1	68,5
3	мала	32,5	41,5
3	велика	66,7	80,9
4	велика	73,2	82,5

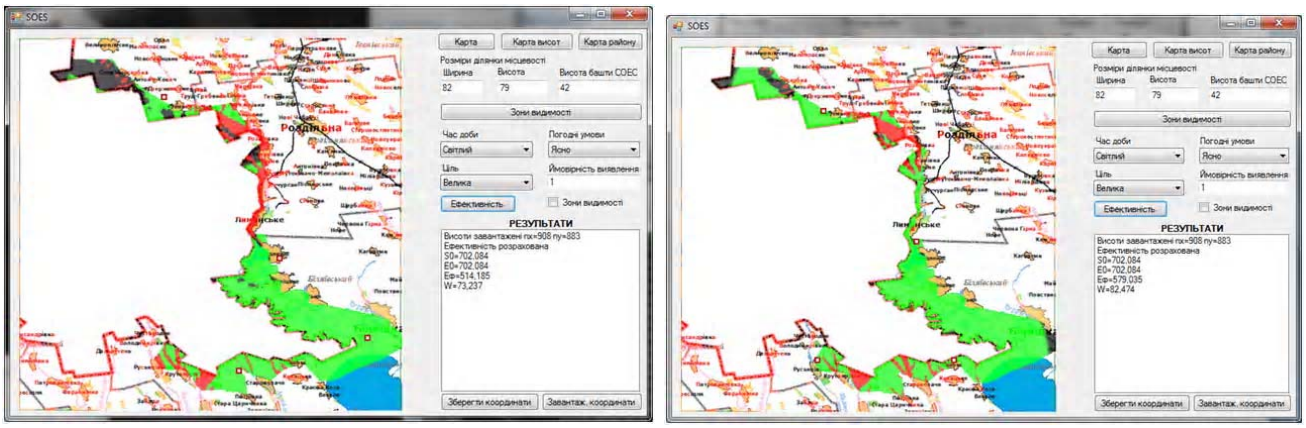
Слід відмітити, що використання кластеризації є набагато швидшим, ніж перебір всіх можливих варіантів розміщень веж СОЕС. Все це обумовило доцільність поєднання швидкого розрахунку показника W, реалізованому в цьому дослідженні, з методом розстановки веж спостереження на основі методу кластеризації. З цією метою в програмному забезпеченні рис. 6 реалізована додаткова функція кластеризації.

В циклі з використанням кластерного аналізу отримуються варіанти розстановки веж. Ці варіанти перевіряються на предмет можливості їх реалізації існуючими можливими розміщеннями веж СОЕС. У випадку такої можливості проводиться обчислення показника W і за його значенням обирається кращий варіант. У випадку, якщо за певну кількість ітерацій (у програмі цей поріг встановлено на рівні 700) покращення показника ефективності не відбувається, цикл припиняється. Такий підхід дозволяє отримати компромісне рішення, яке у випадку великої кількості веж дозволяє за обмежений час отримати рішення, близьке до оптимального. З використанням цього методу для розстановки 4-х веж СОЕС при спостереженні за великими цілями отримане значення W=80,9, що є близьким до оптимального W=82,5 (рис. 11).

Слід відмітити, що результат рис. 11 отриманий за кілька хвилин обчислень. Модифікований метод розстановки веж на основі кластеризації з вибором найкращого з різних варіантів за критерієм максимізації показника ефективності W дозволяє в короткі строки проводити структурну раціоналізацію побудови СОЕС у випадку більшої кількості веж. На рис. 12 наведений раціональний варіант розстановки 8-ми веж, отриманий за час до 5 хвилин. Перебір всіх варіантів для 8-ми веж навіть з використанням методу рис. 5 зайняв би надзвичайно великий проміжок часу.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Великі витрати часу пояснюються обчислювальною складністю відповідної задачі. Тому пропонований модифікований метод розстановки веж на основі кластеризації є одним з дієвих методів, що забезпечують вирішен-



а б

Рисунок 10 – Порівняння результатів розстановки 4-х веж СОЕС: а – раціональна розстановка, б – оптимальна розстановка

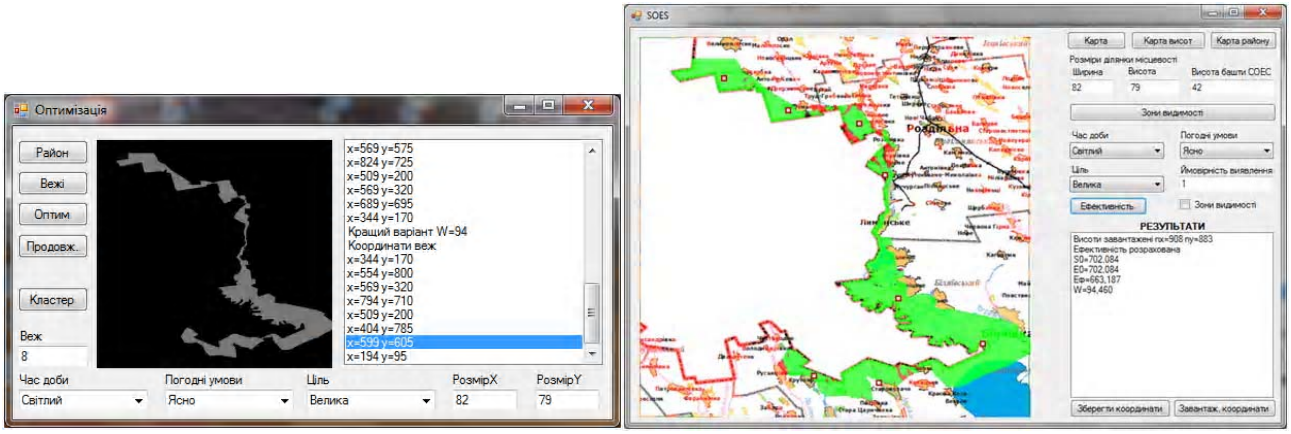


Рисунок 11 – Розстановка 4-х веж СОЕС з використанням модернізованого методу кластеризації і перевірка її ефективності

ня практичної задачі побудови структури СОЕС для довільної розмірності задачі за допустимі проміжки часу. Однак у випадку важливості урахування точних значень ефективнісних характеристик функціонування СОЕС слід застосовувати вище пропонований авторський метод.

ВИСНОВКИ

Таким чином, у роботі поставлена задача оптимізації розміщення веж системи оптико-електронного спостереження та запропоновано методи її вирішення, які можуть застосовуватись в залежності від цільових настанов, і які передбачають максимізацію показника ефективності функціонування системи. Особливістю методу є використання в ньому проміжних результатів геомоделювання.

ПОДЯКИ

У статті визначений науково-методичний апарат структурної оптимізації системи оптико-електронного спостереження. Роботу виконано в рамках спільних наукових досліджень кафедри інженерного забезпечення та технічних засобів охорони кордону і кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін Національної академії Державної прикордонної служби України. Дослідження здійснювались у рамках науково-дослідних робіт за темами «Опис рельєфу місцевості в задачах статистичної радіофізики з застосуванням геоінформаційних систем» та «Формалізація задач геоінформаційної обробки даних в системі охорони кордону».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузнецов В. Ю. Задачи покрытия ортогональных многоугольников с запретными участками / В. Ю. Кузнецов // Вестник УГАТУ. – 2008. – Т. 10, № 2 (27). – С. 177–182.
2. Kershner R. The number of circles covering a set / R. Kershner // Amer. J. Mathematics. –1939. – Vol. 61, № 3. – P. 665–671.
3. Бабий С. М. Алгоритм покрытия площади лесного массива кругами видеонаблюдения и контроля / С. М. Бабий, Д. А. Кочкарь, В. В. Чмовж // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №7 (48). – С. 272–277.
4. Кочкарь Д. А. Оптимальное размещение вышек наблюдения наземных систем видео-мониторинга лесных пожаров / Д. А. Кочкарь, С. Ю. Мединцев, А. А. Орехов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №7(48). – С. 311–314.
5. Рекомендация МСЭ-R P.1411-6 Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования наружных систем радиосвязи малого радиуса действия и локальных радиосетей в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц [Электрон. ресурс] / – Режим доступа: http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en.
6. The Decision of Problems of Optimization of Territorial Arrangement of the Radio-Transmitting Stations at Design of Transmission Networks / [G. Ščerbakov, V. Lindval, E. Spirina et al.] // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas : Technologija, 2004. – № 3(52). – P. 47–51.
7. Smugglers and border guards – The GeoStar Project at RPI / [W. Franklin, M. Inanc, Z. Xie et al.]. // ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems : 15th international symposium, Seattle, 7–9 November 2007 : proceedings. ACM New York, 2007. – P. 228–236.
8. Multiple observer siting and path planning on a compressed terrain / [M. Tracy, W. Franklin, B. Cutler et al.] // Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations : 17th international conference, San Diego, 26–27 August 2007: proceedings. Bellingham, 2007. – P. 6697–16.
9. Tradeoffs when multiple observer siting on large terrain cells / [W. Franklin, C. Vogt, A. Riedl et al.] // Progress in Spatial Data Handling : 12th international symposium, University of Vienna, 12–14 July 2006: proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2006. – P. 845–861.
10. Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей / В. А. Горбунов. – Москва : Воениздат, 1979. – 160 с.
11. Царьов Ю. О. Засоби візуального спостереження охорони державного кордону / Ю. О. Царьов, Д. А. Купрієнко. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2010. – 164 с.
12. Боровик О. В. Методика оцінки ефективності функціонування однієї вежі системи оптико-електронного спостереження / О. Боровик, Р. Рачок, М. Дармороз // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки : наукове видання / [гол. ред. Олексієнко Б. М.]. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2016. – № 4(70). – С. 207–226.
13. Боровик О. В. Оцінка ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження / О. В. Боровик, Р. В. Рачок, М. М. Дармороз // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 2 (41). – С. 93–99.
14. Рачок Р. В. Алгоритми визначення областей видимості з веж системи оптико-електронного спостереження / Р. В. Рачок // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2017. – Вип. 56. – С. 57–63.
15. Рачок Р. В. Вибір кроку дискретизації представлення рельєфу місцевості в задачах визначення областей видимості / Р. В. Рачок // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації. – Випуск 2. – Київ : ВІТІ, 2017. – С. 85–91.

Стаття надійшла до редакції 16.07.2017.
Після доробки 07.09.2017.

Рачок Р. В.[1], Боровик О. В.[2], Боровик Л. В.[3]

[1]Канд. техн. наук, доцент, докторант докторантуры, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

[2]Д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры инженерного обеспечения и технических средств охраны границы, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

[3] Канд. психол. наук, доцент, доцент кафедры общенаучных и инженерных дисциплин, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Актуальность. В охране границы используется система оптико-электронного наблюдения, которая представлена совокупностью башен, на которых установлены радиолокационные, тепловизионные и видео средства наблюдения. Эффективность выявления нарушителей границы с использованием данной системы существенно зависит от ее функционального и структурного строения. Функциональное построение системы оптико-электронного наблюдения определяется подбором технических средств наблюдения с учетом их функциональных возможностей. Структурное строение системы зависит от выбора мест расположения башен наблюдения с учетом физико-географических условий местности и характеристик технических средств наблюдения. Несовершенство научно-методического аппарата в области структурной оптимизации построения системы оптико-электронного наблюдения обусловила актуальность исследования.

Цель. Целью работы является разработка метода структурной оптимизации размещения башен системы оптико-электронного наблюдения.

Метод. В работе поставлена задача оптимизации размещения башен системы оптико-электронного наблюдения и предложен метод ее решения, который предусматривает максимизацию показателя эффективности функционирования системы. Особенностью данного метода являются: использование геомодели с целью уменьшения количества вариантов размещения башен системы, применение авторского подхода к выбору шага дискретизации пространственных данных и быстродействующего алгоритма вычисления показателя эффективности функционирования системы оптико-электронного наблюдения.

Результаты. В работе показаны преимущества предлагаемого метода по сравнению с ранее предложенными подходами к выбору рационального размещения башен на основе кластерного анализа. Предложено программно-алгоритмическую реализацию метода структурной оптимизации системы оптико-электронного наблюдения. Приведено описание алгоритмической и программной реализации этого метода. С использованием разработанного программного обеспечения проведена оптимизация размещения башен системы оптико-электронного наблюдения, определены рекомендации по ее структурному построению.

Выводы. Использование предложенного метода позволяет провести структурную оптимизацию построения системы оптико-электронного наблюдения за счет расстановки башен наблюдения с максимизацией показателя эффективности функционирования этой системы. Возможным направлением усовершенствования метода является уточнение результатов с использованием большего разрешения.

Ключевые слова: система оптико-электронного наблюдения, метод оптимальной расстановки, башня системы, показатель эффективности системы, алгоритм.

Rachok R. V.[1], Borovik O. V.[2], Borovik L. V.[3]

[1]PhD, Associate professor, doctoral candidate of the doctoral studies, the National academy of State border guard service of Ukraine named after Bohdan Khmelnitsky, Khmelnitsky, Ukraine

[2]Dr.Sc., Professor, department of engineering and technical means of border protection, the National academy of State border guard service of Ukraine named after Bohdan Khmelnitsky, Khmelnitsky, Ukraine

[3]PhD, Associate professor, department of General scientific and engineering disciplines, the National academy of State border guard service of Ukraine named after Bohdan Khmelnitsky, Khmelnitsky, Ukraine

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF OPTICAL-ELECTRONIC OBSERVATION

Context. In border security uses a system of optical-electronic observation, which presents a set of towers that have radar, thermal imaging and video surveillance. The efficiency of detecting trespassers with the use of this system significantly depends on its functional and structural construction. The functional structure of system of optical-electronic observation is determined by the selection of technical means of surveillance (TCS) based on their functionality. Structure of the system depends on the choice of the locations of observation towers with the physical and geographical conditions of the terrain and technical characteristics of the TCS. The imperfection of the scientific methodological apparatus in the field of structural optimization of building of system of optical-electronic observation was determined by the relevance of the study.

Objective. The aim of this work is to develop a method of structural optimization of the placement of the system of optical-electronic observation towers.

Method. In work the task of optimizing the placement of the towers of system of optical-electronic observation and the proposed method of its solution, which involves the maximization of efficiency of functioning of the system. The peculiarity of this method is the use of geomodel to reduce the number of accommodation of the towers of the system, the use of the author's approach to sampling of spatial data and high-speed algorithm for calculation of efficiency of functioning of system of optical-electronic observation.

Results. The paper shows the advantages of the proposed method compared to previously proposed approaches for the choice of rational placement of towers on the basis of cluster analysis. In this work the proposed software-algorithmic implementation of the method to structural optimization of the system of optical-electronic observation. The authors describe the description of algorithmic and software implementation of this method. Using the developed software optimized placement of the towers of the system of optical-electronic observation, certain recommendations regarding the structure of this system.

Conclusions. Using the proposed method allows to carry out structural optimization of building of system of optical-electronic observation due to the placement of observation towers with the maximization of efficiency of functioning of this system. A possible direction of improvement of the method is a refinement of the results using a higher resolution geomodel.

Keywords: system of optical-electronic observation, a method for optimal placement, tower systems, system performance indicator, algorithm.

REFERENCES

1. Kuznecov V. Ju. Zadachi pokrytija ortogonal'nyh mnogougol'nikov s zapretnymi uchastkami, *Vestnik UGATU,* 2008, Vol.10, No. 2(27), pp. 177–182.
2. Kershner R. The number of circles covering a set, *Amer. J. Mathematics*, 1939, Vol. 61, No. 3, pp. 665–671.
3. Babij S. M., Kochkar' D. A., Chmovzh V. V. Algoritm pokrytija ploshhadi lesnogo massiva krugami videonabljudenija i kontrolja, *Radioelektronni i komp'juterni sistemi*, 2010, No. 7(48), pp. 272–277.
4. Kochkar' D. A., Medincev S. Ju., Orehov A. A. Optimal'noe razmeshhenie vyshek nabljudenija nazemnyh sistem video-monitoringa lesnyh pozharov, *Radioelektronni i komp'juterni sistemi*, 2010, No. 7(48), pp. 311–314.
5. Rekomendacija MSJe-R P.1411-6 Dannye o rasprostranenii radiovoln i metody prognozirovanija dlja planirovanija naruzhnyh sistem radiosvjazi malogo radiusa dejstvija i lokal'nyh radiosetej v diapazone chastot ot 300 MGc do 100 GGc [Jelektron. resurs]. Rezhim dostupa: http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en.
6. Ščerbakov G., Lindval V., Spirina E. et al.The Decision of Problems of Optimization of Territorial Arrangement of the Radio-Transmitting Stations at Design of Transmission Networks, *Electronics and Electrical Engineering*. Kaunas, Technologija, 2004, No. 3(52), P. 47–51.
7. Franklin W., Inanc M., Xie Z., Tracy M., Cutler B., Andrade M., Luk F. et al. Smugglers and border guards – The GeoStar Project at RPI, *ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems : 15th international symposium, Seattle, 7–9 November 2007 : proceedings*. ACM New York, 2007, pp. 228–236.
8. Tracy M., Franklin W., Cutler B., Andrade M., Luk F., Inanc M., Xie Z. et al.Multiple observer siting and path planning on a compressed terrain, *Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations : 17th international conference, San Diego, 26–27 August 2007: proceedings*. Bellingham, 2007, pp. 6697–16.
9. Franklin W., Vogt C., Riedl A., Kainz W., Elmes G. et al.Tradeoffs when multiple observer siting on large terrain cells, *Progress in Spatial Data Handling : 12th international symposium, University of Vienna, 12–14 July 2006: proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 845–861.
10. Gorbunov V. A. Jeffektivnost' obnaruzhenija celej. Moscow, Voenizdat, 1979, 160 p.
11. Car'ov Ju. O., Kuprienko D. A. Zasobi vizual'nogo sposterezhennja ohoroni derzhavnogo kordonu. Hmel'nic'kij, Vid-vo NADPSU, 2010, 164 p.
12. Borovik O. V., Rachok R., Darmoroz M. gol. red. Oleksienko B. M.Metodika ocinki efektivnosti funkcionuvannja odnієї vezhi sistemi optiko-elektronnogo sposterezhennja, Zbirnik naukovih prac' Nacional'noї akademiї Derzhavnoї prikordonnoї sluzhbi Ukraïni. Serija: vijs'kovi ta tehnichni nauki : naukove vidannja, Vidavnictvo NADPSU, 2016, No. 4(70), pp. 207–226.
13. Borovik O. V., Rachok R. V., Darmoroz *M. M*. Ocinka efektivnosti funkcionuvannja sistemi optiko-elektronnogo sposterezhennja, *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 2017, No. 2 (41), pp. 93–99.
14. Rachok R. V. Algoritmi viznachennja oblastej vidimosti z vezh sistemi optiko-elektronnogo sposterezhennja, *Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiïvs'kogo nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka*. Kiev, VIKNU, 2017, Vip. No. 56, pp. 57–63.
15. Rachok R. V. Vibir kroku diskretizacіï predstavlennja rel'єfu miscevosti v zadachah viznachennja oblastej vidimosti, *Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu telekomunikacij ta informatizacіï*. Kiïv, Vipusk 2, VITI, 2017, pp. 85–91.